



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

TESE DE DOUTORADO

*Efeitos da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada estacionária, sobre a armazenabilidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade "carioca": Avaliação experimental, modelagem e simulação.*

ORIENTADO: *Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata*

ORIENTADORA: FLORENCIA CECILIA MENEGALLI

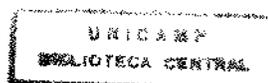
PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por MÁRIO EDUARDO RANGEL MOREIRA CAVALCANTI MATA e aprovada pela Comissão Julgadora em 08.04.97. Campinas, 08 de abril de 1997

Profª Drª FLORENCIA C. MENEGALLI
Presidente da Banca

CAMPINAS

ABRIL DE 1997



Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

*Efeitos da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada estacionária, sobre a armazenabilidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade "carioca": Avaliação experimental, modelagem e simulação.*

Tese apresentada à Universidade Estadual de Campinas, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Alimentos para Obtenção do Título de Doutor

**CAMPINAS
SÃO PAULO - BRASIL
1997**

Efeitos da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada estacionária, sobre a armazenabilidade de sementes de feijão (Phaseolus vulgaris L.), variedade "carioca": Avaliação experimental, modelagem e simulação.

por

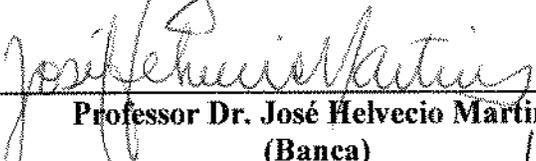
Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

Tese aprovada em _____ de _____ de 1997

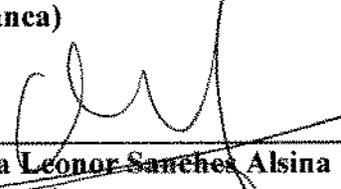
BANCA EXAMINADORA



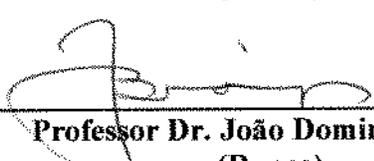
Professora Dra. Florencia Cecilia Menegalli
(Orientadora)



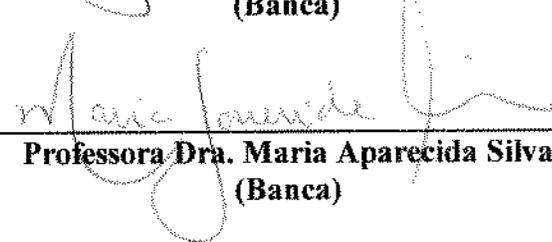
Professor Dr. José Helvecio Martins
(Banca)



Professora Dra. Odelsia Leonor Sanchez Alsina
(Banca)



Professor Dr. João Domingos Biagi
(Banca)



Professora Dra. Maria Aparecida Silva
(Banca)

Professora Dra. Mirian Dupas Hubinger
(Banca)

Professor Dr. Kil J. Park
(Banca)

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA	7/UNICAMP
V.	M 412
TOMBO BC	30681
PROC.	281/97
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	29/05/97
N.º CPO	

CN-00099247-E

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

C314e Cavalcanti Mata, Mario Eduardo Rangel Moreira
Efeito da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo em camada estacionária, sobre a armazenabilidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) variedade "carioca": avaliação experimental, modelagem e simulação / Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata -- Campinas, SP: [s.n], 1997.

Orientador: Florencia Cecília Menegalli
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

I. Semente. 2. Feijão - Armazenamento 3. Secagem. 4. Altas temperaturas, I. Menegalli, Florencia Cecília. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

Dedico este trabalho a meus pais,

Sylvio Rangel Moreira Cavalcanti

Ana Judith Mata de Rangel Moreira Cavalcanti

AGRADECIMENTOS

À Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro recebido para realização deste Curso.

À Universidade Federal da Paraíba pela oportunidade oferecida para realização do Curso de Doutorado em Engenharia de Alimentos.

À Professora Dra. Florencia Cecilia Menegalli pela Orientação e amizade recebida no decorrer deste Curso.

Aos Professores José Helvecio Martins, Odelsia Leonor S. Alsina, João Domingos Biagi, Maria Aparecida Silva, Mirian Dupas Hubinger, e Kil Jim Park pela colaboração nas sugestões e correção deste trabalho.

À amiga Maria Elita Duarte Braga, pelo auxílio em todos os momentos desta etapa de vida quer seja no plano Profissional como no Pessoal.

Aos Professores Vivaldo Silveira Júnior, Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo, Alexandre José de Melo Queiroz, Marcos Antonio Scaico pelo auxílio e amizade recebida no transcorrer deste curso.

Aos Professores Carlos Alberto Gasparetto e Enny Therezinha Martucci pelo carinho e amizade recebida durante este Curso, fazendo com que, este período que passamos na UNICAMP, fosse o mais agradável possível.

Aos funcionários do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem - Campina Grande -PB, Renato Fonseca Aragão, Luis Antônio Dantas, Antonio Amaro de Lima.

Em especial a meus irmãos Silvio José Mata de Rangel Moreira Cavalcanti, José Felipe Mata de Rangel Moreira Cavalcanti, Ana Noemi Mata de Rangel Moreira Cavalcanti, Maria del Carmen Rangel Moreira Cavalcanti Mata e Rafael Guilherme Mata de Rangel Moreira Cavalcanti pelo incentivo e apoio não só neste momento, mas longo de toda nossas vidas.

À minha esposa e filhos Sueli Ramos de Rangel Moreira Cavalcanti, Anna Sylvia Ramos de Rangel Moreira Cavalcanti, Maria Eduarda Ramos de Rangel Moreira Cavalcanti e Rafael Felipe Ramos de Rangel Moreira Cavalcanti pelo carinho e dedicação e compreensão durante todo este Curso.

CONTEÚDO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABELAS	xxiii
RESUMO	xxx
ABSTRACT	xxxii
INTRODUÇÃO	1
OBJETIVOS	5
CAPÍTULO 1	
<i>Propriedades físicas do feijão necessárias a secagem.....</i>	7
1. INTRODUÇÃO	8
2. REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1. Equilíbrio higroscópico de grãos e cereais	9
2.1.1. Considerações sobre os fenômenos de sorção e dessorção	9
2.1.2. Considerações sobre histerese	10
2.1.3. Determinação da umidade de equilíbrio	11
2.1.4. Equações de equilíbrio higroscópico	13
2.2. Calor latente de vaporização da água do produto	20
2.3. Calor específico	22
2.4. Forma e tamanho das sementes de feijão.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1. Equilíbrio higroscópico	26
3.1.1. Determinação dos teores de umidade de equilíbrio	26
3.2. Calor latente de vaporização	28
3.3. Calor específico	29
3.3.1. Determinação do calor específico do feijão em função dos teores de umidade	29
3.3.2. Determinação da capacidade calorífica do calorímetro	30
3.4. Determinação do tamanho das sementes e do raio da esfera equivalente.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1. Equilíbrio higroscópico das isotermas de dessorção e sorção.....	32

4.2. Calor latente de vaporização	40
4.3. Calor específico	44
4.4. Forma e tamanho das sementes de feijão.....	45
5. CONCLUSÕES	47
 CAPÍTULO 2	
<i>Curvas de secagem em camada fina</i>	<i>49</i>
 1. INTRODUÇÃO	50
 2. REVISÃO DE LITERATURA	51
2.1. Processo de Secagem	51
2.1.1. Período de secagem à taxa constante	52
2.1.2. Período de secagem à taxa decrescente	54
2.2. Teoria de secagem	55
2.2.1. Teoria de difusão líquida	56
2.2.2. Teoria capilar	59
2.2.3. Teoria de vaporização-condensação	60
2.2.4. Teoria de Luikov	61
2.2.5. Teorias de Philip e De Vries e de Berger e Pei	62
2.2.6. Teoria de Fortes e Okos	62
2.2.7. Coeficiente de difusão e constante de secagem	65
2.2.8. Equações de secagem semi-empíricas e empíricas	65
2.2.9. Efeito da umidade relativa e da velocidade do ar na taxa de secagem	68
 3. MATERIAIS E MÉTODOS	69
3.1. Secagem em camada delgada	70
3.2. Tratamento dos dados	71
 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1. Curvas de secagem em camada fina	72
4.2. Coeficiente de difusão	92
4.3. Efeito da umidade inicial das sementes de feijão sobre a taxa de secagem	93
4.4. Efeito da velocidade do ar sobre a taxa de secagem das sementes de feijão	97
4.5. Efeito da Umidade Relativa do ar sobre a taxa de secagem de sementes de feijão.....	98
 5. CONCLUSÕES	104

CAPÍTULO 3

<i>Efeito da secagem a altas temperaturas por curtos períodos de tempo na qualidade fisiológica das sementes</i>	105
--	-----

1. INTRODUÇÃO	106
2. REVISÃO DE LITERATURA	108
2.1. Importância da secagem	108
2.2. Secagem natural	109
2.3. Secagem artificial	109
2.3.1 - Secagem a baixas temperaturas	111
2.3.2 - Secagem a altas temperaturas	112
3. MATERIAIS E MÉTODOS	113
3.1. Secagem em camada delgada por curtos períodos de tempo	113
3.2. Análise da qualidade fisiológica	116
3.2.1 - Teste de Germinação	116
3.2.2 - Teste de vigor	116
3.3 - Análise estatística	116
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	117
4.1. Secagem em camada delgada por curtos períodos de tempo	117
4.2. Germinação das sementes em função das condições de secagem	121
4.3. Vigor das sementes em função das condições de secagem	128
4.4. Germinação e vigor em função do tempo de residência	135
5. CONCLUSÕES	141

CAPÍTULO 4

<i>Simulação e secagem de sementes de feijão em secador de leito fixo</i>	143
---	-----

1. INTRODUÇÃO	144
1.1. Considerações sobre a simulação de secagem	145

2. REVISÃO DE LITERATURA	147
2.1. Modelo de Hukill	147
2.2. Modelo de Thompson	151
2.3. Modelo de Morey	154
2.4. Modelo de Michigan	156
2.5. Simulação de secagem em camada estacionária	159
3. MATERIAIS E MÉTODOS	160
3.1. Secagem em camada espessa	160
3.1.1. Secador Experimental	160
3.1.2. Condução dos testes de secagem em camada espessa	161
3.2. Simulação de Secagem em Camada Espessa	165
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	169
4.1. Secagem em camada espessa e simulação	169
4.2. Temperaturas do ar de secagem para as condições experimentais e simuladas	176
4.3. Germinação e vigor das sementes secas em camada espessa	183
4.4. Simulação e secagem de sementes em camada espessa a altas temperaturas por curtos períodos de tempo	186
5. CONCLUSÕES	188
 CAPÍTULO 5	
<i>Armazenabilidade das sementes de feijão</i>	189
1. INTRODUÇÃO	190
2. REVISÃO DE LITERATURA	191
2.1. Germinação das sementes	191
2.2. Vigor das sementes	193
2.3. Armazenagem de sementes	194
3. MATERIAIS E MÉTODOS	196
3.1. Determinação do teor de umidade	197
3.2. Determinação do peso de 1000 sementes e massa específica	197
3.3. Análise estatística	197

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	198
4.1. Germinação das sementes de feijão armazenadas	198
4.1.1. Interação entre os fatores - germinação.....	200
4.2. Vigor das sementes de feijão armazenadas	203
4.2.1. Interação entre os fatores - vigor.....	206
4.3. Teor de umidade, massa de 1000 sementes e massa específica das sementes de feijão armazenadas.....	209
4.4. Equações de predição do decréscimo da germinação e do vigor das sementes de feijão.....	213
5. CONCLUSÕES	215
CONSIDERAÇÕES FINAIS	216
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	217
APÊNDICE 1A	230
APÊNDICE 2A	232
APÊNDICE 2B	283
APÊNDICE 3A	286
APÊNDICE 4A	294
APÊNDICE 4B	328

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1

Propriedades físicas do feijão necessárias a secagem.

- c_a = calor específico da água, $\text{cal.g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
 c_p = calor específico, $\text{J.kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
 C = capacidade calorífica, $\text{J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
 C_{cal} = capacidade calorífica do calorímetro, $\text{cal} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
 d_e = diâmetro de uma esfera de volume igual ao objeto, m
 d_i = diâmetro da maior circunferência inscrita na projeção do objeto em repouso, m
 d_c = diâmetro de menor circunferência que circunscribe a projeção do objeto em repouso, m
 E = esfericidade, em porcentagem
 h'_{fg} = calor latente de vaporização da água do grão, J.kg^{-1}
 h_{fg} = calor latente de vaporização da água a determinada temperatura, J.kg^{-1}
 \bar{H}_l = líquido puro, m^3
 \bar{H}_o = água na monocamada, m^3
 \bar{H}_m = água nas multicamadas, m^3
 L = calor latente molar de vaporização da água, J.kg mol^{-1}
 m = massa do corpo, kg
 m_1 = massa de água no estado natural, g
 m_2 = massa de água fria, g
 m_p = massa do feijão, g
 m = massa de água ($m_1 + m_2$), g
 P_v = pressão de vapor de água do produto, Pa
 P_{vs} = pressão de vapor de saturação a Temperatura de equilíbrio, Pa
 r = raio do capilar cilíndrico, m
 R = constante do vapor d'água, $461 \text{ J.kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 R_o = constante universal dos gases, $287 \text{ J.Kg.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 T' = temperatura absoluta, $^\circ\text{R}$
 T_{abs} = temperatura absoluta, K
 T = temperatura do produto, $^\circ\text{C}$
 T_1 = temperatura da água no estado natural, $^\circ\text{C}$
 T_2 = temperatura da água fria, $^\circ\text{C}$
 T_3 = temperatura de equilíbrio térmico entre as duas massas de água, $^\circ\text{C}$
 T_4 = temperatura do feijão, $^\circ\text{C}$
 T_5 = temperatura de equilíbrio térmico entre a massa de água e do feijão, $^\circ\text{C}$
 U = teor de umidade do produto, decimal
 U_e = umidade de equilíbrio do produto, decimal
 UR = umidade relativa, decimal
 U_m = umidade da monocamada, kg
 U_f = teor de umidade do feijão, % base seca
 V = volume de umidade na forma líquida, m^3
 V_m = volume de vapor da água adsorvida correspondente a uma camada de molécula, m^3

LETRAS GREGAS

- σ = tensão superficial da água, Pa
 α = ângulo de contato entre a água e o capilar
 μ = massa específica, kg.m^{-3}
 α = difusividade térmica, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$

COEFICIENTES

- a_1, a_2, a_3, a_4 = coeficientes que dependem da natureza do produto
 a e b = parâmetros que dependem da temperatura e da natureza do produto
 B = parâmetro variando com o gás e temperatura
 C, F e E = constantes que dependem do produto
 C = parâmetro que depende da temperatura e da natureza do produto.
 C_i = constante de integração
 C_G = constante de Guggenheim
 K = condutividade térmica, $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
 K = constante da monocamada
 m e n = parâmetros que dependem da natureza do produto
 w_b e w_c = constantes do produto que dependem de sua temperatura

CAPÍTULO 2

Curvas de secagem em camada fina

- a = volume de ar / volume de sólido seco, adimensional
 A/V = $2/R$ metade da espessura da placa plana, m^{-1} .
 A/V = $3/R$ para esfera, m^{-1}
 c_f = calor específico do líquido, $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
 c_p = calor específico do produto, $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
 C_s = calor específico do sólido $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
 c_v = calor específico do vapor, $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
 D = coeficiente de difusão líquida, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
 D_o = coeficiente de difusão, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ para $E = 0$
 D_1 = coeficiente de difusão do produto, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
 E = energia de ativação, J.kg^{-1}
 h = coeficiente de transferência de calor por convecção, $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
 h_{fg} = calor latente de vaporização da água, J.kg^{-1}
 h_m = coeficiente de transferência de massa por convecção, m.s^{-1}
 h_w = calor diferencial específico de sorção, J.kg^{-1}
 h_v = calor latente específico de vaporização, J.kg^{-1}
 \vec{J}_f = fluxo de líquido, $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
 \vec{J}_q = fluxo de calor, $\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
 $\left(\vec{J}_q\right)_m$ = fluxo de calor na ausência de transporte de massa, $\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
 \vec{J}_v = fluxo de vapor, $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
 $K = D.\pi^2 / R^2$ = constante de secagem, h^{-1}
 K_h = condutividade hidráulica, s^{-1}

K_{ij}	= coeficiente fenomenológicos ($i = j = 1,2,3$)
K_{ij}	= coeficiente combinados ($i \neq j; i, j = 1,2,3$)
K_L	= condutividade líquida, s
K_s	= constante de secagem, s^{-1}
K_T	= condutividade térmica aparente, $W.m^{-1}.K^{-1}$
K_v	= condutividade de vapor, $m^2.s^{-1}$
K_v	= condutividade de vapor, $m^2.s^{-1}$
L_v	= calor latente de vaporização do vapor d'água, $J.kg^{-1}$
M_w	= peso molecular da água, $kg.mol$
m_w	= taxa de evaporação de umidade, $kg.s^{-1}$
P	= pressão Total, $N.m^{-2}$
P_v	= pressão de vapor à temperatura ambiente, $N.m^{-2}$
P_{vs}	= pressão de vapor à temperatura do bulbo úmido, $N.m^{-2}$
q	= taxa de transferência de calor, W
R	= constante dos gases para o vapor d'água, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
R_0	= constante universal dos gases, $8314 kg.m^2.s^{-2}.kg.mol^{-1}.K^{-1}$
RU	= $(U - U_e) / (U_i - U_e)$, razão de umidade do grão ou semente, adimensional
R_v	= constante dos gases-vapor d'água ($462,69 J.Kg^{-1}.K^{-1}$)
r	= distância radial ou espessura, m
R	= raio da esfera, m
R_E	= raio da esfera equivalente, m
R_v	= constante do gás para o vapor, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
S	= área da superfície exposta, m^2
S	= área, m^2
T_{abs}	= temperatura absoluta, K
T	= temperatura, $^{\circ}C$
T_e	= temperatura de equilíbrio, $^{\circ}C$
T_{∞}	= temperatura ambiente, K
T_{bu}	= temperatura de bulbo úmido, K
t	= tempo, h ou $min.$
U	= teor de umidade do produto, decimal base seca
U_i	= teor de umidade inicial, percentual base seca
U_e	= teor de umidade de equilíbrio, percentual base seca
U_v	= umidade na forma de vapor, decimal base seca
$\frac{dU}{dt}$	= taxa de secagem
UR	= umidade relativa, decimal
x	= distancia na partícula, cm ou m
$X = (A/V). (D.t)^{1/2}$	= adimensional

LETRAS GREGAS

μ	= potencial químico, $J.kg^{-1}$
ρ_l	= massa específica do líquido, $kg.m^{-3}$
∇	= operador nabla = $\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ (em coordenadas cartesianas)
ψ	= potencial hidráulico capilar, $J.kg^{-1}$
λ_n	= raízes da equação de Bessel de ordem zero.

- ρ_s = massa específica do sólido seco, kg.m^{-3}
 θ = temperatura do produto, K
 ∇^2 = operador de Laplace em Laplaciano

COEFICIENTES

- a = coeficiente geralmente dependente da temperatura e da variedade do produto.
 A e B = constantes que dependem do produto
 c = coeficiente que depende do formato da partícula
 C_1 e C_2 = constantes que dependem de cada produto
 K = constante de secagem
 m, n e q = coeficientes que dependem do produto.

CAPÍTULO 3

Efeito da secagem a altas temperaturas por curtos períodos de tempo na qualidade fisiológica das sementes.

- FS = fator de secagem, adimensional
 FU = fator de umidade, adimensional
 U_i = teor de umidade inicial no processo de secagem, % b.s.
 U_f = teor de umidade final do processo de secagem a altas temperaturas, % b.s.

CAPÍTULO 4

Simulação e secagem de sementes de feijão em secador de leito fixo

- a = área específica, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$
 c = calor específico, $\text{J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 C_p = calor específico do produto, $\text{Kcal.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 c_w = calor específico da água, $\text{J.kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
 D_m = massa específica das sementes, $\text{kg de matéria seca} \cdot \text{m}^{-3}$
 G_a = fluxo de ar, $\text{kg de ar seco} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
 G_{ar} = fluxo de ar de secagem, $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
 G_m = fluxo de massa do ar, $\text{kg de ar seco} \cdot \text{h}^{-1}$
 h = coeficiente de transferência de calor por convecção, $\text{w.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
 h_{fg} = calor latente de vaporização, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
 Δh_{fg} = variação do calor latente de vaporização da água no produto, J.kg^{-1} .
 K = coeficiente que depende do produto
 L = altura total da camada de sementes, m.
 N = número de camadas que a secagem está sendo dividida
 PMS = perda de matéria seca, em percentagem,
 Q_m = fluxo de massa, $\text{kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
 Q' = calor sensível, J
 Q = calor de vaporização, J
 R_c = razão produto/ ar, $\text{kg de matéria seca} \cdot \text{kg}^{-1}$ de ar seco
 RU = razão de umidade, adimensional
 S = área, m^2
 t = tempo, h ou min.
 Δt = intervalo de tempo, h.

- T = temperatura, K
 T_0 = temperatura do milho, °C
 T_o = temperatura do ar de secagem, °C
 T_g = temperatura do grão, °C
 T_x = temperatura do ar a uma distância (x) da entrada do ar, °C
 T_e = temperatura de equilíbrio, °C
 t = tempo de exposição do produto, nas condições supracitadas, h ou min.
 U = teor de umidade do produto, % ou decimal base seca
 U_e = teor de umidade de equilíbrio, % ou decimal base seca
 U_i = teor de umidade inicial do grão ou semente, % ou decimal base seca
 UR = umidade relativa do ar, decimal
 URE_u = umidade relativa de equilíbrio para o produto no reumedecimento, em %
 V_{esp} = volume específico do ar, m³.kg⁻¹ ar seco
 V = velocidade, m.s⁻¹
 w = razão de umidade do ar, adimensional
 W_o = razão de umidade do ar antes da secagem, kg de água. kg⁻¹ de ar seco
 W_f = razão de umidade final do ar, kcal.kg⁻¹ de ar seco
 ΔW = intervalo entre a razão de umidade inicial e final, kcal.kg⁻¹ de ar seco.
 Y = profundidade de camada de sementes, m
 x = distância do ponto de entrada do ar até o grão, m

LETRAS GREGAS

- θ_0 = temperatura do grão antes da secagem, °C
 θ = temperatura das sementes, K
 ε = porosidade da massa de sementes, decimal
 ρ = massa específica, kg.m⁻³
 ρ_p = massa específica do produto, kg.m⁻³

COEFICIENTES

- A, B = constantes que dependem do produto
 E, F = constantes que dependem do produto
 K, C e N = constantes que dependem do produto
 M, N = constantes que dependem do produto
 R_r = coeficiente que depende do produto

CAPÍTULO 5

Armazenabilidade das sementes de Feijão

- T_s = temperatura de secagem, °C
 T_a = temperatura de armazenagem, °C
 t_a = tempo de armazenagem, meses
 U_i = umidade inicial do produto antes da secagem, % base seca
 V_i = Vigor inicial das sementes, percentual
 G_i = Germinação inicial da sementes, percentual

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Desenho esquemático de um silo-secador	2
FIGURA 2	Esquema demonstrativo do processo de secagem de semente no início e após um determinado intervalo de tempo.....	4
FIGURA 1.1	Métodos de determinação da esfericidade definida para grãos...	25
FIGURA 1.2	Recipiente hermético utilizado na determinação da umidade de equilíbrio.....	27
FIGURA 1.3	Calorímetro.....	30
FIGURA 1.4	Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de GAB - curvas de dessecção.....	35
FIGURA 1.5	Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de HENDERSON- MODIFICADA - curvas de dessecção.....	36
FIGURA 1.6	Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de HENDERSON- MODIFICADA* - curvas de dessecção.....	36
FIGURA 1.7	Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de ROA - curvas de dessecção.....	37
FIGURA 1.8	Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de GAB - curvas de dessecção.....	37
FIGURA 1.9	Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de HENDERSON- MODIFICADA - curvas de dessecção.....	38
FIGURA 1.10	Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de HENDERSON- MODIFICADA* - curvas de dessecção.....	38

FIGURA 1.11	Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de ROA - curvas de sorção.....	39
FIGURA 1.12	Curvas de dessorção e sorção do feijão “carioca” e visualização da histerese.....	40
FIGURA 1.13	Retas de “Othmer” para determinação do calor latente de vaporização do feijão “carioca”.....	42
FIGURA 1.14	Equação do calor latente de vaporização do feijão “carioca” obtida por regressão não linear - Valores observados vs. valores calculados.....	44
FIGURA 1.15	Curva do calor específico do feijão “carioca” em função do seu teor de umidade.....	45
FIGURA 1.16	Curvas do comprimento, largura, espessura e diâmetro da esfera equivalente das sementes de feijão “carioca” em função do seu teor de umidade.....	46
FIGURA 2.1	Comportamento da secagem de um produto biológico(ab = período de secagem à taxa constante, bc = período de secagem a taxa decrescente).....	54
FIGURA 2.2	Curvas típicas de secagem de grãos e sementes.....	55
FIGURA 2.3	Secador experimental utilizado para a secagem de sementes de feijão “carioca”.....	71
FIGURA 2.4	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada da teoria de difusão de líquido utilizando o primeiro termo da série , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 25% b.s.....	78
FIGURA 2.5	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada da teoria de difusão de líquido utilizando o primeiro termo da série , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 30% b.s.....	78
FIGURA 2.6	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada da teoria de difusão de líquido utilizando o primeiro termo da série , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 35% b.s.....	79
FIGURA 2.7	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada da teoria de difusão de líquido utilizando o primeiro termo da série , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 40% b.s.....	79

FIGURA 2.8	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada da teoria de difusão de líquido utilizando o primeiro termo da série , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 45% b.s.....	80
FIGURA 2.9	Superfície de resposta do parâmetro k da equação simplificada baseada na teoria de difusão de líquido utilizando o primeiro termo da série , obtidas por regressão não linear.....	80
FIGURA 2.10	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada baseada na teoria de difusão delíquido utilizando dois termo da série , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 25% b.s....	81
FIGURA 2.11	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada baseada na teoria de difusão delíquido utilizando dois termo da série , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 30% b.s....	81
FIGURA 2.12	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada baseada na teoria de difusão delíquido utilizando dois termo da série , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 35% b.s....	82
FIGURA 2.13	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada baseada na teoria de difusão delíquido utilizando dois termo da série , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 40% b.s....	82
FIGURA 2.14	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada baseada na teoria de difusão delíquido utilizando dois termo da série , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 45% b.s....	83
FIGURA 2.15	Superfície de resposta do parâmetro k' da equação simplificada baseada na teoria de difusão de líquido utilizando dois termos da série , obtida por regressão não linear.....	83
FIGURA 2.16	Superfície de resposta do parâmetro k'' da equação simplificada baseada na teoria de difusão de líquido utilizando dois termos da série , obtida por regressão não linear.....	84
FIGURA 2.17	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Page , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 25% b.s.....	85
FIGURA 2.18	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Page , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 30% b.s.....	85

FIGURA 2.19	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculados pela equação de Page , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 35% b.s.....	86
FIGURA 2.20	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Page , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 40% b.s.....	86
FIGURA 2.21	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Page , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 45% b.s.....	87
FIGURA 2.22	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Thompson , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 25% b.s.....	87
FIGURA 2.23	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Thompson , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 30% b.s.....	88
FIGURA 2.24	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Thompson , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 35% b.s.....	88
FIGURA 2.25	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Thompson , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 40% b.s.....	89
FIGURA 2.26	Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Thompson , obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 45% b.s.....	89
FIGURA 2.27	Superfície de resposta do coeficiente “ k ” da equação de Page em função do teor de umidade inicial e da temperatura de secagem, obtidas por regressão não linear.....	90
FIGURA 2.28	Superfície de resposta do coeficiente “ n ” da equação de Page em função do teor de umidade inicial e da temperatura de secagem, obtidas por regressão não linear.....	90
FIGURA 2.29	Superfície de resposta do coeficiente “ A ” da equação de Thompson em função do teor de umidade inicial e da temperatura de secagem, obtidas por regressão não linear.....	91
FIGURA 2.30	Superfície de resposta do coeficiente “ B ” da equação de Thompson em função do teor de umidade inicial e da temperatura de secagem, obtidas por regressão não linear.....	91
FIGURA 2.31	Superfície de resposta do coeficiente de difusão de líquido para sementes de feijão “carioca” em função da temperatura de secagem e do teor de umidade inicial.....	93

FIGURA 2.32	Efeito do teor de umidade inicial sobre a taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para a temperatura de 30 °C.....	94
FIGURA 2.33	Efeito do teor de umidade inicial sobre a taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para a temperatura de 40 °C.....	94
FIGURA 2.34	Efeito do teor de umidade inicial sobre a taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para a temperatura de 50 °C.....	95
FIGURA 2.35	Efeito do teor de umidade inicial sobre a taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para a temperatura de 60 °C.....	95
FIGURA 2.36	Efeito do teor de umidade inicial sobre a taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para a temperatura de 70 °C.....	96
FIGURA 2.37	Efeito do teor de umidade inicial sobre a taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para a temperatura de 80 °C.....	96
FIGURA 2.38	Efeito da velocidade do ar na taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para as temperaturas de 30 a 80 °C e teor de umidade inicial do produto de 25, 35 e 45% b.s. - Parâmetro “k” da equação de Page.....	97
FIGURA 2.39	Efeito da velocidade do ar na taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para as temperaturas de 30 a 80 °C e teor de umidade inicial do produto de 25, 35 e 45% b.s. - Parâmetro “n” da equação de Page.....	98
FIGURA 2.40	Efeito da umidade relativa do ar de 20 a 50% na taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C e teor de umidade inicial do produto de 25 % b.s.....	100
FIGURA 2.41	Efeito da umidade relativa do ar de 20 a 50% na taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C e teor de umidade inicial do produto de 35 % b.s.....	100
FIGURA 2.42	Efeito da umidade relativa do ar de 20 a 50% na taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C e teor de umidade inicial do produto de 45 % b.s.....	101
FIGURA 2.43	Coefficiente “k” da equação de Page em função da umidade relativa do ar, temperatura e teor de umidade inicial das sementes de feijão “carioca”.....	101
FIGURA 2.44	Visão espacial do coeficiente “k” da Equação de Page em função da umidade relativa do ar de 20 a 50% , temperaturas de 30, 40 e 50 °C e teor de umidade inicial do produto de 25, 35 e 45% b.s.....	102

FIGURA 2.45	Visão espacial da Superfície de resposta correspondente ao coeficiente “k” da Equação de Page em função da umidade relativa do ar de 20 a 50% , temperaturas de 30, 40 e 50 °C e teor de umidade inicial do produto de 25, 35 e 45 % b.s.....	103
FIGURA 3.1	Desenho esquemático do gráfico psicrométrico mostrando o processo de aquecimento do ar ambiente.....	110
FIGURA 3.2	Bandeja de plástico utilizada para determinação da germinação e vigor das sementes de feijão.....	116
FIGURA 3.3	Curvas de secagem de sementes de feijão às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C secas a partir do teor de umidade inicial de 45 % b.s. até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15 % b.s., com complementar secagem a 40 °C até 13,5 % b.s.....	118
FIGURA 3.4	Curvas de secagem de sementes de feijão às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C secas a partir do teor de umidade inicial de 35 % b.s. até os teores de umidade de 30, 25, 20 e 15 % b.s., com complementar secagem a 40 °C até 13,5 % b.s.....	118
FIGURA 3.5	Curvas de secagem das sementes de feijão às temperaturas de 45, 50 60 e 70 °C do teor de umidade inicial de 25 % b.s. até os teores de umidade de 20 e 15 % b.s., com complementar secagem a 40 °C até 13,5 % b. s.....	119
FIGURA 3.6	Curvas de secagem de sementes de feijão à temperatura de 45 e 50 °C secas a partir do teor de umidade inicial de 25 % b.s. até os teores de umidade de 20 e 15% b.s., com secagem complementar a 40 °C até 13,5 % b.s.....	119
FIGURA 3.7	Tempo de residência das sementes de feijão secas em camada fina a altas temperaturas por curtos períodos de tempo e secagem complementar a 40 °C até 13,5 % b.s.....	136
FIGURA 3.8	Tempo de residência das sementes de feijão, secas a altas temperaturas em camada fina, por curtos períodos de tempo, correlacionada com a temperatura de secagem e o fator de umidade.....	138
FIGURA 3.9	Germinação das sementes de feijão, secas a altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada fina, correlacionada com o tempo de residência e o fator de secagem.....	138
FIGURA 3.10	Vigor das sementes de feijão, secas a altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada fina, correlacionada com o tempo de residência e o fator de secagem.	139
FIGURA 4.1	Representação esquemática da secagem de uma camada delgada..	151
FIGURA 4.2	Volume elementar de uma camada de sementes.....	157

FIGURA 4.3	Secador experimental em camada estacionária utilizado no experimento.....	161
FIGURA 4.4	Aparelho de medição de temperatura de 10 canais Electro-Term MS-800.....	162
FIGURA 4.5	Higrômetros de espada para determinação da umidade relativa do ar de secagem nas 4 seções do secador de camada estacionária.....	163
FIGURA 4.6	Detalhes internos da câmara e secagem do secador de camada estacionária.....	163
FIGURA 4.7	Pontos de retirada das amostras de milho no secador para acompanhamento da perda de peso.....	164
FIGURA 4.8	Detalhe da balança utilizada para acompanhamento da perda de peso das sementes de feijão durante a secagem.....	164
FIGURA 4.9	Tela de abertura para escolha do produto a ser simulado.....	166
FIGURA 4.10	Tela que permite selecionar as determinações das propriedades psicrométricas do ar ou os tipos de simulação de secagem.....	167
FIGURA 4.11	Tela que permite escolher o número de camadas para simulação..	167
FIGURA 4.12	Tela dos dados de entrada para a simulação de secagem de feijão em camada estacionária pelo modelo de Thompson.....	168
FIGURA 4.13	Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.....	170
FIGURA 4.14	Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.....	171
FIGURA 4.15	Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 25% b.s.....	171
FIGURA 4.16	Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 50 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.....	172
FIGURA 4.17	Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 50 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.....	172
FIGURA 4.18	Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 50 °C e teor de umidade inicial de 25% b.s.....	173

FIGURA 4.19	Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 60 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.....	173
FIGURA 4.20	Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 60 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.....	174
FIGURA 4.21	Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 60 °C e teor de umidade inicial de 25% b.s.....	174
FIGURA 4.22	Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 70 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.....	175
FIGURA 4.23	Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 70 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.....	175
FIGURA 4.24	Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 70 °C e teor de umidade inicial de 25% b.s.....	176
FIGURA 4.25	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.	177
FIGURA 4.26	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 40°C e teor de umidade inicial de 35% b.s..	178
FIGURA 4.27	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 40°C e teor de umidade inicial de 25% b.s..	178
FIGURA 4.28	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 50°C e teor de umidade inicial de 45% b.s..	179
FIGURA 4.29	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 50°C e teor de umidade inicial de 35% b.s..	179
FIGURA 4.30	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 50°C e teor de umidade inicial de 25% b.s..	180
FIGURA 4.31	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 60°C e teor de umidade inicial de 45% b.s..	180

FIGURA 4.32	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 60°C e teor de umidade inicial de 35% b.s..	181
FIGURA 4.33	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 60°C e teor de umidade inicial de 25% b.s..	181
FIGURA 4.34	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 70°C e teor de umidade inicial de 45% b.s..	182
FIGURA 4.35	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 70°C e teor de umidade inicial de 35% b.s..	182
FIGURA 4.36	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 70°C e teor de umidade inicial de 25% b.s..	183
FIGURA 5.1	Fases do desenvolvimento de uma plântula de feijão.....	192
FIGURA 5.2	Sementes de feijão “carioca” germinadas oito dias depois da semeadura	192
FIGURA 5.3	Germinação das sementes de feijão “carioca” secas às temperaturas de 40 e 50°C, e a 60 e 70°C por curto período de tempo e secagem complementar a 40°C, armazenadas pelo período de 12 meses às temperaturas de 10, 20 e 30°C.....	214
FIGURA 5.3	Vigor das sementes de feijão “carioca” secas às temperaturas de 40 e 50°C, e a 60 e 70°C por curto período de tempo e secagem complementar a 40°C, armazenadas pelo período de 12 meses às temperaturas de 10, 20 e 30°C.....	214

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1	Coeficientes das equações de Henderson modificada e Chung-Pfost para o feijão comestível.....	18
TABELA 1.2	Coeficientes da equação de Roa para feijão e feijão preto.....	19
TABELA 1.3	Diferentes concentrações de ácido sulfúrico para estabelecer no interior dos recipientes as umidades relativas do ar para as temperaturas entre 10 e 60 °C.....	27
TABELA 1.4	Número médio de dias decorridos para alcançar o equilíbrio higroscópico do feijão para diferentes temperaturas.....	32
TABELA 1.5	Teores de umidade de equilíbrio higroscópico de sementes de feijão “carioca”, obtidos por dessorção.....	32
TABELA 1.6	Teores de umidade de equilíbrio higroscópico de sementes de feijão “carioca”, obtidos por sorção.....	33
TABELA 1.7	Coeficientes da equação de Gab para as isotermas de dessorção e sorção obtidos por regressão não linear para cada temperatura..	34
TABELA 1.8	Equações de Regressão (25 tipos) aplicadas aos coeficientes da equação de Gab para as isotermas de dessorção e sorção - Programa - CURVEFIT.....	35
TABELA 1.9	Diferença entre os teores de umidade de equilíbrio obtidos pelos fenômenos de dessorção e sorção.....	39
TABELA 1.10	Umidades relativas de equilíbrio obtidas pela equação de Henderson modificada por este autor para as isotermas de dessorção do feijão “carioca” em função dos teores de umidade e temperaturas pré-estabelecidas.....	41
TABELA 1.11	Pressão de vapor da água do feijão “carioca” correspondente às umidades relativas de equilíbrio obtidas através da equação de Henderson modificada* para as isotermas de dessorção para os teores de umidade e temperaturas pré-estabelecidas.....	41
TABELA 1.12	Logaritmo neperiano da pressão de vapor da água do feijão “carioca” correspondente às umidades relativas de equilíbrio obtidas através da equação de Henderson modificada* para as isotermas de dessorção para s teores de umidade e temperaturas pré-estabelecidas.....	42

TABELA 1.13	Calor latente de vaporização da água das sementes de feijão “carioca” em função da temperatura e do teor de umidade equilíbrio pré-estabelecidos.....	43
TABELA 1.14	Calor específico do feijão “carioca” em função do seu teor de umidade.....	44
TABELA 1.15	Dados experimentais das dimensões médias e do diâmetro da esfera equivalente das sementes de feijão “carioca” em função do seu teor de umidade.....	46
TABELA 2.1	Coeficiente da equação de difusão de líquido simplificada, usando um termo da série obtidos por meio de regressão não linear para cada temperatura e teor de umidade inicial estudados.....	73
TABELA 2.2	Coeficientes da equação de difusão de líquido simplificada usando dois termos da série obtidos por meio de regressão não linear para cada temperatura e teor de umidade inicial estudados	74
TABELA 2.3	Coeficientes da equação de Page obtida por regressão não linear para cada temperatura e teor de umidade inicial estudada.....	75
TABELA 2.4	Coeficientes da equação de Thompson obtida por regressão não linear para cada temperatura e teor de umidade inicial estudada...	76
TABELA 2.5	Coeficientes da equação de difusão de líquido simplificada usando dois termos da série obtidos por meio de regressão não linear para cada temperatura e teor de umidade inicial estudada, usando dois coeficientes fixos.....	77
TABELA 2.6	Coeficientes de difusão de líquido das sementes de feijão “carioca” para as condições de secagem e teores de umidade iniciais estudados.....	92
TABELA 2.7	Coeficiente “ k ” da equação de Page em função da umidade relativa do ar, temperatura e teor de umidade inicial.....	99
TABELA 3.1	Porcentagem de perdas em função do período entre a maturação e a colheita do milho.....	108
TABELA 3.2	Testes de secagem conduzidos para identificar a partir de que ponto as altas temperaturas podem ser usadas no processo de secagem, sem que a qualidade fisiológica das sementes seja afetada - Teor de umidade Inicial das sementes de 45 % base seca.....	114
TABELA 3.3	Testes de secagem conduzidos para identificar a partir de que ponto as altas temperaturas podem ser usadas no processo de secagem, sem que a qualidade fisiológica das sementes seja afetada - Teor de umidade Inicial das sementes de 35 % base seca.....	115

TABELA 3.4	Testes de secagem conduzidos para identificar a partir de que ponto as altas temperaturas podem ser usadas no processo de secagem, sem que a qualidade fisiológica das sementes seja afetada - Teor de umidade Inicial das sementes de 25 % base seca.....	115
TABELA 3.5	Tempo de residência das sementes no secador, para identificar o ponto crítico onde a qualidade fisiológica das sementes é afetada pela secagem a altas temperaturas - Teor de umidade Inicial das sementes de 45, 35 e 25 % b.s.....	120
TABELA 3.6	Valores médios da germinação de sementes de feijão “carioca”, secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 45% b.s. até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15% e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.....	121
TABELA 3.7	Análise de variância da germinação de sementes de feijão “carioca”, secas às diferentes temperaturas e condições de secagem - Teor de umidade inicial de 45 % b.s.....	121
TABELA 3.8	Valores médios da germinação de sementes de feijão para os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 45 % b.s.....	122
TABELA 3.9	Valores médios da germinação de sementes de feijão “carioca”, para a interação entre os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 45 % b.s.....	123
TABELA 3.10	Valores médios da germinação de sementes de feijão “carioca”, secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 35% b.s. até os teores de umidade de 30, 25, 20 e 15% b.s. e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.....	124
TABELA 3.11	Análise de variância da germinação de sementes de feijão “carioca, secas às diferentes temperaturas e condições de secagem - Teor de umidade inicial de 35 % b.s. - Teor de umidade inicial de 35 % b.s.....	124
TABELA 3.12	Valores médios de germinação de sementes de feijão para os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 35 % base seca.....	125
TABELA 3.13	Valores médios da germinação de sementes de feijão “carioca”, para a interação entre os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 35 % base seca.....	125

TABELA 3.14	Valores médios da germinação de sementes de feijão “carioca, secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 25% base seca até os teores de umidade de 20 e 15% e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % base seca.....	126
TABELA 3.15	Análise de variância da germinação de sementes de feijão “carioca, secas às diferentes temperaturas e condições de secagem - Teor de umidade inicial de 35 % base seca - Teor de umidade inicial de 25 % base seca.....	126
TABELA 3.16	Valores médios de germinação de sementes de feijão para os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 25 % base seca.....	127
TABELA 3.17	Valores médios da germinação de sementes de feijão “carioca”, para a interação entre os fatores temperaturas e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 25 % base seca.....	128
TABELA 3.18	Valores médios do vigor de sementes de feijão “carioca, secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 45% b.s. até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15% e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.....	128
TABELA 3.19	Análise de variância do vigor de sementes de feijão “carioca, secas às diferentes temperaturas e condições de secagem - Teor de umidade inicial de 45% b.s.....	129
TABELA 3.20	Valores médios do vigor de sementes de feijão para os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 45 % b.s.....	129
TABELA 3.21	Valores médios do vigor de sementes de feijão “carioca”, para a interação entre os fatores temperaturas e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 45 % b.s.....	130
TABELA 3.22	Valores médios do vigor de sementes de feijão “carioca”, secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 35% b.s. até os teores de umidade de 30, 25, 20 e 15% b.s. e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.....	131
TABELA 3.23	Análise de variância do vigor das sementes de feijão “carioca, secas às diferentes temperaturas e condições de secagem - Teor de umidade inicial de.....	131

TABELA 3.24	Valores médios do vigor de sementes de feijão para os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 35 % base seca.....	132
TABELA 3.25	Valores médios do vigor de sementes de feijão “carioca”, para a interação entre os fatores temperaturas e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 35 % base seca.....	132
TABELA 3.26	Valores médios do vigor de sementes de feijão “carioca, secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 25% base seca até os teores de umidade de 20 e 15% e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % base seca.....	133
TABELA 3.27	Análise de variância do vigor das sementes de feijão “carioca, secas às diferentes temperaturas e condições de secagem - Teor de umidade inicial de 25 % base seca.....	133
TABELA 3.28	Valores médios do vigor de sementes de feijão para os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 25 % base seca.....	134
TABELA 3.29	Valores médios do vigor de sementes de feijão “carioca”, para a interação entre os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 25 % base seca.....	135
TABELA 3.30	Germinação das sementes de feijão “carioca” em função do tempo de residência das sementes no secador e das condições de secagem.....	137
TABELA 3.31	Tempo de residência que as sementes de feijão podem ficar expostas a altas temperaturas, sem que a sua germinação e vigor sejam significativamente afetados, e correspondente teor de umidade inicial e final das sementes.....	140
TABELA 4.1	Condições de secagem dos experimentos realizados em um secador de camada estacionária.....	169
TABELA 4.2	Germinação das sementes de feijão, para cada espessura de camada do secador, depois da secagem às temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C a partir dos teores de umidade inicial de 45, 35, e 25 % b.s. até um teor médio de 13,5 % b.s.....	184
TABELA 4.3	Vigor das sementes de feijão, para cada espessura de camada do secador, depois da secagem as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C a partir dos teores de umidade inicial de 45, 35, e 25% b.s. até um teor médio de 13,5 % b.s.....	185

TABELA 4.4	Germinação e vigor das sementes de feijão, para cada espessura de camada do secador depois das secagens às temperaturas de 70 °C por uma hora e teor de umidade inicial de 25% b.s., 60 °C por 1,5 horas e 2,5 horas e teores de umidade inicial, respectivamente, de 35 e 25 % b.s., com secagem complementar a 40 °C até um teor de umidade médio de 13,5 % b.s.....	187
TABELA 5.1	Dados médios de germinação das sementes de feijão “carioca” armazenadas por 12 meses depois de ter sido submetidos a diversos tratamentos de secagem.....	199
TABELA 5.2	Análise de variância dos dados de germinação das sementes de feijão submetidas a diferentes tratamentos de secagem e armazenadas pelo período de 12 meses a diferentes condições controladas de temperatura.....	200
TABELA 5.3	Efeito dos fatores, temperatura, tratamentos de secagem e período de armazenagem nos valores médios de germinação das sementes de feijão armazenadas.....	200
TABELA 5.4	Comparações entre os valores médios da germinação das sementes de feijão para a interação entre temperatura de armazenamento e tratamentos de secagem das sementes.....	202
TABELA 5.5	Comparações entre os valores médios de germinação das sementes de feijão para a interação entre temperatura e período de armazenamento.....	202
TABELA 5.6	Comparações entre os valores médios de germinação das sementes de feijão para a interação entre os tratamentos de secagem e período de armazenamento.....	203
TABELA 5.7	Dados médios do vigor de sementes de feijão “carioca” armazenados por 12 meses depois de ter sido submetidas a diversos tratamentos de secagem.....	204
TABELA 5.8	Análise de variância dos dados de vigor das sementes de feijão submetidas a diferentes tratamentos de secagem e armazenadas pelo período de 12 meses a diferentes condições controladas de temperatura.....	205
TABELA 5.9	Efeito do fatores tratamento de secagem, temperatura e período de armazenagem nos valores médios de vigor das sementes de feijão armazenadas.....	205
TABELA 5.10	Comparações entre os valores médios de vigor das sementes de feijão para a interação entre temperatura de armazenamento e tratamentos de secagem das sementes.....	207

TABELA 5.11	Comparações entre os valores médios de vigor das sementes de feijão para a interação entre temperatura e período de armazenamento.....	207
TABELA 5.12	Comparações entre os valores médios de vigor das sementes de feijão para a interação entre os tratamentos de secagem e período de armazenamento.....	208
TABELA 5.13	Dados médios de teor de umidade (% base úmida) das sementes de feijão “carioca” armazenados por 12 meses depois de terem sido submetidas a diversos tratamentos de secagem.....	210
TABELA 5.14	Dados médios de massa de 1000 sementes de feijão “carioca” armazenadas por 12 meses depois de terem sido submetidas a diversos tratamentos de secagem.....	211
TABELA 5.15	Dados médios de massa específica aparente das sementes de feijão “carioca” armazenadas por 12 meses depois de terem sido submetidas a diversos tratamentos de secagem.....	212
TABELA 5.16	- Equações para estimar a diminuição da germinação e vigor das sementes de feijão “carioca” secas às temperaturas de 40 e 50 °C, e a 60 e 70 °C por curto período de tempo e secagem complementar a 40 °C, armazenada pelo período de 12 meses às temperaturas de 10, 20 e 30 °C.....	213

RESUMO

No início da secagem a semente requer energia para evaporar a água e a ação da temperatura elevada sobre a qualidade fisiológica das sementes deve ser menor. Com o decorrer da secagem essa quantidade de água vai ficando menos disponível na periferia da semente, provocando um aumento de temperatura no seu tegumento. Assim, uma investigação mais profunda se faz necessária no sentido de determinar-se a partir de que ponto a semente começa a ser afetada na sua qualidade fisiológica pela ação da secagem as altas temperaturas ($> 45^{\circ}\text{C}$). Uma vez identificado este ponto é possível que a secagem possa ser prosseguida com temperaturas menores, no entanto, o maior risco de diminuição da qualidade fisiológica devido a altas umidades já foi eliminado. O presente trabalho baseado neste princípio teve como principal objetivo identificar até que ponto as sementes de feijão variedade "carioca" podem ser secas a altas temperaturas sem que a sua qualidade seja afetada. Como, após a secagem, pode-se levar para o armazenamento efeitos latentes dessa secagem feita a altas temperaturas, que inicialmente não são identificados, este trabalho teve também como objetivo verificar se a secagem conduzida a altas temperaturas por determinados períodos de tempo de modo a não afetar a qualidade fisiológica das sementes, aparecem durante o seu armazenamento.

Portanto, para melhor organização desta pesquisa este trabalho foi dividido em 5 Capítulos: No **primeiro (1^o) Capítulo** foram estudadas as **propriedades físicas das sementes de feijão** necessárias à secagem e à simulação determinando-se as curvas de sorção e des-sorção, calor latente de vaporização, calor específico e forma e tamanho do feijão; no **segundo (2^o) Capítulo** o estudo refere-se às curvas de **secagem em camada delgada** levando-se em consideração a influência da temperatura, teor de umidade inicial, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, para tanto foram testadas as equações de difusão de líquido simplificada com um e dois termos da série e as propostas por Page e Thompson. O **terceiro (3^o) Capítulo** é dedicado a estudar o **efeito da secagem a altas temperaturas por curtos períodos de tempo na qualidade fisiológica das sementes de feijão** com a finalidade de identificar até que teor de umidade as sementes podem ser secas a altas temperaturas sem que a sua qualidade fisiológica seja afetada e qual é o tempo correspondente de residência no secador. O **quarto (4^o) Capítulo** é destinado ao estudo da **simulação de secagem das sementes de feijão** utilizando-se o modelo de Thompson em secador de leito fixo com base nas equações obtidas no primeiro e segundo Capítulos e levando-se em consideração as situações favoráveis obtidas no terceiro Capítulo. No **quinto (5^o) Capítulo** foi estudada a **armazenabilidade das sementes de feijão** por 12 meses quando secas a altas temperaturas por curtos períodos de tempo e secagem complementar a 40°C com a finalidade de determinar se algum efeito latente da secagem a altas temperaturas por curtos período de tempo foi levado para o período de armazenagem dessas sementes. Diante dos resultados obtidos pode-se concluir que: **a)** Para as faixas de temperaturas de 10 a 60°C e umidades relativas de 10 a 90% , o teor de umidade de equilíbrio é maior quando obtida pelo processo de dessorção do que pelo processo de sorção o que caracteriza a existência do fenômeno de histerese nas sementes de feijão "carioca"; **b)** Das equações estudadas para representar as curvas de dessorção e sorção das sementes de feijão, a que apresenta o melhor coeficiente de determinação é a de Roa, sendo que, para as isotermas de dessorção, a equação de Henderson modificada por este autor, pode expressar satisfatoriamente os dados experimentais; **c)** O calor latente de vaporização das sementes de feijão cresce com a diminuição do teor de umidade do produto de 35 para 5% base seca e com o aumento da temperatura de 10 para 60°C , sendo esta variação de $577,46$ a $699,94$ kcal. kg^{-1} ; **d)** O calor

específico do feijão em estudo varia linearmente de 1026,43 a 1458,52 J.kg⁻¹.°C⁻¹ para um aumento do teor de umidade de 5 a 45 % base seca; e) O raio da esfera equivalente das sementes de feijão variam linearmente com o aumento do seu teor de umidade de 10 para 45 % base úmida e a equação é expressa por: $r = 0,333985 + 0,00183.U_i$; f) A equação proposta por Page é a que melhor representa os dados experimentais quando se compara esta equação com as equações de difusão líquida simplificada utilizando-se um e dois termos da série e a proposta por Thompson; g) Não foi verificado neste trabalho, efeito da velocidade do ar de 0,2 a 0,8 m.s⁻¹ na taxa de secagem das sementes de feijão; h) Na taxa de secagem determinada pela equação de Page apenas o coeficiente K expressa sua dependência em função da umidade relativa do ar, sendo a equação genérica dada por:

$$RU = [(-0,20348.U_i^{0,366578} . T^{0,7911066}) * (0,002514 - 1,9568.10^{-5} . UR + 1,83637.10^{-4} (UR)^2)] . t^{0,605977};$$

i) A secagem das sementes de feijão pode ser realizada a altas temperaturas desde que os tempos de residência no secador sejam obedecidos para cada temperatura e teor de umidade inicial; j) À temperatura de 45 °C e teor de umidade inicial das sementes de 35 e 25 % b.s., a secagem pode ser realizada até o teor de umidade final de armazenagem que as sementes não serão afetadas na sua qualidade fisiológica. Para o teor de umidade inicial de 45 % b.s. o tempo de residência no secador, para que a qualidade fisiológica das sementes não seja afetada, é de 360 minutos o que corresponde uma secagem até o teor de umidade de 17% b.s. O restante da secagem deve ser feita a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.; k) À temperatura de 50 °C e teor de umidade inicial das sementes de 25 % b.s. a secagem pode ser realizada até o teor de umidade final de armazenagem que as sementes não serão afetadas na sua qualidade fisiológica. Para os teores de umidade inicial de 45 e 35% b.s. os tempos de residência no secador, para que a qualidade fisiológica das sementes não seja afetada, são de 87 e 60 minutos o que corresponde uma secagem de 45% até 21,5% b.s. e de 35% até o teor de umidade de 28,8% b.s., respectivamente; l) À temperatura de 60 °C as secagens das sementes podem ser realizadas dos teores de umidade inicial de 25, 35 e 45% b.s. até os teores de umidade final de 17, 24,5 e 32,5% b.s., respectivamente, que as sementes não serão afetadas na sua qualidade fisiológica. Estas secagens correspondem respectivamente a um tempo de residência no secador de 70, 40 e 30 minutos; m) À temperatura de 70 °C as secagens das sementes podem ser realizadas dos teores de umidade inicial de 25, 35 e 45% b.s. até os teores de umidade final de 19,5, 27,5 e 37,5% b.s., respectivamente que as sementes não serão afetadas na sua qualidade fisiológica. Estas secagens correspondem respectivamente a um tempo de residência no secador de 25, 15 e 10 minutos; n) A compatibilidade entre os dados experimentais e os simulados validam o modelo de Thompson para a secagem de sementes em camada espessa dentro de uma faixa de temperatura de 40 a 70 °C e teor de umidade inicial das sementes de 45 a 25 % base seca, sendo que as equações de dessecamento, calor latente de vaporização, calor específico e de secagem em camada delgada específicas para este produto, e determinadas neste trabalho, são as principais responsáveis por esta validação; o) As secagens de sementes de feijão em camada espessa, podem ser feitas a temperatura de 70 °C por uma hora (1 h) e teor de umidade inicial de 25% b.s.; ou a 60 °C por uma hora e meia (1,5 h.) e teor de umidade inicial de 25 % b.s. ou ainda a 60 °C por duas horas e meia (2,5 h.) e teor de umidade inicial de 35% b.s. com complementar secagem a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s., que as sementes não serão afetadas na sua qualidade fisiológica logo após a secagem; p) As sementes de feijão secas as temperaturas de 40 e 50 °C não apresentam diferenças significativas entre si na sua qualidade fisiológica, quando armazenadas as temperaturas de 10, 20 e 30 °C; q) Secagem das sementes de feijão a 70 °C por uma hora (1 h) e secagem complementar a 40 °C provoca um efeito degenerativo latente e este aparece com mais evidência quando as sementes são armazenadas a 30 °C; na armazenagem a 20 °C este efeito aparece moderadamente e praticamente não se evidencia quando as sementes são armazenadas a 10 °C.

PALAVRAS CHAVE: sementes, feijão, secagem, altas temperaturas, armazenabilidade.

SUMMARY

At the beginning of the drying the seed requires energy to evaporate water particles and the action of the high temperature on the physiological quality of the seeds must be smaller. Throughout the drying this amount of water is less available in the periphery of the seed and this causes an increase in temperature in its tegument. Therefore, a deeper investigation is necessary to determine from what point the seed starts to be affected in its physiological quality by the drying action at high temperatures ($> 45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Once this point is identified, it is possible to go on with the drying at lower temperatures. However, the greater risk due to the reduction of the physiological quality has already been eliminated. The main objective of this work, which is based on this principle, is to identify to what extent the "carioca" bean seeds can be dried at high temperatures without its quality being affected. An additional objective of this work was to check if drying conducted at high temperatures for determined periods of time can take latent degenerative effects to the storing period.

Therefore, for a better organization of this research, this work has been divided into 5 Chapters: In the **first (1st.) Chapter** the **bean seeds physical properties** required for drying and the simulation determining the sorption and desorption curves, vaporization latent heat, specific heat and shape and size of the beans, in the **second (2nd.) Chapter** the study refers to the curves of **drying in thin layers**, taking the influence of temperature into consideration, initial moisture content, relative humidity and drying air velocity. To do so, the liquid diffusion equations with one or two terms of the series and those proposed by Page and Thompson were tested. The **third (3rd.) Chapter** is dedicated to the study of the **effect of drying at high temperatures for short periods of time on the physiological quality of the bean seeds** in order to identify up to what moisture content seeds can be dried at high temperatures without affecting their physiological quality and what is the corresponding time of residence in the drier. The **fourth (4th.) Chapter** is dedicated to study the **simulation of bean seeds drying** using the Thompson model on a fixed bed drier based on equations obtained in the first and second Chapters and taking into consideration the favorable situations obtained in the third Chapter. On the **fifth (5th.) Chapter** the **storability of bean seeds** was studied for 12 months when dried at high temperatures for short periods of time and complementary drying at $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ in order to determine if any latent effects of drying at high temperatures for short periods of time was taken to the period of storage of these seeds. Considering the results obtained, we can conclude that: **a)** For the temperature ranges from 10 to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ and relative humidities from 10 to 90% , the equilibrium moisture content is greater when obtained by the desorption process than by the sorption process, which characterizes the existence of the phenomenon of hysteresis in the "carioca" bean seeds; **b)** Out of the equations studied to represent the desorption and sorption curves of bean seeds, the one that presents the best determination coefficient is the Roa equation and, for the desorption isotherms, Henderson equation modified by this author, can express satisfactorily the experimental data; **c)** The vaporization latent heat of bean seeds increases with the decrease in the moisture content of the product from 35 to 5% dry basis and with the increase in temperature from 10 to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. This variation is from 577.46 to $699.94\text{ kcal. kg}^{-1}$; **d)** the specific heat of the beans under study varies linearly from 1026.43 to $1458.52\text{ J.kg}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ for an increase in moisture content from 5 to 45% dry basis; **e)** the radius of the equivalent sphere of the bean seeds varies linearly with the increase of their moisture content from 10 to 45% wet basis and the equation is expressed by: $r = 0.333985 + 0.00183.U_i$; **f)** The equation proposed by Page is the one that best represents the experimental

data when comparing this equation to the simplified liquid diffusion equations using one and two terms of the series and the one proposed by Thompson; **g**) In this work we did not verify the effect of the air velocity from 0.2 to 0.8 m.s⁻¹ on the drying rate of the bean seeds; **h**) In the drying rate determined by Page equation only the coefficient K expresses its dependence to the air relative humidity, and the generic equation is given by:

$$RU=[(-0,20348.U_i^{0,366578}.T^{0,7911066})*(0,002514-1,9568.10^{-5}.UR+1,83637.10^{-7}(UR)^2)].t^{0,605977},$$

i) The drying of bean seeds can be made at high temperatures provided that the times of residence in the drier are respected for each temperature and initial moisture content. **j**) At the temperature of 45 °C and initial moisture content of the seeds of 35 and 25 % d.b. drying can be made up to the final storage moisture content, and seeds are not affected in their physiological quality. For the initial moisture content of 45 % d. b. the time of residence in the drier, in order not to affect the physiological quality of the seeds, is 360 minutes, which corresponds to a drying up to the moisture content of 17% d. b. The rest of the drying should be made at 40 °C up to the moisture content of 13.5 % d. b. **k**) At the temperature of 50 °C and initial moisture content of the seeds of 25 % d.b. drying can be made up to the final storage moisture content, and seeds will not be affected in their physiological quality. For the initial moisture content of 45 and 35% d.b. the time of residence in the drier in order not to affect the physiological quality of the seeds, is 87 and 60 minutes, which corresponds to a drying of 45% up to 21.5% d.b. and of 35% up to the moisture content of 28.8% d.b., respectively; **l**) At the temperature of 60 °C, the drying of the seeds can be made from the initial moisture contents of 25, 35 and 45% d.b. up to the final moisture contents of 17, 24.5 and 32.5% d.b., respectively, and seeds will not be affected in their physiological quality. These dryings correspond respectively to a time of residence in the drier of 70, 40 and 30 minutes; **m**) At the temperature of 70 °C, the dryings of the seeds can be made from the initial moisture contents of 25, 35 and 45% d.b. up to the final moisture contents of 19.5, 27.5 and 37.5% d.b., respectively, and seeds will not be affected in their physiological quality. These dryings correspond respectively to a time of residence in the drier of 25, 15 and 10 minutes; **n**) The compatibility among experimental data and the simulated data validate the Thompson model for seed drying in thick layers within a temperature range from 40 to 70 °C and initial moisture content of seeds from 45 to 25 % dry basis. The desorption equations, vaporization latent heat, specific and drying heat in thin layers specific for this product and determined in this work, have the main responsibility for this validation; **o**) The drying of bean seeds in thick layers can be made at a temperature of 70 °C for one hour (1 h) and initial moisture content of 25% d.b.; or at 60 °C for one and a half hours (1.5 h.) and initial moisture content of 25 % d.b. or still at 60 °C for two and a half hours (2.5 h.) and initial moisture content of 35% d.b. with complementary drying at 40 °C up to the moisture content of 13.5 % d.b., and seeds will not be affected in their physiological quality right after drying; **p**) Bean seeds dried at temperatures of 40 and 50 °C do not have significant differences on from the other as to their physiological quality, when stored at temperatures of 10, 20 and 30 °C; **q**) Drying of bean seeds 70 °C for one hour (1 h) and complementary drying at 40 °C causes a latent degenerative effect and this shows more evidently when seeds are stored at 30 °C; in the storage at 20 °C this effect appears moderately and practically is not evident when seeds are stored at 10 °C.

KEY WORDS: seeds, bean, drying, high temperatures, storability.

INTRODUÇÃO

As sementes representam um mecanismo de sobrevivência e perpetuação das espécies constituindo-se num processo em que a vida pode ser interrompida, e/ou reiniciada com um novo plantio dessas sementes. Portanto, as sementes são consideradas produtos nobres de alto valor agregado e são portadoras de determinadas características genéticas que fazem com que cerca de 1/3 a 3/4 da população dos países em nível mundial se alimentem de grãos de cereais e leguminosas. Decorrente dessa importância as sementes fazem parte da estratégia de desenvolvimento de qualquer país.

No mundo, segundo VIEIRA (1988), 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 hypogaea*) a soja (*Glycine max*) 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 oleaginosas, como é o caso da soja e do amendoim.

Segundo SILVA (1995), a produção nacional de feijão na safra 92/93 foi de 2,38 milhões de toneladas e a de 93/94 foi de 3,1 milhões de toneladas, constatando-se um aumento de 30% na produção e consumo do feijão decorrente do plano REAL, implantado no Brasil em 1993, que provocou um aumento no poder aquisitivo das classes de renda mais baixa, devido a esta leguminosa pertencer aos produtos da cesta básica. Assim, o feijão por fazer parte da alimentação diária da população brasileira, e por ter um teor de proteína em torno de 22,0 %, é denominado de “carne do pobre”.

No Brasil, 80% da produção de feijão é cultivada por pequenos agricultores usando tecnologia mais simples que nos levam a baixos rendimentos. Os médios e grandes agricultores, utilizadores em geral de melhor tecnologia de produção, preferem dedicar-se a culturas de menor risco, como milho, soja, cana-de-açúcar e outras, evitando a do feijão. Atualmente, a situação começa a modificar-se, graças, em boa parte, à chamada terceira época de plantio do feijão, feita no outono-inverno. Nessa época não há grandes riscos para a cultura, porque ela tem de ser obrigatoriamente irrigada, o que exige investimento e tecnologia mais avançada. Além disso, como nessa época não chove, as enfermidades deixam de se constituir num grande transtorno. Como resultado, a produção é garantida, atingindo altos rendimentos de 1,5 a 2,5 t/ha (VIEIRA, 1988).

Segundo CARVALHO e NAKAGAWA (1983) o estudo da maturação fisiológica das sementes é feito com o objetivo de determinar o ponto ideal de colheita, visando a produção e a qualidades das sementes. No entanto, os autores relatam também que se a colheita for feita exatamente na maturidade fisiológica esta teria sérios problemas pois, naquele ponto, a planta se encontra com uma quantidade de folhas e ramos verdes com alta umidade que tenderia a obstruir os órgãos ativos da colhedeira. Outro problema seria o teor de umidade das sementes (30-50% base úmida) que acarretaria injúria mecânica às sementes, sendo esta injúria mais perigosa do que aquelas por quebra, por não ser visível e nem modificar sensivelmente as características físicas das sementes.

Depois da produção, o feijão necessita ser colhido e seco para que possa preservar sua qualidade ao longo do armazenamento. Nesta etapa o teor de umidade é reduzido de aproximadamente 35% base úmida (b.u.) para 12% b.u., sendo os processos de secagem mais

utilizados os seguintes: a) secagem natural ou seja na própria planta, b) em terreiros ou c) em secadores de camada estacionária.

No Brasil, no período em que se faz a secagem de feijão é comum conviver com grandes perdas desse produto devido ao tempo ser chuvoso com dias de estiagem. Assim, devido às perdas sucessivas de um número significativo de toneladas de sementes de feijão, os agricultores têm optado pela secagem mecânica e em particular pela secagem em camada estacionária.

Os elementos básicos que compõem um sistema de um silo secador em camada estacionária (Figura 1) são: a) silo dotado de um fundo, construído em chapa metálica perfurada, colocado sobre um "plenum"; b) um ventilador axial ou centrífugo e c) um sistema de aquecimento cuja função é aumentar a temperatura do ar.

A secagem mecânica, em geral, pode ser realizada com temperaturas baixas, altas ou de forma combinada. A secagem feita a baixas temperaturas utiliza as condições ambientais do ar, ou o ar levemente aquecido, provocado geralmente pelo atrito mecânico do ventilador. Neste tipo de secagem, o tempo em que as sementes ficam sem secar nas camadas superiores, pode possibilitar o desenvolvimento de microorganismos ou acelerar a taxa respiratória das sementes consumindo, conseqüentemente, suas reservas e diminuindo sua qualidade fisiológica. Já a secagem realizada a altas temperaturas, entendendo-se aqui como temperaturas acima de 45 °C para o caso de sementes, pode diminuir drasticamente a qualidade fisiológica das sementes pela simples ação da temperatura, além de poder ocorrer a secagem excessiva das sementes nas camadas inferiores do secador e acelerar a atividade microbiana nas camadas superiores.

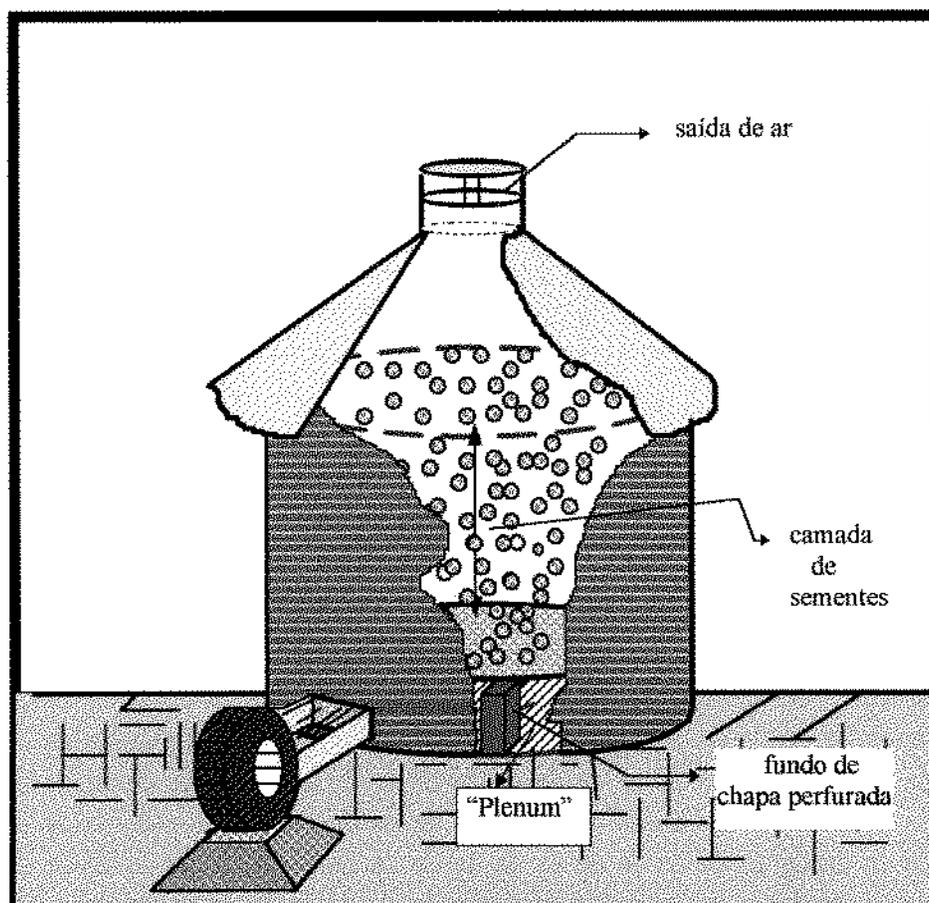


FIGURA 1 - Desenho esquemático de um silo-secador.

Desta forma, tanto a secagem a baixas temperaturas como a secagem a altas temperaturas podem concorrer para o insucesso da secagem com o objetivo de preservar a qualidade do produto pois, segundo BOREM (1992), outros parâmetros além da temperatura estão associados à redução da qualidade das sementes os quais são: a umidade relativa do ar, a vazão do ar de secagem e os teores de umidade inicial e final das sementes. No entanto, a temperatura de secagem é considerada o principal fator de redução da qualidade de um produto (CAVALCANTI MATA *et alii*, 1985).

Portanto a alteração da temperatura durante o processo de secagem pode ser uma alternativa eficaz de modo a preservar a qualidade do produto, uma vez que no início da secagem a semente requer energia para evaporar as partículas de água e a ação da temperatura sobre a qualidade fisiológica das sementes deve ser menor. Com o decorrer da secagem essa quantidade de água vai ficando menos disponível na periferia da semente provocando um aumento de temperatura no seu tegumento (Figura 2). Assim, requer-se uma investigação mais profunda para determinar-se a partir de que ponto a semente começa a ser afetada na sua qualidade fisiológica pela ação da secagem em altas temperaturas ($> 45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ao identificar-se este ponto é possível que a secagem possa ser prosseguida com temperaturas menores. No entanto, o maior risco de diminuição da qualidade fisiológica devido a altas umidades já foi eliminado.

Fazendo-se uma análise teórica mais profunda, este tipo de pensamento de alteração da temperatura durante o processo de secagem, usando uma temperatura maior inicialmente e uma temperatura menor a partir de uma determinada etapa da secagem, tem um princípio semelhante ao processo de seca-aeração, em que o produto é seco a altas temperaturas no início, quando o teor de água do material está em parte na sua superfície e, depois de determinado tempo, a secagem prossegue a temperaturas inferiores, quando o risco de deterioração do material já foi diminuído. No caso da seca-aeração a secagem em temperaturas mais baixas é feita com o ar ambiente e baixos fluxos de ar, contudo, no enfoque do presente trabalho a secagem seguinte seria conduzida com temperaturas inferiores a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ e mesma velocidade do ar de secagem.

Este tipo de investigação fornecerá dados para a secagem em camadas finas. Entretanto um secador de camada estacionária é um equipamento que opera em camada espessa e, neste caso, à semelhança da teoria de secagem, pode-se considerar a camada espessa como uma sucessão de camadas finas. Neste sentido a simulação de processos é uma ferramenta eficaz para auxiliar tanto na pesquisa de secagem quanto na avaliação do gradiente de temperatura que se estabelece nas sementes ao longo da camada dentro do secador de camada estacionária.

O secador de camada estacionária tem sido amplamente investigado para as culturas mais plantadas como milho, trigo, arroz e soja. De acordo com MOREY *et alii* (1978), para o caso específico da elaboração de projetos de secadores para secagem de grãos e sementes, a simulação é um processo que auxilia o Engenheiro Projetista permitindo, além disto, planejar as operações dos sistemas de secagem e, segundo MARTINS e CAVALCANTI MATA (1984), essas previsões são muito importantes nos processos de Engenharia, pois evitam gastos exagerados de material e de mão-de-obra na execução de um processo real.

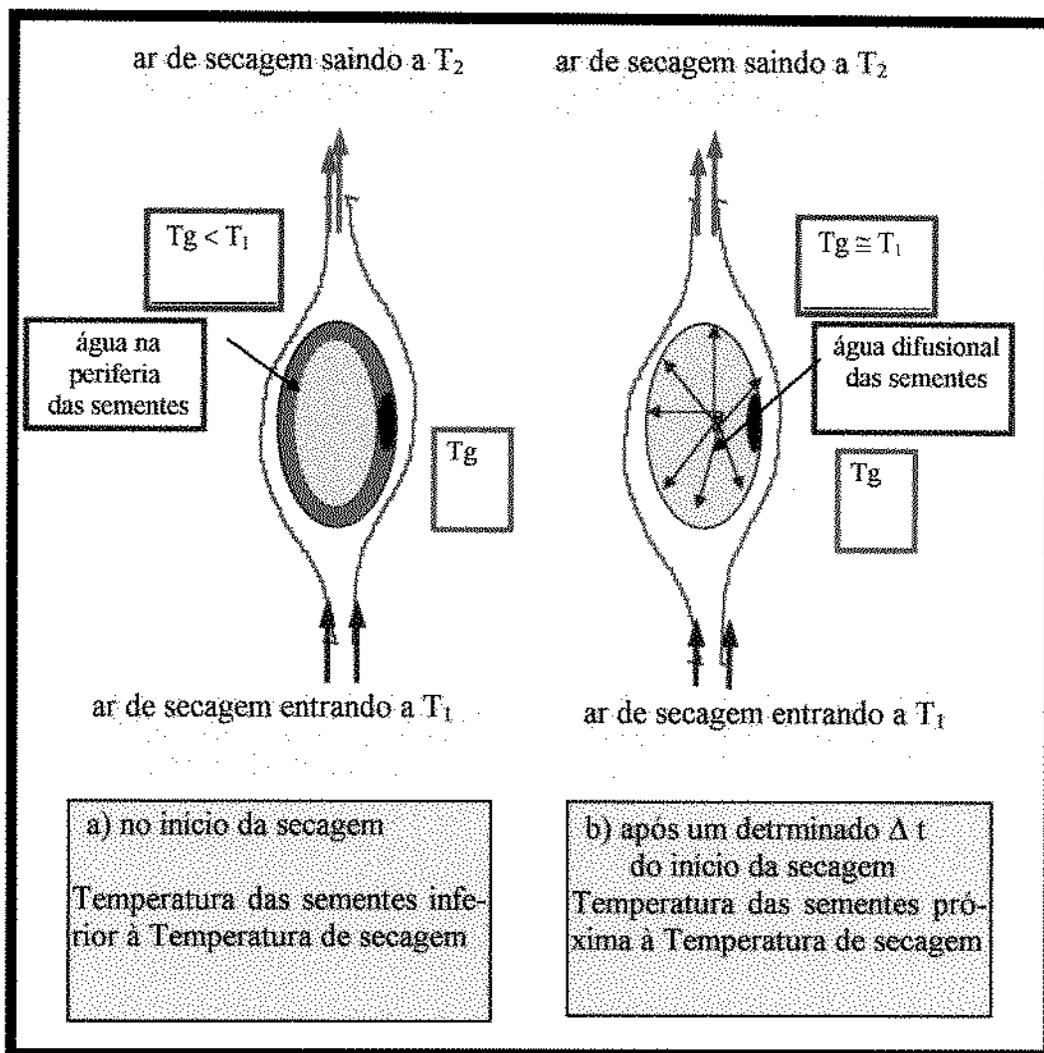


FIGURA 2 - Esquema demonstrativo do processo de secagem da semente no início e após um determinado intervalo de tempo.

Embora a simulação de secagem de grãos e sementes tenha sido estudada por vários pesquisadores (THOMPSON *et alii*, 1968; MOREY e PEART, 1969; BAUGHMAN *et alii*, 1971; BLOOME e SHOVE, 1971; WHITAKER e YOUNG, 1972; ALAN e SHOVE, 1973; BAKKER-ARKEMA *et alii*, 1974; FORTES, 1978; MISRA e YOUNG, 1978; MOREY *et alii*, 1978; MARTINS, 1982; QUEIROZ, 1984; DALPALQUALE e PEREIRA, 1991; CALVALCANTI MATA, 1993) pouco se conhece sobre a simulação de secagem com feijão pois, além de sua produção ser de menor volume no mundo ele representa um interesse quase que nacional, daí a necessidade de investigar, neste trabalho, também a simulação de secagem.

De acordo com SILVA (1995) os principais modelos utilizados em simulação de secagem de cereais são: a) Modelo de Hukill; b) Modelo de Thompson, Modelo de Morey e Modelo de Michigan. Alguns testes já foram feitos comparando-se o Modelo de Michigan proposto por BAKKER-ARKEMA *et alii* (1978) e o Modelo de THOMPSON (1967) não tendo sido encontradas diferenças significativas entre os dois métodos (MARTINS, 1988).

Segundo QUEIROZ (1984), o Modelo de Thompson é um modelo semi-teórico utilizado com sucesso para secagem de milho, capaz de prever a influência das condições do ar de secagem, da espessura da camada e do teor de umidade inicial do produto.

Se a finalidade do presente trabalho é equacionar alguns aspectos da secagem de sementes de feijão e usar um modelo que permita prever as alterações da qualidade fisiológica dentro desses aspectos, é necessário ter em mente que os problemas de qualidade fisiológica das sementes não são resolvidos apenas equacionando-se o processo de secagem, pois existem reflexos desse processo durante o período em que as sementes são armazenadas. Portanto, se pode considerar que uma boa secagem seja aquela que apresenta uma boa qualidade fisiológica das sementes logo depois de sua realização, mas deve ser observado o seu comportamento durante o período pós-secagem ou seja durante o seu armazenamento.

HARRINGTON (1972) relata que o armazenamento de sementes não começa depois que se colocam estas sementes no armazém mas, ao contrário do que comumente se acredita, o início da armazenagem se dá no momento em que as sementes atingem a maturidade fisiológica.

Segundo TOLEDO e MARCOS FILHO (1977), pode-se não perceber momentaneamente os danos causados pela ação da temperatura durante o período de secagem mas, quando o produto é armazenado por um determinado período de tempo, este se revela acelerando o decréscimo do poder germinativo e do vigor. É, no entanto, necessário saber distinguir bem a perda da qualidade fisiológica das sementes decorrente da armazenagem inadequada e aquela devido ao excesso de temperatura na secagem.

De acordo com CAVALCANTI MATA *et alii* (1989), parte dos danos causados às sementes devido a secagem inadequada, decorrentes da temperatura excessiva, podem ser inibidos na armazenagem pelo uso de temperaturas menores nas câmaras de conservação. No entanto isto significa aumento dos custos de armazenagem das sementes.

OBJETIVOS

Diante do exposto anteriormente e trabalhando-se com as sementes de feijão “carioca” os objetivos deste trabalho foram:

- Determinar as propriedades físicas (isotermas de sorção e dessorção, calor latente de vaporização, calor específico, forma e tamanho) necessárias à secagem e a sua simulação.
- Determinar as curvas de secagem em camada delgada para as temperaturas de 30 a 80 °C e teor de umidade inicial variando de 25 a 45 % base seca, além de verificar a influência da umidade relativa e velocidade do ar na taxa de secagem.
- Estudar a perda da qualidade fisiológica das sementes de feijão quando secas em camada delgada às temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com teor de umidade inicial de 45%, base seca, até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15 % base seca, e secagem complementar à temperatura de 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % base seca.
- Desenvolver um programa computacional para simular a secagem de feijão “carioca” utilizando o Modelo de Thompson para um secador de camada estacionária e comparar os resultados experimentais com dados simulados, testando o Modelo para a faixa estudada.
- Conduzir testes experimentais de secagem de sementes às temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C e velocidade do ar de secagem de $36 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ em secador de camada estacionária de 0,70 m de altura, simulando-se o tempo necessário para que não ocorra perda da qualidade fisiológica.

- Estudar a armazenabilidade das sementes de feijão secas em altas temperaturas por curtos períodos de tempo, avaliando-se a sua qualidade fisiológica por um período de 12 meses sob condições de temperaturas controladas de 10, 20 e 30 °C.
- Determinar uma equação que permita prever a variação da qualidade fisiológica em função das condições de secagem e armazenagem.

Capítulo 1

Propriedades físicas do feijão necessárias à secagem

1. INTRODUÇÃO

Quando se quer conservar um produto por determinado tempo o meio mais tradicional até o presente utilizado no mundo é a sua desidratação parcial, ou seja, uma certa quantidade de água é retirada do produto de modo a inibir a sua atividade biológica.

O processo que opera essa retirada de determinada quantidade de água do interior de um produto é denominado “secagem”. Esta operação de ordem física envolve fenômenos de transferência de calor e massa, e para tal fim, algumas propriedades físicas do produto devem ser conhecidas, como o coeficiente de condutividade e difusividade térmica além do coeficiente de transferência externa de calor e massa. No caso de determinação do coeficiente de difusão é necessário conhecer também o tamanho da partícula e sua variação com o teor de umidade, além de sua proximidade com uma forma geométrica regular.

As principais características físicas de um produto necessárias à secagem e a sua simulação são: teor de umidade de equilíbrio, calor latente de vaporização e calor específico.

O teor de umidade 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 controladas de temperatura e umidade do ar (ROA e ROSSI, 1977). Portanto, para determinadas condições de secagem, dadas pela temperatura e umidade relativa do ar, existe uma umidade de equilíbrio do produto. O diferencial entre a umidade inicial do produto a ser seco e a umidade de equilíbrio ($U_i - U_e$) é definido como o potencial de secagem. De outra forma o produto só poderá ser seco até à umidade de equilíbrio para as condições de temperatura e umidade relativa pré-estabelecidas.

A outra propriedade física a ser conhecida é o calor latente de vaporização que é a quantidade de energia necessária para vaporizar a água do produto sob determinadas condições de secagem.

O calor específico se refere à quantidade de energia contida no produto por unidade de massa, sendo que este calor específico é função linear, na maioria dos grãos, do seu teor de umidade.

Segundo MARTINS e CAVALCANTI MATA (1984), estes parâmetros são fundamentais no estudo de qualquer secagem, armazenagem e simulação de processos de produtos agrícolas. No entanto nem sempre estão disponíveis na literatura, pois estes variam não só com o produto mas também com a sua variedade. Portanto, diante dos objetivos genéricos de se estudar a armazenabilidade e a simulação de secagem de sementes de feijão “carioca” neste capítulo os objetivos específicos foram:

- Determinar as curvas de equilíbrio higroscópico (sorção e dessorção) às temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 °C e umidades relativas do ar variando de 10 a 90% , além de determinar os coeficientes para as equações de Gab, Henderson modificada e Roa.
- Determinar o calor latente de vaporização para as faixas de temperatura e umidade relativa do ar do item anterior e o calor específico das sementes para os teores de umidade de 5 a 35 %, base seca.
- Determinar a variação de tamanho (comprimento, largura e espessura) e do raio da esfera equivalente das sementes de feijão em função do teor de umidade de 10 a 45%, base úmida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Equilíbrio higroscópico de grãos e cereais

2.1.1. Considerações sobre os fenômenos de sorção e dessorção

O conhecimento das isotermas de umidade de equilíbrio higroscópico de grãos e cereais é de essencial importância devido estarem diretamente ligadas aos problemas de armazenagem e secagem de grãos.

A umidade de equilíbrio higroscópico é relevante no estudo da secagem de grãos porque determina o teor de umidade até o qual os grãos podem ser secos sob condições estabelecidas de secagem.

Uma substância higroscópica, como é o caso dos grãos e cereais, tende a manter uma determinada pressão de vapor a uma dada temperatura e umidade relativa. Essa pressão de vapor é conhecida como pressão de vapor de equilíbrio e a umidade relativa correspondente é conhecida como umidade relativa de equilíbrio.

BROOKER *et alii* (1974) e ROA e ROSSI (1977) definem teor de umidade de equilíbrio como o teor de umidade (massa de água por unidade de massa total, em base úmida, ou massa de água por unidade de massa seca, em base seca) que um produto atinge quando é submetido, por um tempo suficientemente longo, em condições controladas de temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR), ou ainda, o grão está higroscopicamente em equilíbrio com o ar ambiente em que se encontra, quando a tensão de vapor d'água for igual à tensão de vapor d'água do ar ambiente, sendo que, para cada espécie e/ou variedade de grão, a tensão de vapor interna tem um valor característico para cada temperatura.

ROA e ROSSI (1977) afirmam que os valores de teor de umidade de equilíbrio dos produtos biológicos dependem principalmente da umidade do ar, temperatura do produto que está ligada à temperatura do ar e espécie do grão (ou variedade).

Segundo BROOKER *et alii* (1974), os grãos com alto teor de óleo adsorvem menor umidade do ambiente do que os grãos com alto teor de amido e, ainda, a maturidade e o histórico do grão, as condições ambientais e a maneira pela qual o equilíbrio foi obtido (sorção ou dessorção) também influenciam a umidade de equilíbrio.

O teor de umidade de equilíbrio de um material higroscópico, para uma certa condição de temperatura, umidade relativa de equilíbrio e determinada pressão, depende do caminho utilizado para atingir o equilíbrio. Assim, para uma mesma umidade relativa pode haver duas isotermas, chamadas isotermas de sorção e dessorção. Tanto o processo de sorção quanto o de dessorção dependem do teor de umidade inicial a que cada processo começa, ou seja, se o material está com o teor de umidade menor ou maior que o da umidade de equilíbrio para as condições do ambiente, respectivamente. (HLINKA e ROBINSON (1954); THOMPSON e SHEDD (1954); HUBBARD *et alii*, 1957; DAY e NELSON, 1965; YOUNG e NELSON, 1967; HENDERSON, 1970).

Grãos que estão ganhando umidade têm uma menor umidade de equilíbrio que grãos que estão perdendo umidade. Assim, a isoterma de dessorção apresenta valores de umidade de equilíbrio superiores aos da isoterma de sorção (YOUNG e NELSON, 1967; SINHA e MUIR, 1973).

2.1.2. Considerações sobre histerese

CHRISTENSEN (1974) relata que as isotermas de sorção de umidade para polímeros carboidratados, tais como amido e celulose, são suaves curvas sigmoidais sem apresentar nenhuma descontinuidade. Entretanto, segundo os mesmos autores, as isotermas de sorção e dessorção para tais substâncias não são necessariamente as mesmas. Para muitas substâncias, inclusive para grãos e cereais, curvas de isotermas de dessorção são marcadamente deslocadas para a esquerda das curvas de isotermas de sorção, isto é, o teor de umidade do produto a uma determinada temperatura corresponde a dois valores de umidade relativa, dependendo se o material está sorvendo ou dessorvendo umidade. A defasagem entre as curvas de isotermas de sorção e dessorção é conhecida como histerese (YOUNG, 1974).

Babbit, citado por YOUNG (1974), foi um dos primeiros pesquisadores a demonstrar o efeito da histerese na sorção e dessorção de água em sementes de trigo. Muitos outros pesquisadores, tais como HUBBARD *et alii* (1957), ROCKLAND (1957), YOUNG e NELSON (1967) e LABUZA (1968), têm relatado o fenômeno de histerese em diferentes produtos.

CAVALCANTI MATA *et alii* (1985), investigando as curvas de sorção e dessorção em sementes de feijão, variedade mulatinho, verificaram que a histerese decresce com o aumento da temperatura, e a diferença máxima encontrada foi de 2,2 pontos percentuais de umidade entre as curvas de sorção e dessorção nas sementes submetidas à temperatura de 20 °C e uma diferença mínima de 0,3 pontos percentuais para temperatura de 40 °C. Observaram ainda que a histerese cresce para a faixa de umidade relativa de 20% até 60% e decresce a partir de 60% até 90% de umidade relativa.

HUBBARD *et alii* (1957) estudaram o fenômeno de histerese para milho e trigo e verificaram que a histerese máxima ocorrida foi de 1,6% de umidade entre 12 e 44% de umidade relativa. Acima de 56% de umidade relativa, a histerese diminuiu chegando a 0,2% de umidade quando atingiu 92% de umidade relativa. Breese, citado por HENDERSON (1970), quando estudou o fenômeno de histerese em arroz, observou uma diferença de 1,8% na umidade de equilíbrio entre as duas curvas para 50% de umidade relativa. Bushuk *et alii*, citados por HENDERSON (1970), observaram diferença de aproximadamente 1,5 pontos percentuais entre as duas curvas para farinha de trigo. WHITE *et alii* (1972) constataram, para milho, uma diferença de 2,6 pontos percentuais entre as duas curvas.

AYERST (1965) observou que quando os produtos são expostos a uma atmosfera com temperatura e umidade relativa controladas, até que o teor de umidade do produto seja constante, a histerese observada é da ordem de 1,5 a 2 pontos percentuais. No entanto, salienta que na prática a umidade relativa do ar nunca é constante. Um menor efeito da histerese foi relatado pelo autor quando as amostras foram preparadas a diferentes teores de umidade e a umidade relativa do ar era determinada. Utilizando a citada técnica de preparar as amostras, o autor encontrou uma histerese da ordem de 0,5 a 1,0 ponto percentual do teor de umidade.

Para a preparação da amostra foi necessário umedecê-la para se obter teores de umidade acima do teor de umidade da amostra original e remover umidade, por meio de secagem, para teores de umidade abaixo do teor de umidade da amostra original. Neste tocante, BECKER e SALLANS (1956) explicam que, especialmente quando os produtos são secos artificialmente, o teor de umidade das camadas mais externas varia mais rapidamente que o das camadas mais internas, e em subsequente equilíbrio das tensões de vapor d'água, a umidade do interior do produto se difunde para as camadas mais externas.

Segundo AYERST (1965), o milho seco artificialmente e temperatura acima de 60 °C deve ser armazenado com um teor de umidade de 0,5 a 1,0 pontos por cento mais baixo do que o milho seco com ar natural, para prevenir o desenvolvimento de mofo, devido a alta umidade intergranular. Neste caso, a secagem pode, em alguns produtos, produzir um efeito de histerese reverso.

CHUNG e PFOST (1967), na investigação do efeito da histerese usando o trigo para obter três ciclos de sorção e dessorção a 50 °C, concluíram que no primeiro ciclo de sorção e dessorção houve normalmente a histerese, no segundo ciclo houve um ligeiro decréscimo na histerese e no terceiro ciclo a histerese esteve próximo a desaparecer. Estes mesmos autores explicam este fenômeno pelos conceitos de quebra molecular causado pelo fendilhamento devido aos sucessivos ciclos de sorção e dessorção ou seja, pelos conceitos de encolhimento molecular e formação de fendas. Isto implica que as estruturas químicas e físicas do produto, depois de sucessivos ciclos de sorção e dessorção, tornam-se tão estável que não ocorrem adicionais encolhimentos moleculares e formação de fendas. Então é esperado o desaparecimento da histerese exibida inicialmente.

Várias teorias ou hipóteses têm sido propostas para explicar o fenômeno de histerese, baseadas principalmente na estrutura porosa ou capilaridade do adsorvente, que é assumido como sendo papel dominante na histerese, que é a diferença no mecanismo entre os processos de enchimento e esvaziamento dos poros ou capilares com o adsorvido. Diversos pesquisadores evidenciam que a histerese tende a desaparecer em sucessivos ciclos de sorção e dessorção, entretanto, uma adequada explicação se faz necessária (CHUNG e PFOST, 1967).

Assim, muitos fatores podem estar envolvidos na histerese e, conseqüentemente, um efeito múltiplo, de fato, pode ser esperado em materiais tais como grãos e cereais, devido possuírem uma estrutura organizada e substâncias químicas largamente diferentes.

2.1.3. Determinação da umidade de equilíbrio

A palavra equilíbrio refere-se ao fato de que, no ponto de equilíbrio, o produto não troca umidade com o ar que o envolve. Isto ocorre quando as pressões de vapor de água na superfície do grão e no ar são idênticas. O conceito de equilíbrio não significa igualdade no conteúdo de água no produto e no ar. Ao contrário, os grãos possuem, aproximadamente, 10.000 vezes mais água do que o ar quando estão em equilíbrio (ROA e ROSSI, 1977). Embora haja essa grande diferença, a umidade do ar é muito importante devido aos grandes volumes desse fluido que sempre estão em contato com o produto durante a secagem, manuseio e armazenagem adequados. Quando a pressão de vapor da água no ar for superior à pressão de vapor da água na superfície do produto, o ar fornecerá toda a água necessária para estabelecer-se o equilíbrio.

Comumente, dois métodos são usados para determinar experimentalmente as curvas de umidade de equilíbrio, que são o método estático e o método dinâmico. No método estático a umidade de equilíbrio entre o produto e a atmosfera circundante é atingida sem movimentação do ar. No método dinâmico, o ar ou o grão é movimentado até que o equilíbrio seja atingido (HALL e RODRIGUES-ARIAS, 1958; GUSTAFSON, 1972; BROOKER *et alii*, 1974; PINHEIRO FILHO, 1976).

Segundo HALL (1971) GUSTAFSON (1972); BROOKER *et alii* (1974) e PINHEIRO FILHO (1976), com o método dinâmico pode-se atingir o equilíbrio higroscópico num período de tempo consideravelmente menor do que o necessário para o método estático, sob mesmas condições. Rockland, citado por GUSTAFSON (1972), obteve o equilíbrio hi-

gros cópico em um tempo dez vezes menor que o necessário ao método estático tradicional, forçando movimento de ar dentro do dessecador, com condições controladas de umidade relativa e temperatura.

SILVA e PINHEIRO FILHO (1980) obtiveram umidades de equilíbrio higroscópico para o cacau em menor tempo que no método estático ao fazerem o produto movimentar-se dentro de uma unidade condicionadora de ar, por meio da qual a temperatura era controlada. O equilíbrio higroscópico foi obtido em um tempo médio de 12 dias. ROA e ROSSI (1977) obtiveram equilíbrio higroscópico, para o mesmo produto, somente 40 dias depois do início do teste.

KOSOSKI (1977), utilizando o método estático para milho (amarelo), arroz em casca, feijão preto, amendoim descascado (*Spanish*) e soja, obteve o equilíbrio higroscópico em um período de tempo que variou entre 15 a 34 dias, sendo o maior tempo observado para temperaturas mais baixas.

GUSTAFSON (1972), em estudos com o milho, promovendo oscilação de uma chapa metálica no interior de um recipiente hermeticamente fechado, para possibilitar melhor circulação do ar no interior do recipiente, obteve redução significativa do tempo para atingir o equilíbrio em relação ao método estático, apenas para a temperatura de 10 °C.

Tem-se calculado, também, valores de umidade de equilíbrio mediante medida direta da pressão de vapor de água por meio de um manômetro de precisão. O método consiste em promover vácuo no recipiente que contém as amostras. O grão perde umidade até o momento em que a pressão de vapor de água no ar se iguale à pressão de vapor de água na superfície do grão. Nesse momento, mede-se a pressão e determina-se o teor de umidade do grão. Experiências com sementes de cacau e grãos de soja, utilizando esse método proposto não chegaram a demorar mais que 3 dias para obtenção de cada isoterma (sendo que no início do terceiro dia já havia estabelecido o equilíbrio entre as pressões de vapor de água no ar e na superfície do produto) (ROA e ROSSI, 1977).

A passagem do ar através dos grãos diminui a resistência externa à transferência de massa, no entanto o tempo para atingir o equilíbrio depende da resistência interna à difusão de umidade no interior do grão CHITTENDEN (1961).

Muitos dados de teor de umidade de equilíbrio podem ser obtidos colocando-se pequenas amostras de um produto com uma concentração específica que produz uma certa pressão de vapor d'água ou umidade relativa (HENDERSON, 1952). Uma série de observações a diferentes concentrações do ácido sulfúrico fornece uma curva de equilíbrio completa. CHITTENDEN (1961) afirma que as condições de umidade relativa também podem ser mantidas constantes no interior de recipientes hermeticamente fechados colocando-se soluções de ácido hidrocloreídrico ou etileno glicol, as quais manterão a umidade relativa constante para qualquer valor que se desejar, bastando apenas variar sua concentração ou utilizar soluções saturadas de diferentes sais.

Segundo HENDERSON (1952), três dificuldades são experimentadas quando se usa soluções de ácido sulfúrico:

a) Se o ar no compartimento não se move, são necessários longos períodos para atingir o equilíbrio. Conseqüentemente, as amostras podem ser removidas do teste antes de terem atingido uma condição de equilíbrio;

b) Por causa do longo período de tempo e de algumas vezes ser necessário uma umidade relativa de, aproximadamente, 85% ou mais, pode-se desenvolver mofo antes da obtenção da umidade de equilíbrio. A umidade proveniente da respiração do mofo dá um falso teor de umidade de equilíbrio;

c) A maioria dos dados observados por este processo é baseada nas pressões de vapor do ácido sulfúrico publicadas por Wilson em 1921 (citadas pelo mesmo autor).

Segundo HALL (1971), GUSTAFSON (1972) e BROOKER *et alii* (1974), soluções saturadas de sais têm sido o método preferido por muitos autores pelas seguintes vantagens:

a) Uma mesma solução de sal pode ser usada para várias temperaturas, sem grandes variações no valor de umidade relativa;

b) Os sais são menos corrosivos que ácidos, causando menos prejuízos em equipamentos e menores riscos aos operadores durante seu manuseio;

c) Mesmo que os grãos percam ou ganhem umidade em quantidade relativamente grande, a solução fica saturada, desde que se deixe um depósito de cristais do sal no fundo da solução.

O método das soluções saturadas de sais, apesar de ser o método preferido por muitos autores, torna-se inconveniente devido à dificuldade de se encontrar sais que abranjam toda a faixa de umidade relativa desejada.

2.1.4. Equações de equilíbrio higroscópico

Um número muito grande de equações teóricas, semi-teóricas e empíricas tem sido proposto para o cálculo da umidade de equilíbrio. Segundo BROOKER *et alii* (1974), nenhuma equação teórica é ainda capaz de prever exatamente a umidade de equilíbrio de produtos agrícolas em uma faixa ampla de temperatura e umidade relativa.

Equação de Kelvin

KELVIN (1871), baseado na teoria de condensação capilar desenvolveram um modelo para o teor de umidade de adsorção em sólidos, considerando a condensação capilar entre os poros e o sólido e propôs a seguinte equação:

$$\ln(P_v - P_{vs}) = \frac{2 \cdot \sigma \cdot V \cdot \cos \alpha}{r \cdot R_o \cdot T_{abs}} \quad (\text{Eq. 1.1})$$

em que

- V = volume de umidade na forma líquida, m³
- P_v = pressão de vapor de água do produto, Pa
- P_{vs} = pressão de vapor à temperatura de saturação, Pa
- r = raio do capilar cilíndrico, m
- R_o = constante universal dos gases, 1544,0 m.mol⁻¹. K⁻¹
- T_{abs} = temperatura absoluta, K
- σ = tensão superficial da água, Pa
- α = ângulo de contato entre a água e o capilar

Equação de Langmuir

Langmuir, em 1918, citado por BROOKER *et alii* (1974), assumiu que no equilíbrio a taxa à qual as moléculas se condensam na superfície é igual à taxa em que elas evaporam da superfície. Ele assumiu, além disso, que a probabilidade de evaporação da molécula é a mesma se as posições vizinhas na superfície estão ocupadas ou não, e que toda molécula que vem da fase gasosa colide com a molécula já adsorvida na superfície e é elasticamente refletida. A equação proposta por ele é a seguinte:

$$V = \frac{V_m \cdot B \cdot P_v}{(1 + B \cdot P_v)} \quad (\text{Eq. 1.2})$$

em que

P_v = pressão de vapor do gás (ar), Pa

V = volume do vapor de água adsorvida isotermicamente a uma pressão de vapor P_v , m^3

V_m = volume de vapor de água adsorvida correspondente a uma camada de molécula, m^3

B = parâmetro variando com o gás, temperatura e natureza do adsorvente.

Equação de BET

Brunauer, Emmett e Teller em 1938, citados por HALL e RODRIGUES-ARIAS (1958) e BROOKER *et alii* (1974), assumiram a adsorção multimolecular em que a taxa de condensação é igual à taxa de evaporação em cada camada do adsorvido. Eles assumiram que todas as camadas depois da primeira são condensadas com um calor de condensação normal e chegaram a equação:

$$\frac{P_v}{V \cdot (P_{vs} - P_v)} = \frac{1}{C \cdot (V_m)} + \frac{(C-1) \cdot UR}{C \cdot V_m} \quad (\text{Eq. 1.3})$$

em que

UR = umidade relativa do ar, decimal

C = parâmetro que depende da temperatura e da natureza do produto.

Essa equação, conhecida como equação de BET, dá uma isoterma sigmoideal, similar à observada experimentalmente para materiais biológicos.

Equação de Gab

A equação de Gab é uma equação baseada na teoria das monocamadas e deriva da equação de BET. Samaniego citado por HUBINGER (1994), relata que Van Der Berg provou que a equação de Gab ajusta aos dados de isotermas de adsorção na faixa de umidade relativa de 0,1 a 0,9 tão bem ou melhor que qualquer outra equação de quatro ou mais termos. Os autores afirmam que os parâmetros da equação tem significado físico, sendo que a constante C_G (constante de Guggenheim) relaciona as energias de interação entre água e alimento e K relaciona as energias de interação entre as múltiplas camadas de água.

$$U_e = \frac{U_m \cdot C_G \cdot K \cdot UR}{(1 - K \cdot UR) \cdot (1 - K \cdot UR + C_G \cdot K \cdot UR)} \quad (\text{Eq. 1.4})$$

em que

U_m = quantidade de umidade na monocamada, kg
 C_G = constante de Guggenheim
 K = constante da monocamada

em que

$$C_G = c \cdot \text{EXP} \frac{(\bar{H}l - \bar{H}o)}{R \cdot T} \quad (\text{Eq. 1.5})$$

$$K = k \cdot \text{EXP} \frac{(\bar{H}l - \bar{H}m)}{R \cdot T} \quad (\text{Eq. 1.6})$$

em que

$\bar{H}l$ = líquido puro, m^3
 $\bar{H}o$ = água na monocamada, m^3
 $\bar{H}m$ = água nas multicamadas, m^3
 R = constante do vapor d'água, $461 \text{ J.kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 T = temperatura, $^{\circ}\text{C}$
 c e k = constantes que dependem do produto.

Equação de Harkins-Jura

Harkins e Jura, em 1944, baseados na teoria potencial, desenvolveram a seguinte equação (SILVA, 1979):

$$\ln(U_R) = w_b - \left(\frac{w_c}{(U_e)^2} \right) \quad (\text{Eq. 1.7})$$

em que

w_b e w_c = constantes do produto que dependem de sua temperatura
 U_e = umidade de equilíbrio do produto, decimal

Equação de Smith

Smith, em 1947, citado por BROOKER *et alii* (1974) e PINHEIRO FILHO (1976), estudaram o comportamento de sorção de umidade em polímeros de alto peso molecular e consideraram a água absorvida em duas principais classes:

a) que a água é adsorvida em passagem na camada interior ou exterior do sólido adsorvedor por forças maiores que as responsáveis pela condensação da água para o estado líquido;

b) que a água é normalmente condensada dentro do adsorvedor.

Smith assumiu, além disso, que a porção da umidade adsorvida por essas forças atinge o máximo à pressão de vapor bem próximo da saturação. Assim, desenvolveu a seguinte equação:

$$U_e = m - n \cdot \ln(1 - UR) \quad (\text{Eq. 1.8})$$

em que

m e n = parâmetros que dependem da natureza do produto

Essa equação ajusta-se bem a dados experimentais de umidade de equilíbrio de cereais para condições de umidade relativa de 50 a 95%, segundo BECKER E SALLANS (1956) e Young, citado por PINHEIRO FILHO (1976), afirmam que a equação de Smith descreve melhor as isotermas de umidade de equilíbrio que a equação de Chung-Pfost.

Equação de Henderson

Uma das mais conhecidas e usadas equações para previsão de umidade de equilíbrio de grãos é o modelo semi-empírico proposto por HENDERSON (1952). Usando a equação de adsorção de Gibbs, estabeleceu a seguinte equação para as isotermas de equilíbrio higroscópico de materiais biológicos, incluindo grãos de cereais:

$$1 - UR = \exp[-a \cdot T_{\text{abs}} \cdot (U_e)^b] \quad (\text{Eq. 1.9})$$

Esta equação pode ser linearizada como:

$$\ln(-\ln(1 - UR)) = \ln(a) + \ln(T_{\text{abs}}) + n \cdot \ln(U_e) \quad (\text{Eq. 1.10})$$

em que

a e b = parâmetros que dependem da temperatura e da natureza do produto

U_e = teor de umidade de equilíbrio do produto, % base seca

Equação de Thompson

A Equação de Henderson foi inicialmente proposta e ajustada a dados experimentais de umidade de equilíbrio de milho, sendo posteriormente modificada por THOMPSON e SHEDD (1954), para milho:

$$(1 - UR) = \exp[-a \cdot (1,8 \cdot T - 409,4) \cdot (U_e)^b] \quad (\text{Eq. 1.11})$$

em que $a = 3,85 \cdot 10^{-5}$ e $b = 2,0$

A nova equação foi aplicada pelos próprios autores para simulação de secagem de milho e proporcionou melhores resultados que a Equação 1.9. Mantovani, citado por BACH (1979), afirma que essa equação permitiu estimar valores de umidade de equilíbrio de milho que, aplicados em simulação de secagem, deram resultados significativamente iguais aos dados obtidos com as equações de Henderson e de Chung-Pfost. Não obstante, essas equações mostraram-se muito limitadas para determinadas faixas de umidade relativa, de acordo com os diferentes produtos (BACH, 1979).

Equação de Day e Nelson

DAY e NELSON (1965) modificaram a equação de Henderson, para trigo, propondo uma equação do tipo:

$$(1 - UR) = \exp[-X \cdot (Ue^Y)] \quad (\text{Eq.1.12})$$

em que

X, Y = coeficientes da equação

$$X = P_1 (1,8.T - 459,4)^{P_2}$$

$$Y = P_3 (1,8.T - 459,4)^{P_4}$$

P_1, P_2, P_3, P_4 = parâmetros que dependem do material

SILVA e PINHEIRO FILHO (1980), em um estudo sobre equilíbrio higroscópico de cacau, verificaram que essa equação não se ajustou muito bem aos dados experimentais obtidos.

Equação de Agrawal

AGRAWAL *et alii* (s.d.) modificaram a equação de Henderson expressando as constantes P_1, P_2, P_3, P_4 como uma função da temperatura:

$$(1 - UR) = \exp [- (P_1) \cdot (T)^{P_2} - (U_e)^{P_3} \cdot T^{P_4}] \quad (\text{Eq. 1.13})$$

Esta equação pode ser linearizada como :

$$\ln(-\ln(1-UR)) = \ln(P_1) + P_2 \cdot \ln(T) + P_3 \cdot T^{P_4} \cdot \ln(U_e) \quad (\text{Eq. 1.14})$$

Equação Chung e Pfof

Em 1967, Chung e Pfof desenvolveram a seguinte equação matemática:

$$U_e = E - F \cdot \ln[-R_0 \cdot (T^* + C) \cdot \ln(UR)] \quad (\text{Eq. 1.15})$$

em que

R_0 = constante universal dos gases, $287 \text{ J.kg.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T^* = temperatura absoluta, °R

E, F e C = constantes que dependem do produto

Essa equação permite estimar com determinada precisão os valores de umidade de equilíbrio de grãos de cereais, na faixa de 20 a 90% de umidade relativa (BROOKER *et alii*, 1974).

BACH (1979), em seu trabalho para determinar as curvas de equilíbrio higroscópico de feijão preto, para as condições de temperatura variáveis de 10 a 40 °C e umidade relativa de 10 a 90%, concluiu que a equação que melhor se ajustou aos dados experimentais foi a de Henderson modificada, seguida da equação de Chung-Pfof modificada.

A Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas por meio da edição de seus manuais de dados (ASAE-STANDARDS, 1993) descreve as equações de Henderson modificada e Chung-Pfost para feijão comestível e adota para este produto os coeficientes mostrados na Tabela 1.1.

TABELA 1.1 - Coeficientes das equações de Henderson modificada e Chung-Pfost para o feijão comestível

Chung-Pfost	
$U_e = E - F \cdot \text{Ln}[R_o \cdot (T^2+C) \cdot \text{Ln}(UR)]$	
E =	0,43001
F =	0,062596 erro padrão = 0,0138
C =	160,629
Henderson modificada	
$U_e = [\text{Ln}(1-UR) / -K \cdot (T+D)]^{1/N}$	
K =	$2,0899 \times 10^{-5}$
D =	254,23 erro padrão = 0,0136
N =	1,8812

Equação de Silva

SILVA (1980) propôs as seguintes equações de equilíbrio higroscópicas para o milho.

para $0 < UR \leq 0,52$

$$U_e = \frac{(7,4776 \cdot (UR \cdot 100)^{0,4548})}{\ln(1,8 \cdot T + 32)} \quad (\text{Eq. 1.16})$$

para $0,52 < UR \leq 0,999$

$$U_e = \frac{(21,2198 \cdot \exp(1,46 \cdot UR))}{\ln(1,8 \cdot T + 32)} \quad (\text{Eq. 1.17})$$

Equação de Osborn, White e Walton

OSBORN *et alii* citado por BRAGA (1991) desenvolveram um modelo para estimar a umidade de equilíbrio de soja a partir do modelo proposto por Halsey (1948).

$$U_e = \left[\frac{(-\exp(f \cdot T + g))}{\ln(UR)} \right]^{1/r} \quad (\text{Eq. 1.18})$$

em que f, g e r são constantes que dependem do produto

As equações anteriormente descritas são consideradas teóricas ou semi-teóricas, sendo que as semi-teóricas basicamente derivam da equação de Henderson, que é baseada na equação de adsorção de Gibbs. No entanto, diversos pesquisadores não têm se dado por satisfeitos com os resultados apresentados por essas equações. Entre esses pesquisadores está ROA (1977), que propôs uma equação totalmente empírica em que a umidade de equilíbrio depende da temperatura e da umidade relativa do ar.

Equação de Roa

Roa, citado por ROA e ROSSI (1977) propôs o seguinte polinômio de quarto grau para estimar curvas de equilíbrio higroscópico em produtos agrícolas.

$$U_e = (q_0 \cdot (UR) + q_1 \cdot (UR)^2 + q_2 \cdot (UR)^3) \cdot \exp[(p_0 + p_1 \cdot (UR) + p_2 \cdot (UR)^2 + p_3 \cdot (UR)^3 + p_4 \cdot (UR)^4) \cdot (T + p_5)] \quad (\text{Eq. 1.19})$$

em que

q_0, \dots, q_2 = parâmetros que dependem da natureza do produto

p_0, \dots, p_5 = parâmetros que dependem da temperatura

Os valores encontrados por SINÍCIO e ROA (1978) para feijão preto e ROA e MACEDO (1976) para feijão estão na Tabela 1.2.

TABELA 1.2 - Coeficientes da equação de Roa para feijão e feijão preto

Valores dos coeficientes da equação de Roa				
feijão preto				
$q_0 = 0,551293$	$q_1 = -1,058734$	$q_2 = 0,798426$	$p_0 = -0,00571$	$p_1 = 0,03667$
$p_2 = 0,10822$	$p_3 = -0,12353$	$p_4 = 0,05009$	$p_5 = -15,39$	
feijão				
$q_0 = 0,892910$	$q_1 = 0,636490$	$q_2 = -1,09250$	$p_0 = -0,00$	$p_1 = 0,03667$
$p_2 = 0,039437$	$p_3 = -0,035661$	$p_4 = 0,05009$	$p_5 = -15,39$	

CAVALCANTI MATA *et alii* (1984), determinaram as curvas de equilíbrio higroscópico para feijão macassar pelo método estático usando, para estabelecer as umidades relativas do ar, diferentes soluções saturadas de sais. As curvas foram obtidas para as temperaturas de 15, 25 e 35 °C e umidades relativas de 30, 40, 50, 60, 70 e 80 %. Os autores testaram as equações de Henderson, Day-Nelson, Chung-Pfost, Harkins e Smith, tendo concluído que a equação de Smith foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais. No entanto, CAVALCANTI MATA *et alii* (1985), estudando a histerese em feijão variedade "mulatinho" às temperaturas de 20 a 40 °C e umidades relativas de 20 a 90 %, testaram a equação de Henderson modificada conforme sugere as normas da Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas (ASAE-STANDARDS, 1984) tendo concluído que a equação não representa satisfatoriamente os dados experimentais e sugerem duas novas equações derivadas da equação de

Henderson . Os autores concluem que a melhor equação para representar as curvas de sorção e dessorção do feijão "mulatinho" para a faixa de temperatura e umidade relativa estudadas é do tipo:

$$U_e = \frac{\ln(1-UR) - K}{a_1 \cdot T^{a_2}} \quad (\text{Eq. 1.20})$$

em que

$$K = a_3 \cdot T^{a_4} \quad (\text{Eq. 1.21})$$

e a_1, a_2, a_3, a_4 são coeficientes que dependem da natureza do produto.

2.2. Calor latente de vaporização da água do produto

O calor latente de vaporização é definido como a energia requerida para evaporar a água do produto.

Até o momento, não se dispõe de uma teoria geral e exata para explicar como as moléculas de água se acham ligadas à estrutura dos grãos. No entanto, sabe-se que para romper essas ligações físico-químicas, a energia necessária para a mudança de fase da água (líquido-vapor) é significativamente maior que o calor necessário para evaporar, na mesma temperatura, a mesma quantidade de água (OTHMER, 1940).

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 pressões de vapor da água contida em sistemas porosos como grãos em equilíbrio com o ar (RODRIGUES-ARIAS, 1963; CASTELLAN, 1976).

$$\frac{dP_v}{dT_{abs}} = \frac{h_{fg} \cdot P_v}{R T_{abs}^2} \quad (\text{Eq. 1.22})$$

em que

P_v = pressão de vapor a uma dada temperatura absoluta T_{abs} e a uma dada condição de umidade de equilíbrio U_e , Pa

h_{fg} = calor latente molar de vaporização da água, $J \cdot kg \cdot mol^{-1}$

R = constante universal dos gases, $287 J \cdot kg \cdot mol^{-1} K^{-1}$

Portanto, segundo BROOKER *et alii* (1974), as curvas de umidades de equilíbrio fornecem elementos necessários para o cálculo do calor de vaporização da umidade. A energia necessária para evaporar a água do grão é dependente do teor de umidade e da temperatura e quanto menor o teor de umidade e temperatura dos grãos maior será o seu calor latente de vaporização.

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 como uma constante dentro de certo intervalo de temperaturas. Fazendo a integração da equação 1.22 tem-se:

$$\ln(P_v) = -\frac{h_{fg}}{R} \cdot \frac{1}{T_{abs}} + C_i \quad (\text{Eq. 1.23})$$

em que

C_i = constante de integração

Considerando-se válida a equação 1.22 para a água livre tem-se, neste caso, o valor da pressão como a pressão de saturação (P_{vs}). Desta forma, combinado as duas equações e integrando obtém-se:

$$\ln(P_v) = \frac{h'_{fg}}{h_{fg}} \cdot \ln(P_{vs}) + C_i \quad (\text{Eq. 1.24})$$

em que

h'_{fg} = calor latente de vaporização da água do grão, $J.kg^{-1}$

h_{fg} = calor latente de vaporização da água a determinada temperatura, $J.kg^{-1}$

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

$$P_v = UR \cdot P_{vs} \quad (\text{Eq. 1.25})$$

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, consequentemente, obtém-se h_{fg} .

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

$$h'_{fg} = h_{fg} \cdot (1 + 4,35 \cdot \exp(-28,25 U)) \quad (\text{Eq. 1.26})$$

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

$$h'_{fg} = (1795,44 - 0,811 \cdot T) \cdot (U)^{-0,346} \quad (\text{Eq. 1.27})$$

2.3. Calor específico

A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um corpo de 1 °C é denominada de capacidade calorífica do corpo, que é proporcional à sua massa. A capacidade calorífica por unidade de massa é denominada de calor específico e é dada pela seguinte equação:

$$c_p = \frac{C}{m} \quad (\text{Eq. 1.28})$$

em que

c_p = Calor específico, $\text{J.kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

C = Capacidade calorífica, $\text{J. } ^\circ\text{C}^{-1}$

m = Massa do corpo, kg

De acordo com TIPPLER (1984), como o calor específico da água varia apenas de 1% na faixa de temperatura de 0 °C a 100 °C, à pressão de 1 atm., podemos usualmente desprezar esta variação e considerar o calor específico da água como sendo de $4,186 \text{ kJ.kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ou $1,00 \text{ kcal.kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, no intervalo de temperatura de 0 °C a 100 °C.

Existem vários métodos para a determinação do calor específico:

1. A relação entre a condutividade térmica, a massa específica e a difusividade térmica.
2. O processo das misturas
3. Calorímetro de varredura diferencial
4. Calorimetria do gelo
5. Bomba calorimétrica

O método 1 consiste em determinar inicialmente a condutividade térmica, a massa específica e a difusividade térmica do corpo e calcular o calor específico usando-se a fórmula:

$$c_p = \frac{K}{\mu \cdot \alpha} \quad (\text{Eq. 1.29})$$

em que

K = Condutividade térmica, $\text{W.m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

μ = Massa específica, kg.m^{-3}

α = Difusividade térmica, $\text{m}^2 \text{ } \text{s}^{-1}$

Os métodos de 2 a 5 baseiam-se no equilíbrio térmico estabelecido entre o corpo cujo calor específico pretende-se determinar e um segundo corpo de calor específico conhecido.

A descrição destes métodos é encontrada em DISNEY (1954); WARATTEN *et alii* (1969) e CHAKRABARTI e JOHNSON (1972).

O método mais comum para determinação do calor específico de grãos e sementes é o método das misturas proposto por MOHSENIN (1980).

Alguns pesquisadores, ao invés de água como líquido calorimétrico, têm usado tolueno, cuja densidade é de 0,86 e o calor específico é de, aproximadamente, $1,63 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. A baixa densidade possibilita às sementes e grãos submergirem no líquido.

DUCAN *et alii* (1968) determinaram o calor específico de folhas de fumo com teor de umidade variando de 25 a 90 %, base seca, e obtiveram a seguinte relação:

$$c_p = 1403 + 239.U \quad (\text{Eq. 1.30})$$

em que

U = teor de umidade do produto, %, base seca.

Estudando a variação do calor específico em amêndoas de cacau, ALMEIDA (1979) concluiu que o calor específico aumenta com o teor de umidade e citou vários autores, entre eles WRIGHT e PORTERFIELD (1970), que observaram o aumento do calor específico com o teor de umidade para vários materiais biológicos.

A equação encontrada para expressar o calor específico do milho para a faixa de teor de umidade de 1 a 43 %, base seca, foi determinada por KAZARIAN e HALL (1965):

$$c_p = 1465 + 2,562.U \quad (\text{Eq. 1.31})$$

MORAES (1991) determinou o calor específico do feijão variedade “carioquinha” com a variação do teor de umidade de 16 a 44 %, base seca, tendo estabelecido apenas 4 pontos experimentais obtendo uma relação linear com coeficiente de determinação de 97,67%. A equação encontrada foi:

$$c_p = 1091,141 + 485,369.U \quad (\text{Eq. 1.32})$$

2.4. Forma e tamanho das sementes de feijão

A agricultura moderna utiliza no processamento de produtos vários métodos mecânicos, térmicos, elétricos, óticos e até mesmo técnicas sonoras. Apesar da aplicação sempre crescente das propriedades desses materiais, pouco se conhece sobre as características físicas básicas. Um conhecimento dessas propriedades pode contribuir com dados importantes e essenciais para a Engenharia, no projeto de máquinas, estruturas, processos e controles na análise e determinação da eficiência de uma máquina ou na sua operação, no desenvolvimento de novos produtos de origem vegetal e na avaliação e retenção da qualidade do produto final (MOHSENIN, 1978).

Nas pesquisas sobre transferência de calor e massa as soluções de alguns problemas são apresentadas na literatura, sob a forma de cartas ou gráficos. No entanto para o uso dessas soluções torna-se necessário uma estimativa exata das formas e dimensões do material. Como os grãos e sementes, de modo geral, não tem um formato geométrico precisamente definido, muitas das soluções são analisadas assumindo-se o produto como uma forma esférica, o que nos leva a uma série de considerações, aproximações e erros.

Com intuito de minimizar esses erros CURRAY (1951) conceituou a esfericidade como sendo a proximidade que um material está de uma esfera e propôs duas maneiras para sua determinação (Figura 1.1), baseado na definição expressa pela seguinte fórmula:

$$E = \frac{d_e}{d_c} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 1.33})$$

em que

E = esfericidade, em porcentagem

d_e = diâmetro de uma esfera de volume igual ao objeto, m

d_c = diâmetro de menor circunferência que circunscreve a projeção do objeto em repouso, m

MOHSENIN (1978), baseado neste conceito teórico propôs dois métodos para determinar a esfericidade:

Método 1

Considerando o objeto como um elipsóide e sendo o seu volume igual a $V_{\text{elip}} = 4/3 \cdot \pi \cdot (r_1 \cdot r_2 \cdot r_3)$, em que r_1 é o maior raio, r_2 é o raio médio e r_3 o menor raio e ainda levando em consideração que $a = 2 \cdot r_1$, $b = 2 \cdot r_2$ e $c = 2 \cdot r_3$ (Figura 1.1) tem-se:

$$E = \left[\frac{\text{Volume do sólido}}{\text{Volume da esfera circunscrita}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 1.34})$$

$$E = \left[\frac{4/3 \cdot \pi \cdot \left(\frac{a}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{c}{2} \right)}{4/3 \cdot \pi \cdot \left(\frac{a}{2} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}} = \frac{(a \cdot b \cdot c)^{\frac{1}{3}}}{a} \quad (\text{Eq. 1.35})$$

Método 2

$$E = \frac{d_i}{d_c} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 1.36})$$

em que

d_i = diâmetro da maior circunferência inscrita na projeção do objeto em repouso, m

QUENOVILLE (1952) determinou o volume (V) de uma mistura de variedade de milho por meio de uma equação de regressão múltipla, baseado nas determinações de a , b e c , tendo chegado à seguinte expressão:

$$\ln(V) = -6,18 + 0,8 \cdot \ln(a) + 0,71 \cdot \ln(b) + 0,68 \cdot \ln(c) \quad (\text{Eq. 1.37})$$

Os valores de a , b e c são dados em milímetros (mm). Entretanto, a variação deste volume com o teor de umidade, bem como as dimensões a , b e c correspondente ao comprimento largura e espessura do milho, não foram estudadas pelo autor.

CAVALCANTI MATA *et alii* (1986), estudaram a variação do comprimento, largura e espessura, além da área e do volume de grãos de algaroba, cacau, feijão macassar, feijão

mulatinho, mamona e milho, para teores de umidade variando de 4,0 a 17%, base úmida. Para o feijão mulatinho e o feijão macassar as expressões encontradas foram:

Feijão mulatinho

$$\ln(V) = 2,5824 - 0,1296.\ln(a) + 1,4749.\ln(b) + 0,1593.\ln(c) \quad (\text{Eq. 1.38})$$

Feijão macassar

$$\ln(V) = 0,5379 + 0,1688.\ln(a) + 0,8471.\ln(b) + 2,0677.\ln(c) \quad (\text{Eq. 1.39})$$

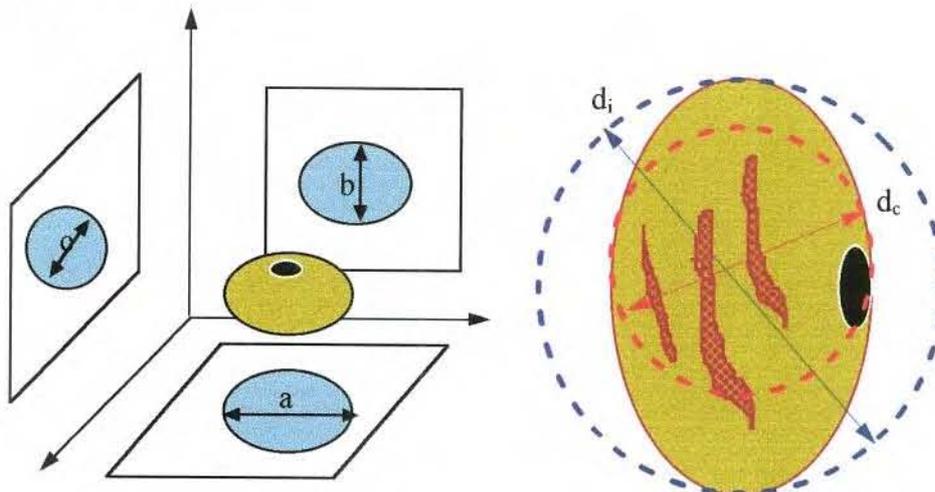
Sabendo-se o volume do produto e sua esfericidade é possível fazer uma consideração sobre que esfericidade pode ser assumida pelo produto e, desta forma, realizar análises como se o produto fosse uma esfera. Um desses empregos pode ser feito nos fenômenos físicos de transferência de calor e massa. Outros autores, entre os quais ALMEIDA (1980) e SOARES (1986), tem preferido para estudar a transferência de calor e massa no processo de secagem o emprego do conceito de transformar o produto estudado em uma esfera equivalente a este produto. Para isso MOHSENIN (1978) sugere que o raio da esfera equivalente em volume ao grão ou semente seja calculado pela equação:

$$r = \frac{\sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}}{2} \quad (\text{Eq. 1.40})$$

em que

r = raio da esfera equivalente de volume igual ao do produto, m
 a, b, c = eixos axiais do produto, m

Esfericidade



$$E = \frac{(a \cdot b \cdot c)^{1/3}}{a}$$

Método 1

$$E = \frac{d_i}{d_c}$$

Método 2

FIGURA 1.1 - Métodos de determinação da esfericidade definida para grãos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta etapa do presente trabalho foi realizada no Laboratório de Processamento e Armazenagem de Produtos Vegetais do Departamento de Engenharia Agrícola, utilizando equipamentos do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

Para a realização desta pesquisa foram utilizadas sementes de feijão, variedade "carioca", plantado no Colégio Agrícola da Universidade Estadual da Paraíba no município de Lagoa Seca - Estado da Paraíba.

O feijão foi colhido com um teor de umidade em torno de 45 % base seca (b.s.) e, ainda na vagem, foi levado ao laboratório sendo seco à temperatura ambiente até atingir um teor de umidade em torno de 35% (b.s.), quando foi procedida a debulha manual. O material, assim obtido, foi subdividido em 2 lotes: a) 5 kg para obtenção do teor de umidade de equilíbrio por sorção e dessorção e calor latente de vaporização e b) 5 kg para determinação do calor específico.

3.1. Equilíbrio higroscópico

Os 5 kg de sementes de feijão foram acondicionados em sacos plásticos subdivididos de 100 em 100 gramas. Para o acondicionamento das sementes (teor de umidade de 35% b.s.) usou-se três sacos sobrepostos para evitar troca de umidade com o ambiente e foram armazenados em congelador a uma temperatura de, aproximadamente, 1°C, a fim de manter as características do feijão até a instalação do experimento.

3.1.1. Determinação dos teores de umidade de equilíbrio

Os teores de umidade de equilíbrio das sementes foram determinados por meio do método estático, utilizando-se 9 diferentes concentrações de ácido sulfúrico para uma faixa de umidade relativa de 10 a 90 % , determinadas usando-se um psicrômetro colocado no interior dos recipientes de vidro e comparadas com os valores citados por BROOKER *et alii* (1974) e por WEAST (1983) (Tabela 1.3). Os testes foram conduzidos às temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 °C \pm 1 °C. Para tanto, três câmaras FANEN tipo B.O.D. modelo 347, foram utilizadas com a finalidade de manter as amostras às temperaturas e umidades relativas desejadas, permitindo a realização do trabalho em duas etapas. Na primeira etapa, as três câmaras foram ajustadas para 10, 20 e 30 °C, e na segunda etapa para 40, 50 e 60 °C. Essas temperaturas eram verificadas regularmente com o auxílio de termômetros colocados no interior de cada câmara.

Amostras de aproximadamente 60 gramas foram colocadas em pequenas cestas de arame e suspensas por um anel de vidro sobre soluções de ácido sulfúrico nas diferentes concentrações. As cestas com as sementes de feijão foram colocadas no interior de recipientes de vidro hermeticamente fechados. A capacidade do recipiente era de 1,6 litros, contendo 250 ml de solução de ácido sulfúrico com aproximadamente 96 G.L. e densidade 1,835 \pm 0,001 (Figura 1.2).

TABELA 1.3 - Diferentes concentrações de ácido sulfúrico para estabelecer no interior dos recipientes as umidades relativas do ar para as temperaturas entre 10 e 60 °C.

Temperaturas °C	Concentrações de ácido sulfúrico (%)								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
10	66,9	58,9	52,4	46,7	41,4	36,3	31,1	25,6	19,4
20	66,9	58,9	52,4	46,7	41,4	36,3	31,1	25,6	19,4
30	70,0	60,4	53,3	47,2	41,4	36,3	31,1	25,6	19,4
40	72,3	61,5	54,0	47,8	42,1	36,7	31,2	25,6	19,4
50	73,5	62,4	54,7	48,3	42,6	37,2	31,9	26,3	20,1
60	88,0	65,0	55,9	49,0	43,0	37,4	31,9	26,3	20,1

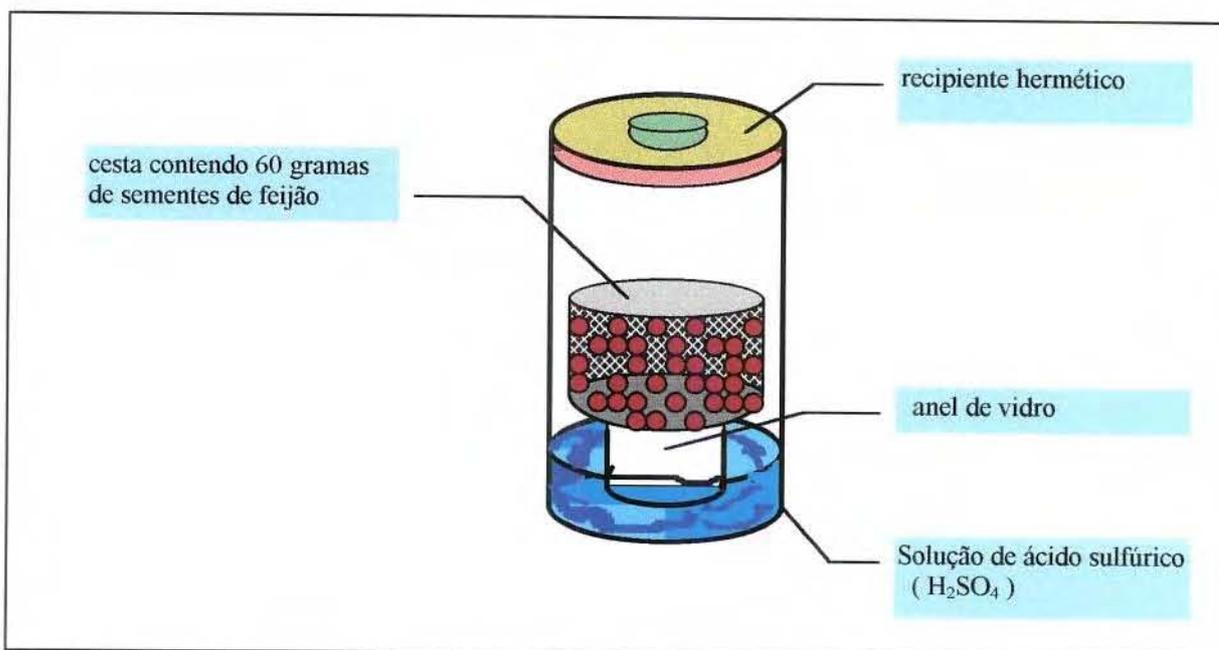


FIGURA 1.2 - Recipiente hermético utilizado na determinação da umidade de equilíbrio.

Para se obter dados de umidade de equilíbrio higroscópico, foram colocadas amostras em 9 (nove) recipientes, contendo 9 (nove) diferentes concentrações de ácido sulfúrico (H₂SO₄) em cada câmara, correspondente a cada temperatura desejada, com duas repetições. Isso implicou num total de 18 (dezoito) recipientes no interior de cada câmara, distribuídos aleatoriamente.

As cestas com as amostras, com teor de umidade inicial determinado previamente, foram pesadas de dois em dois dias até o 6º (sexto) dia depois de ter sido montado o experimento.

Depois deste prazo, foram feitas pesagens a cada vinte e quatro horas, até que a variação da massa da amostra fosse inferior ou igual a 0,001g. Para este propósito foi utilizada uma balança analítica Mettler modelo PC 400, com precisão de 0,001g.

A cada pesagem, os recipientes eram trocados aleatoriamente de lugar, dentro da câmara.

A amostra em equilíbrio foi subdividida em 3 (três) sub-amostras e seus teores de umidade foram determinados pelo método de estufa, a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 24 horas.

Depois de obtida as curvas de dessecção o restante das sementes de feijão que não foram destinadas à determinação do teor de umidade foram secas até 4% b.s. Estas sementes de feijão com 4 % de umidade b.s. foram acondicionadas por 7 dias em recipientes hermeticamente vedados com a finalidade de homogeneizar a amostra. Depois deste período as sementes foram colocadas nos recipientes contendo as diferentes soluções de ácido sulfúrico com a finalidade de obter as curvas de sorção. Os processos de obtenção dos dados e determinação do teor de umidade de equilíbrio das sementes de feijão seguem os mesmos passos descritos para determinação do teor de umidade de equilíbrio higroscópico do feijão por dessecção.

Neste trabalho o autor propõe estudar o ajuste da equação de Henderson modificando-a apenas no termo em T, onde se acrescenta um potencial de forma a corrigir os desvios em T. Desta forma a equação a ser ajustada é:

$$1 - UR = \exp [-a.(T^b).(Ue^c)] \quad (\text{Eq. 1.41})$$

Além dessa equação acima foram testadas também as equações de Gab, Henderson modificada e de Roa. Com a finalidade de encontrar os coeficientes das equações citadas, os dados obtidos experimentalmente foram submetidos a uma análise de regressão não linear usando o programa computacional STATISTICA 5.0, onde usou-se os métodos numéricos de Rosenbrock e quasi-Newton e de Hooke-Jeeves e quasi-Newton.

3.2. Calor latente de vaporização

Com os dados obtidos das isotermas de dessecção do feijão e calculados os parâmetros da equação de Henderson modificada*, foram determinados os valores de umidade relativa para as umidades de equilíbrio de 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 % b.s., e às temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 $^\circ\text{C}$.

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

$$P_{vs} = \text{EXP} [(-7511,52/T_{abs}) + 89,63121 + 0,02399897. T_{abs} - 12,150799. \text{Ln} (T_{abs}) + 2,0998405.10^{-11} . (T_{abs})^4 - 1,1654551.10^{-5} .(T_{abs})^2 - 1,2810336.10^{-8} .(T_{abs})^3] / 0,1333 \quad (\text{Eq. 1.42})$$

* o asterisco na seqüência deste texto representa a equação de Henderson modificada por este autor

em que

$$T_{abs} = (T + 273,16)$$

T_{abs} = Temperatura, K

T = Temperatura, °C

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

h'_{fg} = calor latente de vaporização da água do feijão, $J.kg^{-1}$

h_{fg} = calor latente de vaporização da água, $J.kg^{-1}$

$$\text{Desta forma } h'_{fg} = h_{fg} \cdot \text{coef. angular}$$

em que

$$h_{fg} = 606 - 0,57.T \quad (\text{Eq. 1.43})$$

Obtidos os valores de h'_{fg} , estes foram correlacionados com as temperaturas e teores de umidade de equilíbrio, por meio de regressão não linear usando o programa computacional ESTATISTICA 5.0, já mencionado, sendo a equação de ajuste expressa da seguinte forma:

$$h'_{fg} = (606 - 0,57.T) \cdot (1 + a \cdot \exp(b.U_r)) \quad (\text{Eq. 1.44})$$

em que

U_r = Teor de umidade do feijão, % base seca

3.3. Calor específico

O calor específico do feijão “carioca” foi determinado para teores de umidade variando de 5 a 45% b.s. Para tanto, foram colhidos 150 gramas de feijão na vagem com teor de umidade de 45% b.s., este foi debulhado manualmente e feita a determinação do calor específico. Para os teores de umidade de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 % b.s., as sementes foram secas em uma estufa FANEN 330 a 40 °C.

3.3.1. Determinação do calor específico do feijão em função dos teores de umidade.

O calor específico do feijão foi determinado pelo método das misturas. Para este fim, foi usado um calorímetro construído no Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, constituído por uma garrafa térmica de volume igual a 1000 ml, isolada com lã de vidro e instalada dentro de um tubo de PVC de 150 mm de diâmetro e vedada com rolha de borracha, como mostra a Figura 1.3.

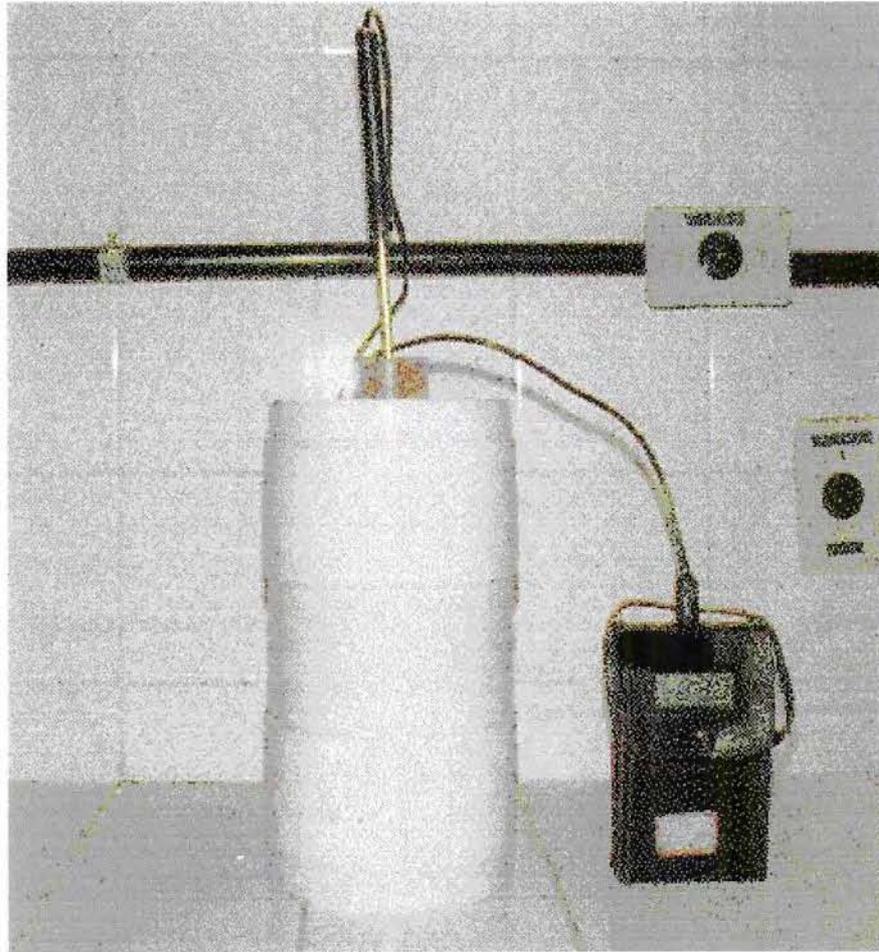


FIGURA 1.3 - Calorímetro

3.3.2. Determinação da capacidade calorífica do calorímetro.

Para se determinar a capacidade calorífica do calorímetro, usou-se 100 g de água destilada no estado natural, a qual foi colocada no interior do calorímetro. Agitou-se o calorímetro por 3 minutos e, em seguida, com o auxílio de um termômetro digital com precisão de 0,1 °C foi determinada a temperatura T_1 . Depois desse equilíbrio térmico, colocou-se mais 100 g de água destilada a uma temperatura em torno de 3 °C dentro do calorímetro e mediu-se a temperatura T_3 , depois do novo equilíbrio térmico.

Com os valores das temperaturas T_1 , T_2 e T_3 e das massas m_1 e m_2 , calculou-se a capacidade calorífica do calorímetro pela equação:

$$c_a m_1 (T_1 - T_3) + C_{cal} (T_1 - T_3) = c_a m_2 (T_3 - T_2) \quad (\text{Eq. 1.45})$$

em que

C_{cal} = Capacidade calorífica do calorímetro, cal. °C⁻¹

c_a = Calor específico da água, cal.g⁻¹. °C⁻¹

m_1 = massa de água no estado natural, g

m_2 = massa de água fria, g

T_1 = Temperatura da água no estado natural, °C

T_2 = Temperatura da água fria, °C

T_3 = Temperatura de equilíbrio térmico entre as duas massas de água, °C

Obtidas as temperaturas T_1 , T_2 e T_3 e a capacidade calorífica do calorímetro colocou-se uma amostra de feijão a uma temperatura (ambiente) T_4 dentro do calorímetro, agitou-se por, aproximadamente, 3 minutos e mediu-se a temperatura de equilíbrio da mistura, T_5 .

O calor específico do feijão “carioca” foi determinado pela seguinte equação:

$$m_p \cdot c_p \cdot (T_4 - T_5) = c_a \cdot m \cdot (T_5 - T_3) + C_{cal} \cdot (T_5 - T_3) \quad (\text{Eq. 1.46})$$

em que

c_p = Calor específico do feijão, $\text{cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

m_p = Massa do feijão, g

m = Massa de água ($m_1 + m_2$), g

T_4 = Temperatura do feijão, °C

T_5 = Temperatura de equilíbrio térmico entre a massa de água e do feijão, °C

3.4. Determinação do tamanho das sementes e do raio da esfera equivalente

Foram selecionadas 2000 gramas de sementes de feijão colhidas manualmente no campo experimental da Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba-EMEPA com aproximadamente 47 % de umidade, base úmida, segundo seu padrão, descartando-se impurezas, sementes quebradas, pequenas sementes e outras sementes. O material foi subdividido em etapas sucessivas em um separador ELO até a obtenção de um grupo de 60 sementes subdividida em 3 grupos constituindo as repetições.

Parte do material restante (40 gramas) foi utilizado para determinação do teor de umidade na estufa a 105 °C por 24 horas.

Depois de pesado o material e de posse do conhecimento do teor de umidade inicial desejado (45% base úmida), as sementes eram projetadas segundo suas áreas frontal, lateral e de repouso com auxílio de um retroprojetor 3M. A projeção era desenhada e estabelecida sua escala. Neste desenho foi determinado o comprimento, a largura e a espessura das sementes de feijão com auxílio de um paquímetro Mitutoyo com precisão de 0,02 mm. Nestas mesmas sementes fazia-se o acompanhamento da perda de peso e assim que esta atingissem o outro teor de umidade desejado era realizado novo processo de medição. As determinações das variações de comprimento, largura e espessura das sementes de feijão foram feitas para os teores de umidade de 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 e 45 %, base úmida.

Para obtenção do raio equivalente da esfera foi utilizada a equação 1.40. descrita neste Capítulo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes as isotermas de dessorção, sorção, calor latente de vaporização e calor específico das sementes de feijão variedade “carioca” são descritos a seguir.

4.1. Equilíbrio higroscópico das isotermas de dessorção e sorção

Os teores de umidade de equilíbrio das sementes de feijão “carioca” foram atingidos entre 9 e 32 dias para as temperaturas de 10 a 60 °C, como é mostrado na Tabela 1.4. Nesta tabela observa-se que o equilíbrio higroscópico é atingido em menor tempo com o aumento da temperatura do ar. Esta constatação também foi feita por WHITE (1972), KOSOSKY (1977) SILVA (1979) e BRAGA (1991).

As umidades de equilíbrio higroscópico de sementes de feijão “carioca” obtidas por dessorção e sorção, para as temperaturas e umidades relativas indicadas na Tabela 1.3 são mostradas respectivamente nas Tabelas 1.5 e 1.6.

TABELA 1.4 - Número médio de dias decorridos para alcançar o equilíbrio higroscópico do feijão para diferentes temperaturas

	Temperaturas					
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Número de Dias	32	25	20	15	12	9

TABELA 1.5 - Teores de umidade de equilíbrio higroscópico de sementes de feijão “carioca”, obtidos por dessorção

Umidade Relativa (decimal)	Temperatura (°C)					
	10	20	30	40	50	60
	Umidade de equilíbrio (% base seca)					
0,1	6,1	5,3	4,9	4,6	4,4	4,2
0,2	7,8	6,9	6,4	6,1	5,9	5,7
0,3	9,5	8,4	7,9	7,5	7,3	7,0
0,4	11,2	10,1	9,4	9,0	8,6	8,4
0,5	13,2	11,8	11,0	10,5	10,1	9,8
0,6	15,4	13,8	12,9	12,4	11,9	11,5
0,7	18,3	16,3	15,3	14,6	14,1	13,6
0,8	22,2	19,7	18,4	17,6	16,9	16,4
0,9	29,1	25,5	23,8	22,6	21,7	21,0

TABELA 1.6 - Teores de umidade de equilíbrio higroscópico de sementes de Feijão "carioca", obtidos por sorção

Umidade Relativa (decimal)	Temperatura (°C)					
	10	20	30	40	50	60
	Umidade de equilíbrio (% base seca)					
0,1	5,6	4,8	4,5	4,3	4,2	4,0
0,2	7,0	6,2	5,8	5,6	5,5	5,3
0,3	8,3	7,5	7,1	6,8	6,7	6,4
0,4	9,4	8,5	7,9	7,8	7,5	7,4
0,5	11,0	9,6	9,2	9,1	8,9	8,8
0,6	13,0	11,8	11,3	11,3	11,0	10,7
0,7	16,3	14,6	14,0	13,8	13,5	13,0
0,8	20,6	18,5	17,5	17,0	16,5	16,0
0,9	28,3	24,8	23,2	22,2	21,4	20,7

Os dados experimentais das isotermas de dessorção do feijão "carioca" e os calculados pela equação de Gab, Henderson modificada, Henderson modificada por este autor e Roa estão respectivamente nas Figuras 1.4, 1.5, 1.6 e 1.7 e o das isotermas de sorção nas Figuras 1.8, 1.9, 1.10 e 1.11, respectivamente. Observa-se nestas figuras que a equação de Gab para sementes de Feijão tem uma tendência a apresentar uma aproximação satisfatória entre os dados experimentais e calculados até a umidade relativa de 50%. A partir desta umidade relativa as isotermas começam a se distanciar dos dados experimentais, sendo observado que os coeficientes de determinação para essa equação são inferiores às demais equações ajustadas, ou seja, 95,27% para as isotermas de dessorção e 91,29% para as isotermas de sorção. Estas constatações confirmam observações feitas por BROOKER *et alii* (1974) de que algumas equações apresentadas na literatura para grãos só conseguem expressar satisfatoriamente as isotermas de dessorção até umidades relativas do ar próximas a 50%. Por isso foram sugeridas as equações semi-empíricas derivadas da proposta por HENDERSON (1952). É possível constatar nas isotermas de dessorção e sorção, respectivamente Figuras 1.6 e 1.10, que a equação de Henderson modificada por este autor apresenta um coeficiente de determinação superior a equação de Gab e Henderson modificada. No entanto a equação de Roa que é uma equação empírica apresenta um coeficiente de determinação superior as essas equações (Gab, Henderson modificada e Henderson modificada por este autor) para as isotermas de dessorção e sorção, respectivamente 99,55% e 99,57%. Devido à facilidade de manuseio da equação de Henderson modificada por este autor e o coeficiente de determinação ser muito próximo ao da equação de Roa (99,03% para 99,55%) as curvas de dessorção podem ser expressas por esta equação. Todavia, para as isotermas de sorção, a diferença passa a ser maior, de 99,57% (Roa) para 97,76%, o que pode implicar em erros consideráveis na determinação do potencial de secagem do produto. Assim, parece mais conveniente para uso em secagem e simulação de processos, onde é necessário prever o reumedecimento do produto, utilizar a equação empírica de Roa. Segundo FORTES e OKOS (1978), para meios porosos a equação das isotermas de dessorção e ou adsorção são de fundamental importância porque esta é a relação básica que governa o mecanismo de secagem.

É interessante observar que a equação de Gab, quando a regressão é feita para cada temperatura isoladamente, os coeficientes de determinação são bastante expressivos ou seja superiores a 99 %, como mostra a Tabela 1.7. No entanto, quando os coeficientes da equação, K e C, são colocados em função da temperatura este coeficiente de determinação cai para valores abaixo dos encontrados para as outras equações. Como os coeficiente K e C têm significado físico e são expressos pelas equações 1.5 e 1.6, tentou-se melhorar estas expressões e selecionar a melhor equação dentre 25 tipos de equações mais convencionais, mostradas na Tabela 1.8. A melhor equação para os coeficientes foi selecionada e nova regressão não-linear foi realizada incorporando-se os parâmetros dessa equação nos coeficientes de uma equação genérica. Mesmo assim os coeficientes de determinação obtidos para uma equação genérica são inferiores a 95,3% e, conseqüentemente, inferiores às outras equações propostas para serem analisadas. As melhores equações para representar os coeficientes C e K e a variação da Umidade na monocamada com a temperatura (U_m), representadas nas Figuras 1.4 e 1.8, são:

$$C = c_1 + c_2 \cdot T + \frac{c_3}{T} \quad (\text{Eq. 1.48})$$

$$K = k_1 + k_2 \cdot T + \frac{k_3}{T} \quad (\text{Eq. 1.49})$$

$$U_m = u_1 + u_2 \cdot \ln(T) \quad (\text{Eq. 1.47})$$

TABELA 1.7 - Coeficientes da equação de Gab para as isotermas de dessorção e sorção obtidos por regressão não linear para cada temperatura

Isotermas de dessorção				
Temperatura °C	Coeficientes da Equação de Gab			Coeficiente de Determinação R ²
	C	K	U _m	
10	21,92487	0,796074	8,373256	99,95
02	19,07676	0,782874	7,676144	99,94
30	18,28167	0,780860	7,217192	99,95
40	16,97449	0,775034	6,995006	99,95
50	16,96252	0,773675	6,744309	99,96
60	16,36479	0,772371	6,558963	99,97
Isotermas de sorção				
Temperatura °C	Coeficientes da Equação de Gab			Coeficiente de Determinação
	C	K	U _m	
	37,42459	0,8557	6,56590	99,97
	28,56402	0,8443	6,04492	99,92
	24,22705	0,8353	5,86696	99,89
	19,21372	0,8185	5,98788	99,87
	19,09746	0,8134	5,88035	99,83
	17,64253	0,8085	5,78647	99,91

TABELA 1.8 - Equações de Regressão (25 tipos) aplicadas aos coeficientes da equação de Gab para as isotermas de desorção e sorção - Programa - CURVEFIT.

EQUATIONS FITTED USING THIS PROGRAM			
1. $Y=A+B*X$	STR. LINE	2. $Y=B*X$	LINE THRU ORG.
3. $Y=1/(A+B*X)$	REC. STR LINE	4. $Y=A+B*X+C/X$	LIN AND RECIP.
5. $Y=A+B/X$	HYPERBOLA	6. $Y=X/(A*X+B)$	RECIP HYPERBOLA
7. $Y=A+B/X+C/X*X$	2ND ORD HYP	8. $Y=A+B*X+C*X*X$	PARABOLA
9. $Y=A*X+B*X*X$	PAR AT ORIGIN	10. $Y=A*X^B$	POWER
11. $Y=A*B^X$	MOD. POWER	12. $Y=B^(1/X)$	ROOT
13. $Y=A*X^(B*X)$	SUPER GEOMET.	14. $Y=A*X^(B/X)$	MOD GEOMETRIC
15. $Y=A*e^(B*X)$	EXPONENTIAL	16. $Y=A*e^(B/X)$	MOD EXPONENTIAL
17. $Y=A+B*ln(X)$	LOGARITHMIC	18. $Y=1/(A+B*ln(X))$	RECIP LOG
19. $Y=A*B^X*X^C$	HOERL FUNCTION	20. $Y=A*B^(1/X)*X^C$	MOD HOERL
21. $Y=A*e^(((X-B)^2)/C)$	NORMAL	22. $Y=A*e^(((ln(X)-B)^2)/C)$	LOG NORMAL
23. $Y=A*X^B*(1-X)^C$	BETA	24. $Y=A*(X/B)^C*e^(X/B)$	GAMMA
25. $Y=1/(A+(X+B)^2+C)$	CAUCHY		

NOTES: A. Values of X and Y may be positive, negative, or zero
 B. Only 255 values of X and Y can be used.

Press <RETURN> to continue program execution

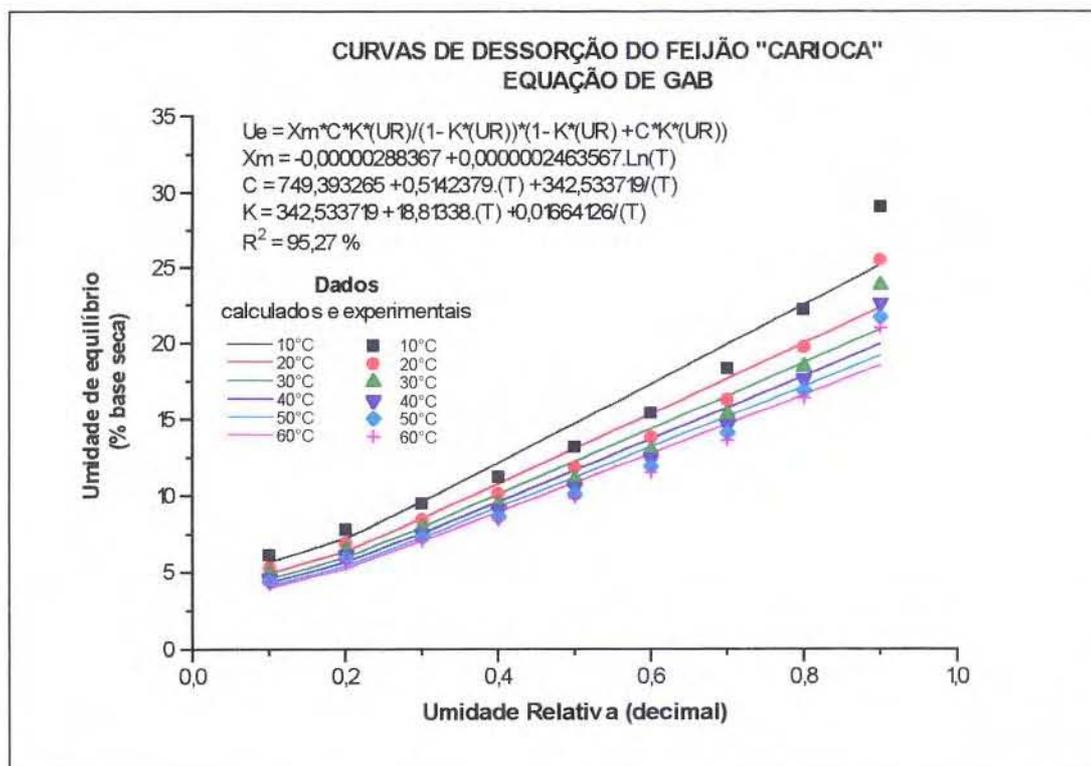


FIGURA 1.4 - Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de GAB - curvas de desorção.

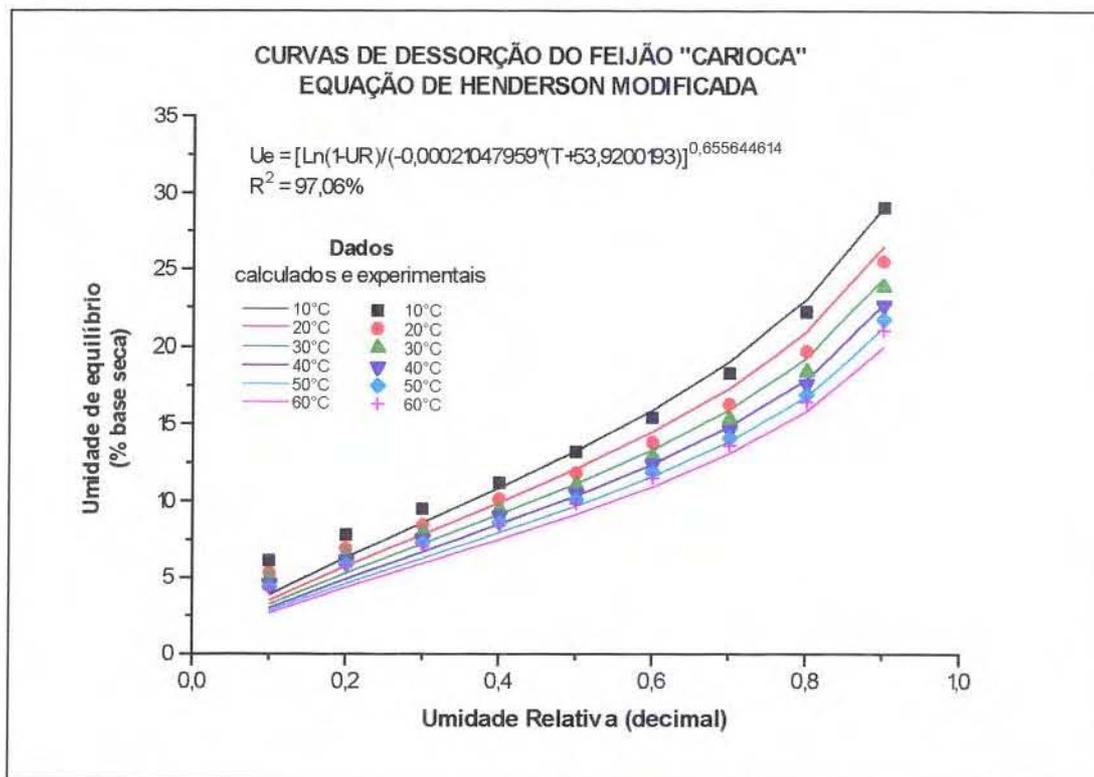


FIGURA 1.5 - Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de HENDERSON- MODIFICADA - curvas de dessecção.

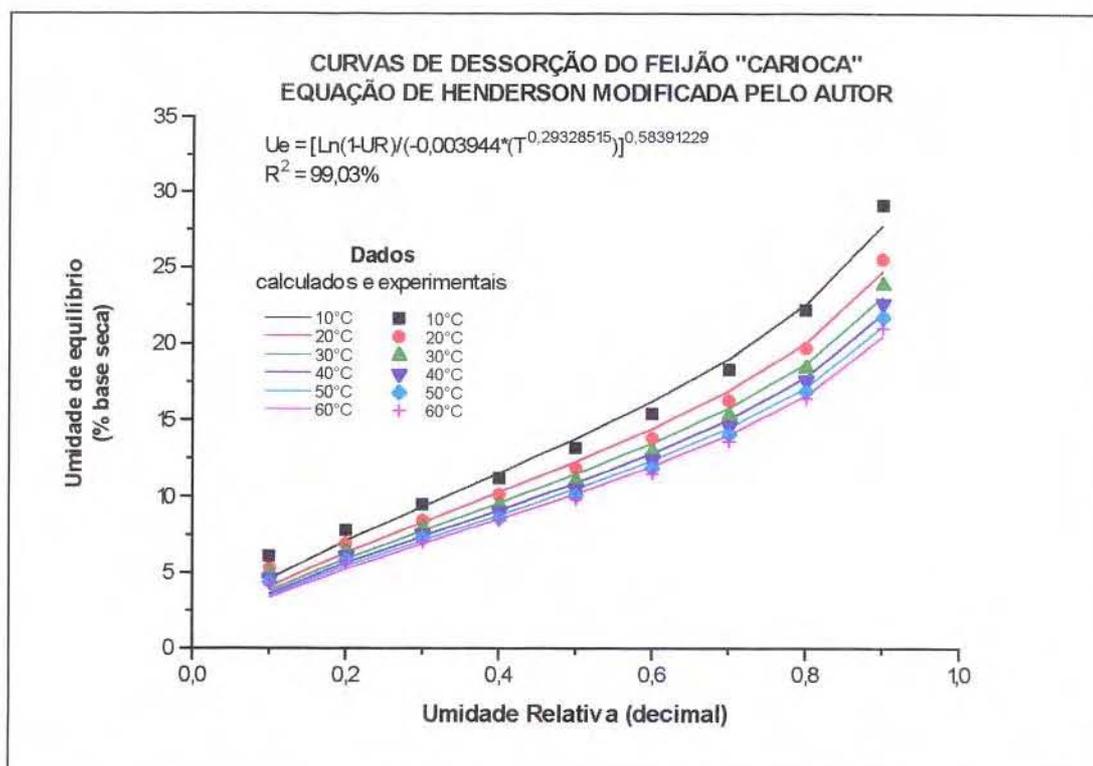


FIGURA 1.6 - Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de HENDERSON- MODIFICADA* - curvas de dessecção.

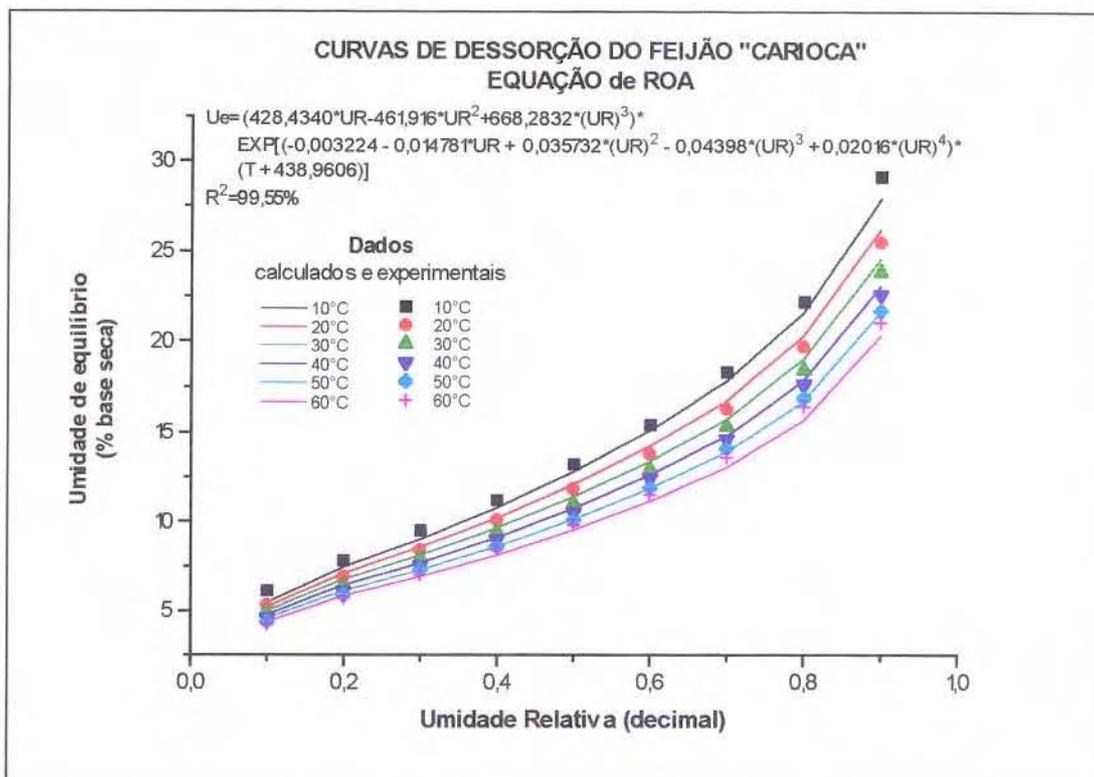


FIGURA 1.7 - Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de ROA - curvas de dessecção.

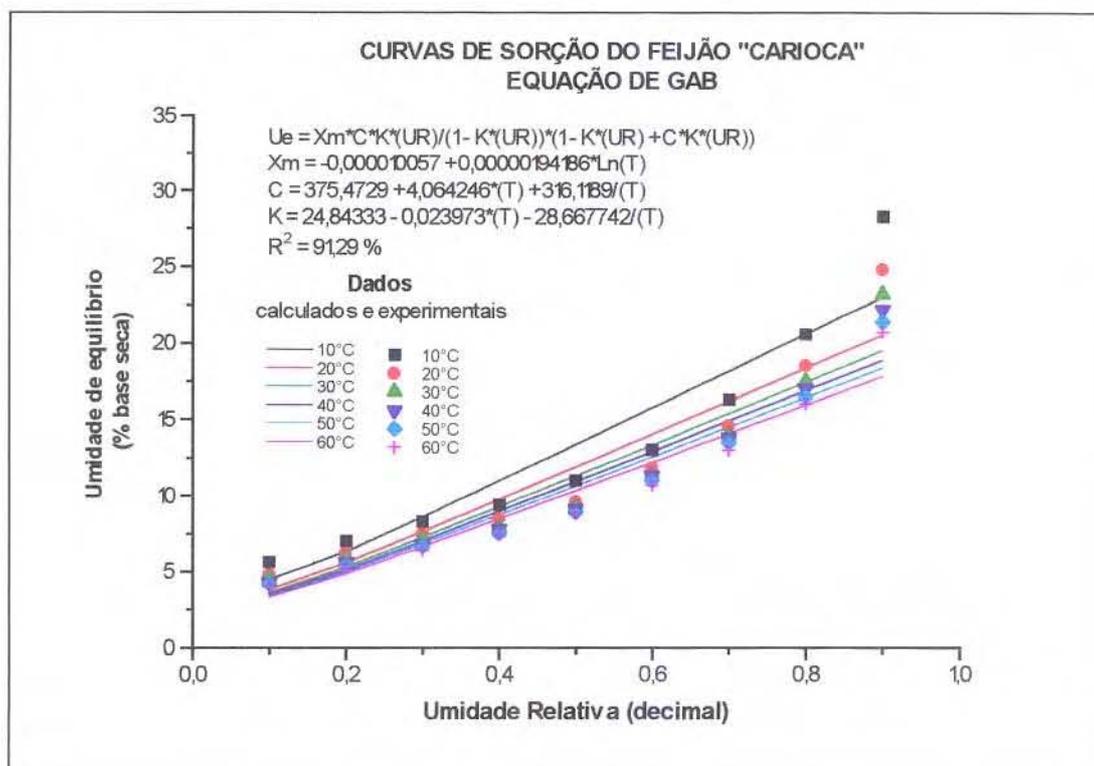


FIGURA 1.8 - Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de GAB - curvas de sorção.

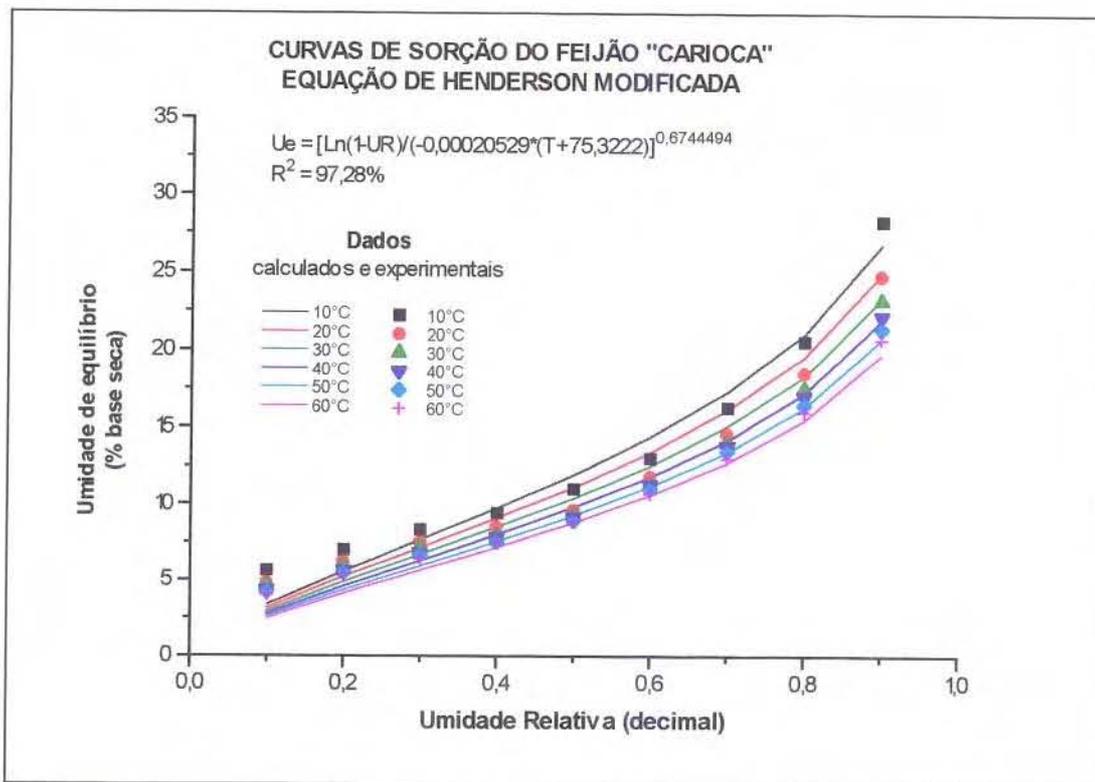


FIGURA 1.9 - Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de HENDERSON- MODIFICADA - curvas de sorção.

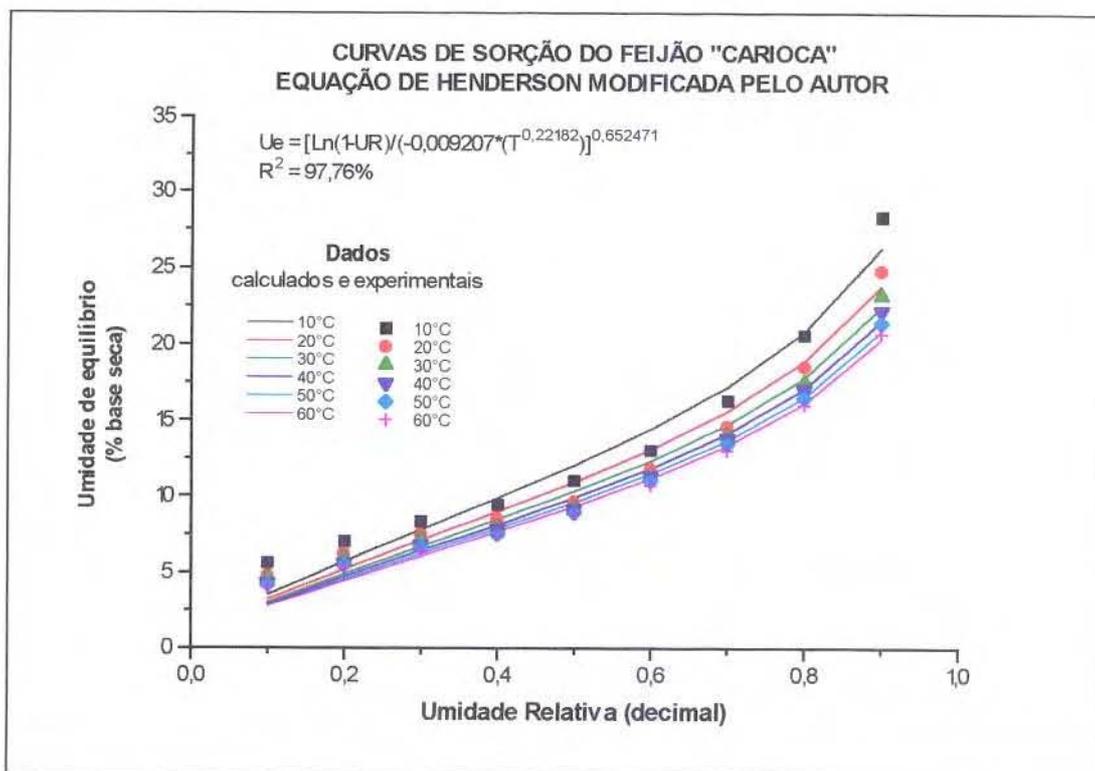


FIGURA 1.10 - Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de HENDERSON- MODIFICADA* - curvas de sorção.

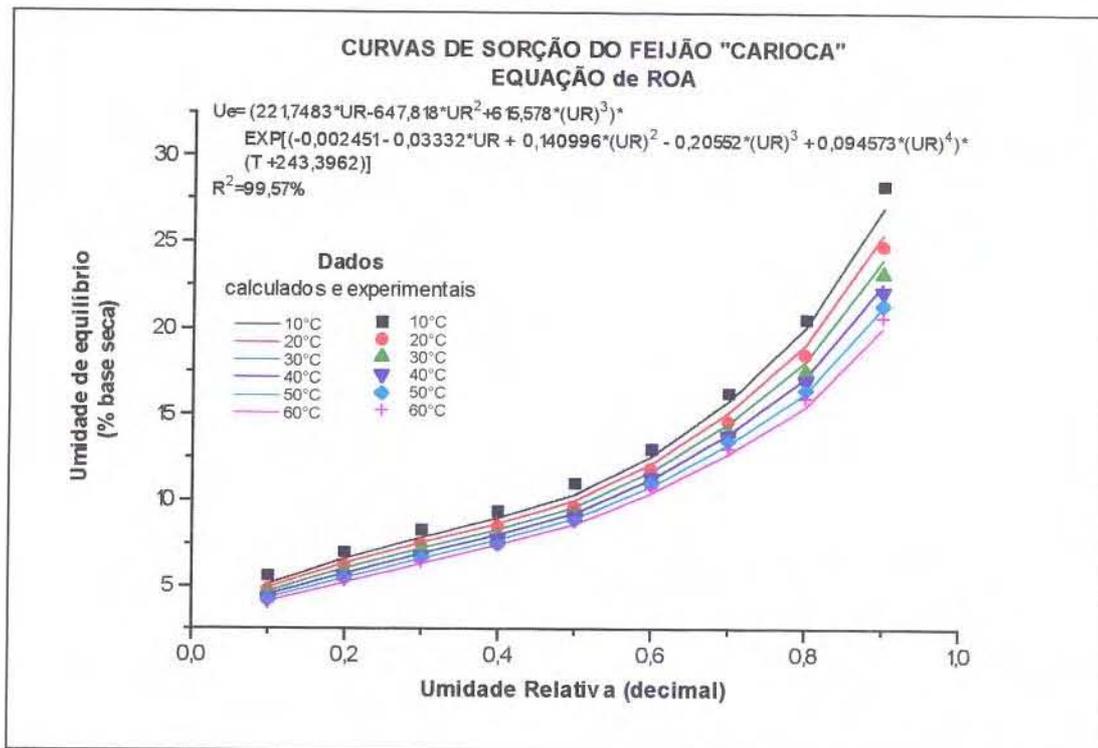


FIGURA 1.11 - Dados experimentais e calculados dos teores de umidade de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “carioca” ajustadas pela equação de ROA - curvas de sorção.

A histerese das sementes de feijão “carioca”, que é a diferença entre os valores dos teores de umidade de equilíbrio obtidos pelo fenômenos de dessorção e sorção são mostrados na Tabela 1.9. Nesta Tabela observa-se que a maior diferença encontrada foi de 2,4 pontos percentuais à temperatura de 10 °C e umidade relativa de 60%, seguida de uma diferença de 2,2 pontos percentuais obtidas às temperaturas de 10 e 20 °C e umidade relativa do ar de 50%

TABELA 1.9 - Diferença entre os teores de umidade de equilíbrio obtidos pelos fenômenos de dessorção e sorção.

Umidade Relativa (decimal)	Temperatura (°C)					
	10	20	30	40	50	60
	Diferença entre as curvas de sorção e dessorção (histerese)					
0,1	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2
0,2	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4
0,3	1,2	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6
0,4	1,8	1,6	1,5	1,2	1,1	1,0
0,5	2,2	2,2	1,8	1,4	1,2	1,0
0,6	2,4	2,0	1,6	1,1	0,9	0,8
0,7	2,0	1,7	1,3	0,8	0,6	0,6
0,8	1,6	1,2	0,9	0,6	0,4	0,4
0,9	0,8	0,7	0,6	0,4	0,3	0,3

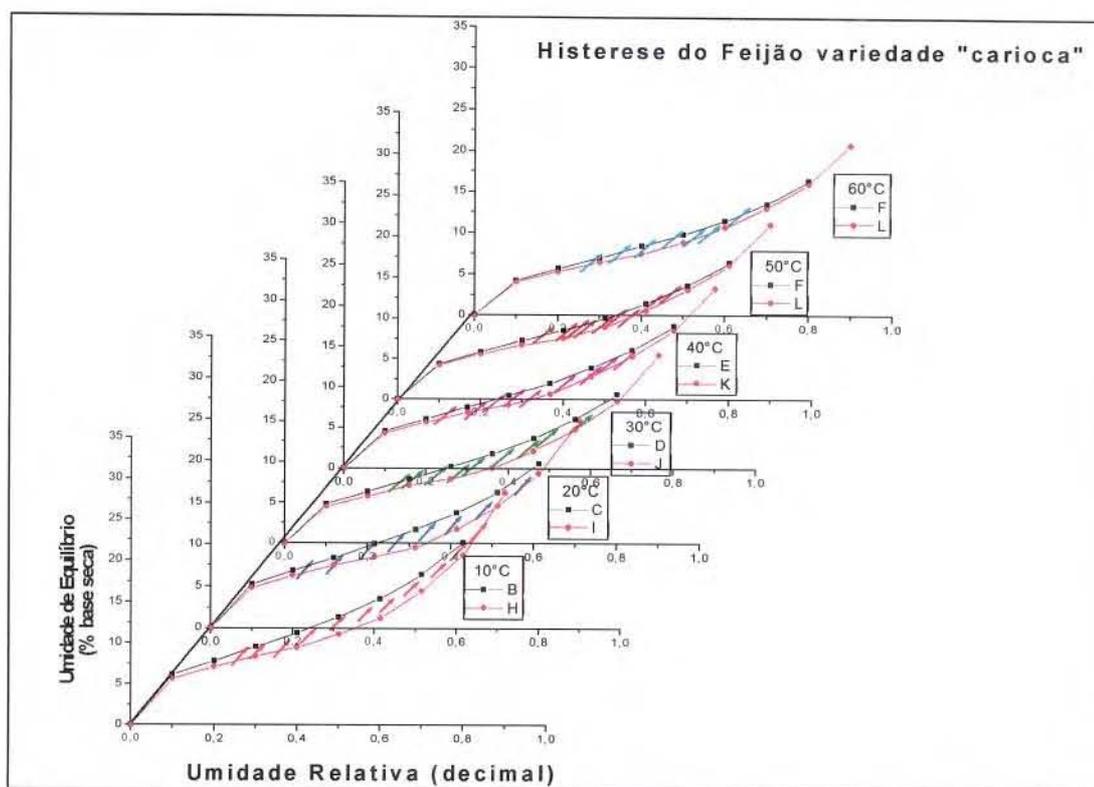


FIGURA 1.12 - Curvas de desorção e sorção do feijão “carioca” e visualização da histerese

Constata-se ainda na Tabela 1.9 e na Figura 1.12 que existe uma tendência de diminuição da histerese com o aumento da temperatura. É possível também observar que a histerese cresce, para todas as temperaturas estudadas, da umidade relativa de 0,1 até 0,5 ou 0,6 e a partir desta umidade relativa decresce até a umidade relativa de 0,9. Este fato, também foi observado por CAVALCANTI MATA *et alii* (1985) com sementes de feijão mulatinho só que o crescimento da histerese se dava até a umidade relativa de 60 % para as temperaturas de 20 e 30 °C e até 50 % para a temperatura de 40 °C. BRAGA e CAVALCANTI MATA (1992), estudando a histerese em milho branco também constataram fatos semelhantes.

4.2. Calor latente de vaporização

Na Tabela 1.10 estão as umidades relativas de equilíbrio obtidas pela equação de Henderson modificada* para o feijão “carioca”, e determinadas para os teores de umidade do feijão de 5 a 35 % base seca e temperaturas de 10 a 60 °C. Com os dados da umidade relativa de equilíbrio, determinou-se a pressão de vapor da umidade das sementes de feijão “carioca”. Como já foi mencionado no item 3, a Pressão de vapor (P_v) é obtida pela equação $P_v = UR \cdot P_{vs}$ onde P_{vs} é determinado pela equação (Eq. 1.42).

O logaritmo neperiano dos dados da Tabela 1.11 (P_v) foram determinados e estão na Tabela 1.12. 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 1.13, conforme sugerido por BROOKER *et alii* (1974).

TABELA 1.10 - Umidades relativas de equilíbrio obtidas pela equação de Henderson modificada por este autor para as isotermas de dessorção do feijão "carioca" em função dos teores de umidade e temperaturas pré-estabelecidas.

Ue (% base seca)	Temperatura (°C)					
	10	20	30	40	50	60
	Umidade Relativa de equilíbrio (decimal)					
5	0,114827	0,138834	0,154935	0,167367	0,177618	0,186404
10	0,329520	0,387299	0,424052	0,451359	0,473188	0,491411
15	0,550905	0,625056	0,668741	0,699443	0,722913	0,741774
20	0,730236	0,799224	0,836069	0,860195	0,877614	0,890950
25	0,853397	0,904902	0,929346	0,944047	0,953960	0,961122
30	0,927465	0,959850	0,973247	0,980550	0,985100	0,988173
35	0,967168	0,984800	0,991041	0,994085	0,995819	0,996905

TABELA 1.11 - Pressão de vapor da água do feijão "carioca" correspondente às umidades relativas de equilíbrio obtidas através da equação de Henderson modificada* para as isotermas de dessorção para os teores de umidade e temperaturas pré-estabelecidas.

Determinação da Pv em função da temperatura e da umidade de equilíbrio						
Ue (% base seca)	Temperatura (°C)					
	10	20	30	40	50	60
	Pv (mm Hg)					
5	1,0579	2,4358	4,9343	9,2638	16,4487	27,8744
10	3,0357	6,7951	13,5051	24,9929	43,8206	73,4844
15	5,0753	10,9664	21,2979	38,7301	66,9469	110,923
20	6,7274	14,0222	26,6269	47,6259	81,2733	133,2304
25	7,862	15,8763	29,5976	52,2743	88,3434	143,7238
30	8,5444	16,8403	30,9957	54,2956	91,2272	147,7689
35	8,9101	17,2781	31,5624	55,045	92,2199	149,0746
Pvs	9,2126	17,5447	31,8477	55,3726	92,6071	149,5375

* modificada por este autor

TABELA 1.12 - Logaritmo neperiano da pressão de vapor da água do feijão “carioca” correspondente às umidades relativas de equilíbrio obtidas através da equação de Henderson modificada* para as isotermas de desorção para os teores de umidade e temperaturas pré-estabelecidas.

Determinação da Ln (Pv) em função da temperatura e da umidade de equilíbrio						
Temperatura (°C)						
Ue (% base seca)	10	20	30	40	50	60
Ln(Pv) (mm Hg)						
5	0,056285	0,890275	1,596210	2,226114	2,800246	3,327708
10	1,110442	1,916201	2,603067	3,218591	3,780104	4,297073
15	1,624385	2,394836	3,058608	3,656617	4,203899	4,708836
20	1,906188	2,640641	3,281921	3,863376	4,397817	4,892079
25	2,062041	2,764827	3,387693	3,956504	4,481231	4,967893
30	2,145276	2,823774	3,433848	3,994443	4,513353	4,995649
35	2,187185	2,849439	3,451966	4,008151	4,524175	5,004446
Ln(Pvs)	2,220572	2,864751	3,460965	4,014084	4,528365	5,007547

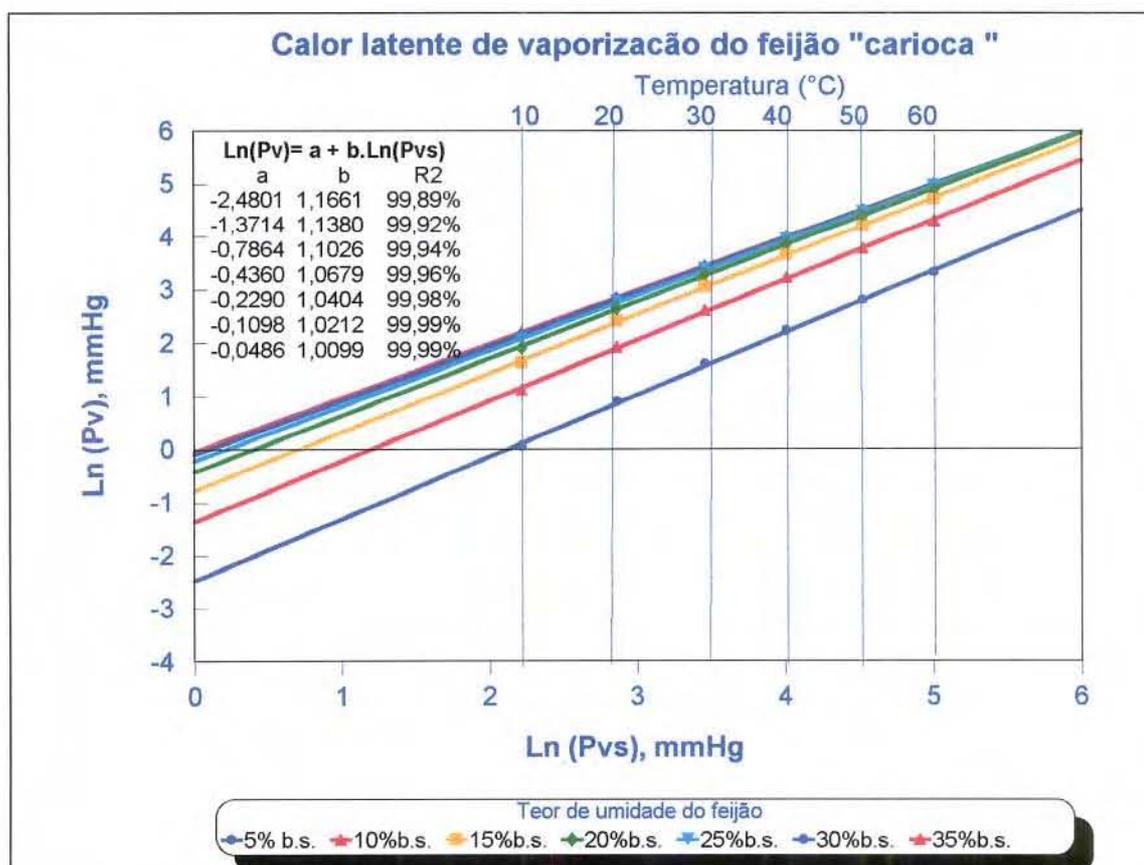


FIGURA 1.13 - Retas de “Othmer” para determinação do calor latente de vaporização do feijão “carioca”.

Na Tabela 1.13 estão os valores do calor latente de vaporização da água do feijão carioca decorrente das Tabelas 1.10, 1.11 e 1.12.

O calor necessário para evaporar a água do feijão aumenta com a diminuição do seu teor de umidade e da temperatura. Observa-se na Tabela 1.13 que quando o feijão esta com um teor de umidade de 35 % base seca (b.s.) o valor do calor latente de vaporização se aproxima do valor do calor latente de vaporização da água livre. Este fato foi observado por diversos autores entres os quais RODRIGUES-ÁRIAS (1963) e CAVALCANTI MATA (1993) pois a medida que o teor de umidade cresce este se aproxima do seu teor de umidade crítica que segundo BROOKER *et alii* (1974) é o ponto de transição entre a retirada de água a taxa de razão constante e a taxa de razão de secagem decrescente.

Na Figura 1.13 e na Tabela 1.13, é possível notar que para o teor de umidade de 5% base seca o calor latente de vaporização é bem superior ao de 35 % b.s. o que confirma as observações feitas por STEFANINI e ROA (1980) e MARTINS e CAVALCANTI MATA (1984), que para se retirar água das sementes com baixo teor de umidade requer-se uma quantidade de energia bem maior em torno de 80%, embora no presente caso esta energia esteja em torno de 15 a 17 %.

Na Figura 1.14 está a equação do calor latente de vaporização do feijão "carioca" em função da temperatura e do seu teor de umidade obtida por regressão não-linear, onde constata-se um coeficiente de correlação de 96,72%. Nesta figura também é mostrada a representação gráfica dos dados observados com os dados calculados pela equação.

TABELA 1.13 - Calor latente de vaporização das sementes de feijão "carioca" em função da temperatura e do teor de umidade equilíbrio pré-estabelecidos.

Determinação do calor latente de vaporização (hfg') em função da temperatura e do teor de umidade de equilíbrio							
Ue (% b.s.)	Temperatura (°C)						(incl)
	10	20	30	40	50	60	
hfg' (kcal/kg.°C) = hfg x inclinação da reta (incl)							
5	699,9498	693,3036	686,6574	680,0112	673,365	666,7188	1,1666
10	683,1414	676,6548	670,1682	663,6816	657,195	650,7084	1,1380
15	661,8907	655,60596	649,3211	643,0363	636,7515	630,4666	1,1026
20	641,0603	634,97334	628,8863	622,7992	616,7122	610,6252	1,0679
25	624,5521	618,62184	612,6915	606,7612	600,831	594,9007	1,0404
30	613,0263	607,20552	601,3846	595,5638	589,743	583,9221	1,0212
35	606,2429	600,48654	594,7301	588,9736	583,2172	577,4608	1,0099
hfg (kcal/kg.°C)	600,3	594,6	588,9	583,2	577,5	571,8	

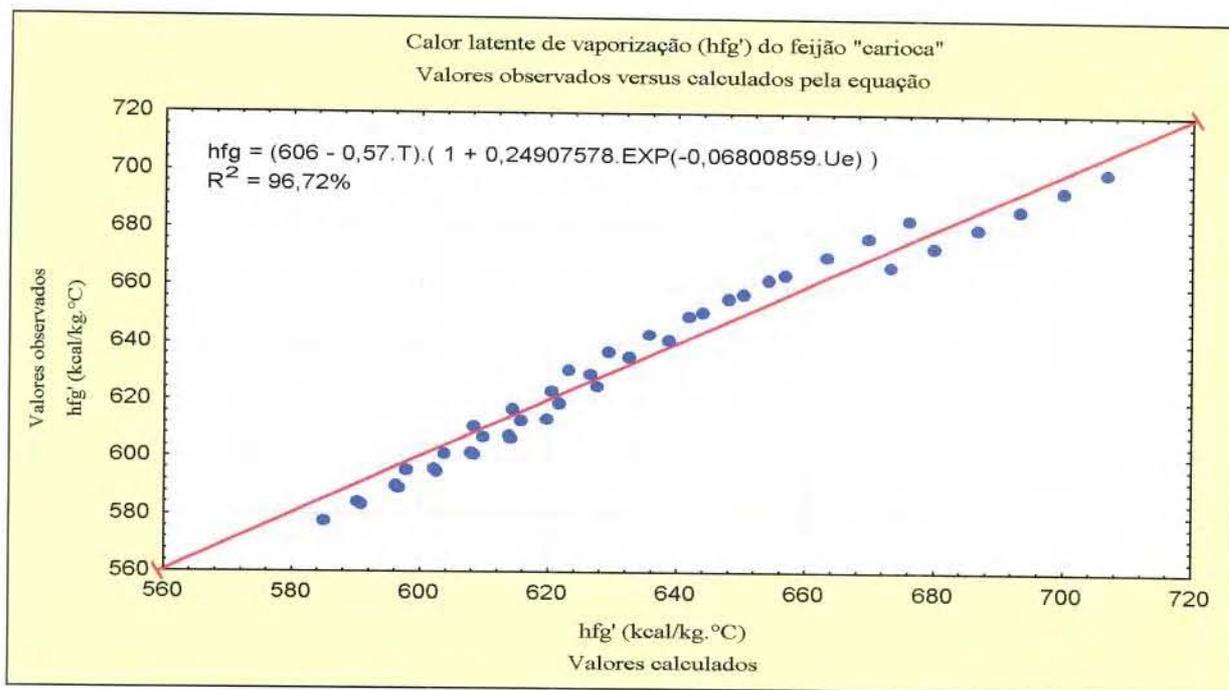


FIGURA 1.14 - Equação calor latente de vaporização do feijão “carioca” obtido por regressão não linear - Valores observados vs. valores calculados.

4.3. Calor específico

Na Tabela 1.14 estão as variações do calor específico do feijão carioca em função do teor de umidade de 5 a 45 % b.s.. Conforme o previsto, e de maneira genérica, o calor específico do feijão “carioca” cresce linearmente com o aumento do seu teor de umidade. Diversos autores entre os quais DUCAN et alii (1968), MOYSEY et alii (1977), ALMEIDA (1979), MORAES (1991) e CAVALCANTI MATA (1993) observaram este mesmo comportamento para diversos tipos de grãos e sementes, embora nem sempre a linearidade tenha sido encontrada.

TABELA 1.14 - Calor específico do feijão “carioca” em função do seu teor de umidade.

Teor de Umidade (% base seca)	Calor específico	
	kcal.kg ⁻¹ .°C ⁻¹	J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹
5	0,24517	1026,43
10	0,25862	1082,72
15	0,27314	1143,54
20	0,28249	1182,65
25	0,29661	1241,77
30	0,30602	1281,18
35	0,32492	1360,29
40	0,33426	1399,40
45	0,34838	1458,52

Os valores aqui obtidos são, a partir de 35 % b.s. em torno de 10% superiores aos encontrados por MORAES (1991) para feijão cariquinho. Na Figura 1.15 são plotados os dados experimentais e os obtidos por análise de regressão linear, observando-se um coeficiente de determinação de 99,86 %.

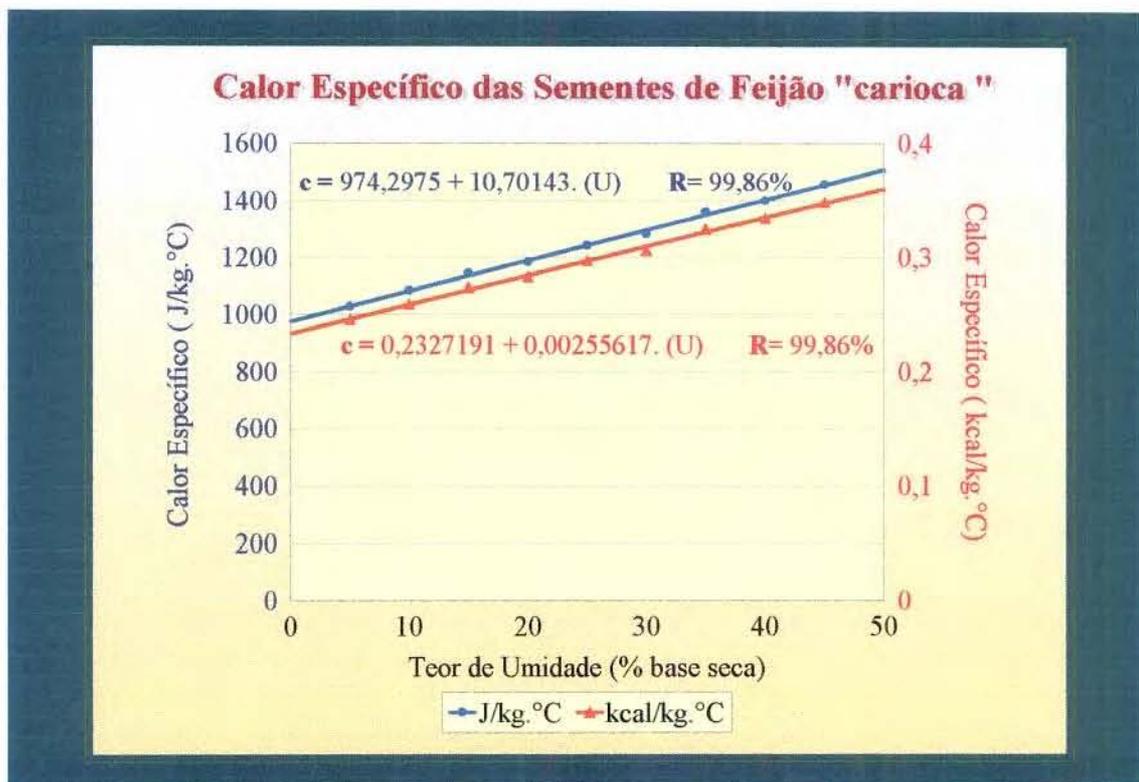


FIGURA 1.15 - Curva do calor específico do feijão "carioca" em função do seu teor de umidade.

4.4. Forma e tamanho das sementes de feijão

Na Figura 1.16 estão as equações da variação do comprimento, largura, espessura e do raio equivalente da esfera das sementes de feijão em função do seu teor de umidade. Observa-se que esta variação pode ser expressa por uma linha reta no intervalo de 10 a 45 % base úmida, e ao que comumente se assume, de que a variação do tamanho das sementes não se verifica durante a secagem, isto não parece ocorrer de modo que se possa considerar como desprezível. Os dados das dimensões médias das 60 sementes em função do teor de umidade estão na Tabela 1.15 e os dados de cada uma das 20 sementes em função do teor de umidade encontram-se no Apêndice 1.A. Nesta tabela, verifica-se que o comprimento variou com o teor de umidade de 1,08 a 1,24 cm, de 0,66 para 0,77 cm na largura, de 0,48 para 0,59 cm na espessura e de 0,70 à 0,83 cm para o raio da esfera equivalente. Consta-se que estes valores estão próximos aos encontrados para feijão-preto por ALMEIDA *et alii* (1980) que obtiveram valores médios de 1,22 cm para o comprimento, 0,77 cm para a largura e 0,52 cm para a espessura, e de 0,789 cm para o raio da esfera equivalente, embora os autores não tenham estudado a variação destes parâmetros com o teor de umidade do produto. CAVALCANTI MATA *et alii* (1986) estudou esta variação para o feijão mulatinho em função do teor de umidade de 8,1 a 17 % base úmida e encontrou para este produto, variações para os valores médios de comprimento de 9,9 à 10,76 mm, de 6,28 à 6,88 mm para a largura e de 4,13 à 5,03 mm

para a espessura. Isto vem confirmar que a variação das dimensões do produto ao longo de um processo de secagem não deve ser totalmente negligenciado principalmente para secadores de camada estacionária onde não há movimentação de fluxo de grãos ou sementes.

TABELA 1.15. - Dados experimentais das dimensões médias e do diâmetro da esfera equivalente das sementes de feijão “carioca” em função do seu teor de umidade.

Teor de umidade % base úmida	Diâmetro da esfera equivalente experimental valores médios	comprimento experimental valores médios	largura experimental valores médios	espessura experimental valores médios
10	0,7043	1,0866	0,6669	0,4820
15	0,7208	1,1044	0,6792	0,4994
20	0,7424	1,1367	0,6951	0,5179
25	0,7593	1,1502	0,7107	0,5355
30	0,7770	1,1762	0,7274	0,5482
35	0,7924	1,1956	0,7436	0,5596
40	0,8116	1,2197	0,7581	0,5781
45	0,8294	1,2466	0,7753	0,5903

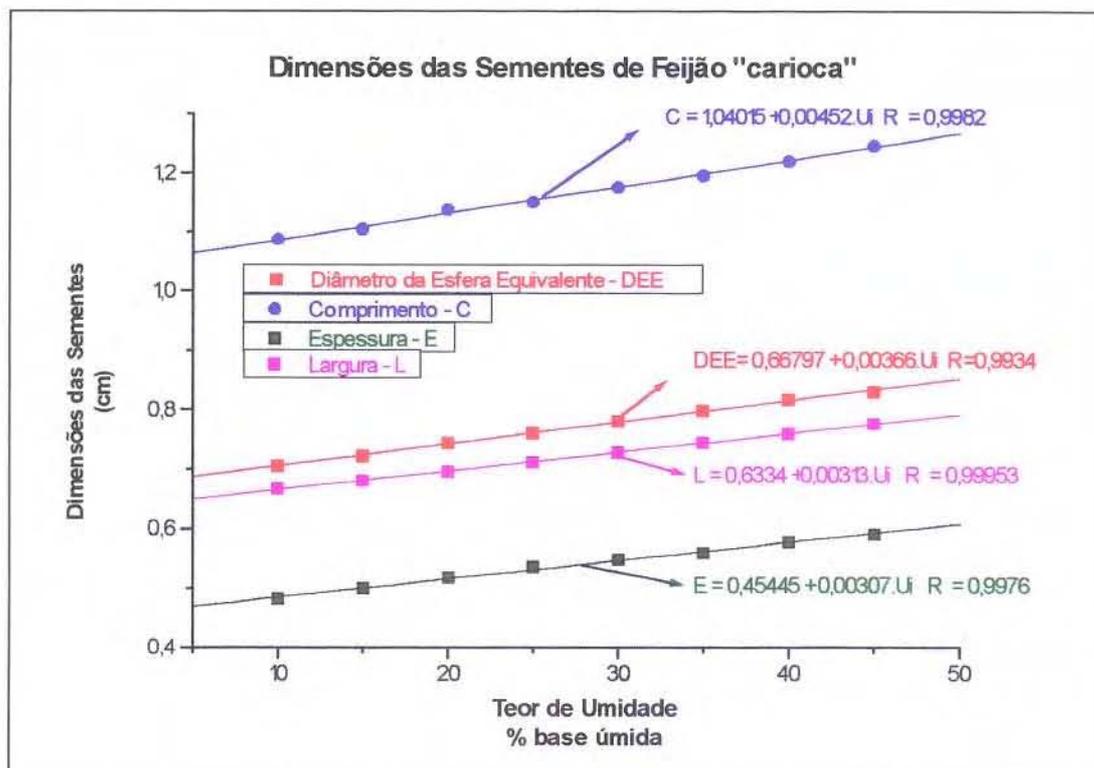


FIGURA 1.16 - Curvas do comprimento, largura, espessura e diâmetro da esfera equivalente das sementes de feijão “carioca” em função do seu teor de umidade.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos podemos concluir que:

Para o estudo de determinação do equilíbrio higroscópico do feijão “carioca”

- O tempo necessário para que o feijão atinja o teor de umidade de equilíbrio cresce com o decréscimo de temperatura e este período de tempo varia de 9 a 32 dias para as temperaturas do ar de 60 a 10 °C.
- Das equações estudadas para representar as curvas de dessecamento e sorção das sementes de feijão, a que apresenta o melhor coeficiente de determinação é a de Roa, sendo que, para as isotermas de dessecamento, a equação de Henderson modificada por este autor, pode expressar satisfatoriamente os dados experimentais.
- Devido a simplicidade da equação de Henderson modificada por este autor esta deve ser recomendada para uso em múltiplos casos onde se exige uma resposta rápida e de menor precisão ($R^2 = 99,03\%$) que a obtida pela equação de Roa ($R^2 = 99,55\%$).
- Para as faixas de temperaturas de 10 a 60 °C e umidades relativas de 10 a 90%, o teor de umidade de equilíbrio é maior quando obtida pelo processo de dessecamento do que pelo processo de sorção o que caracteriza a existência do fenômeno de histerese nas sementes de feijão “carioca”.
- A máxima histerese encontrada nas sementes de feijão foi de 2,4 pontos percentuais de umidade (base seca) a temperatura de 10 °C e 60% de umidade relativa e a mínima foi de 0,2 pontos percentuais de umidade às temperaturas de 50 e 60 °C e umidade relativa do ar de 10 %.
- Para as temperaturas estudadas a histerese tende a decrescer com o aumento de temperatura, e considerando-se a umidade relativa do ar, a histerese cresce quando a umidade relativa aumenta de 10% até 50 ou 60% e a partir deste ponto começa a decrescer até a umidade relativa de 90% .

Para o estudo de determinação do calor latente de vaporização das sementes de feijão “carioca”.

- O calor latente de vaporização das sementes de feijão cresce com a diminuição do teor de umidade do produto de 35 para 5 % base seca e com a diminuição da temperatura de 60 para 10 °C, sendo esta variação de 577,46 a 699,94 kcal. kg⁻¹ .
- O calor latente de vaporização das sementes de feijão para o teor de umidade de 5 % base seca é em média de 16 % maior que o produto com o teor de umidade de 35 % base seca.

Para o estudo de determinação do calor específico do feijão “carioca”

- O calor específico do feijão em estudo varia linearmente de 1026,43 a 1458,52 J.kg⁻¹.°C⁻¹ para um aumento do teor de umidade de 5 a 45 % base seca.
- O calor específico do feijão para os teores de umidade acima de 40% base seca, é em média 10% superior aos encontrado para feijão cariocinha.

Para o estudo das dimensões das sementes do feijão “carioca”

- O comprimento, largura, espessura e o raio da esfera equivalente das sementes de feijão variam linearmente com o aumento do seu teor de umidade de 10 para 45 % base úmida.
- As sementes de feijão diminuíram em 14,7 % no comprimento, 16,25 % na largura, 22,46% na espessura e 17% no diâmetro da esfera equivalente, com a diminuição do teor de umidade de 10 para 45 % base úmida, respectivamente.

Capítulo 2

Curvas de secagem em camada delgada

1. INTRODUÇÃO

A produção de sementes difere daquela de grãos pela indispensável aplicação na primeira de técnicas de controle de qualidade, objetivando propiciar a obtenção de níveis pré-estabelecidos em relação aos seus componentes genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários (POPINIGIS, 1988).

As sementes de feijão desenvolvem-se na planta mãe passando por diversas etapas de desenvolvimento fisiológico até atingirem o seu ponto de maturação. A maioria dos pesquisadores consideram que quando as sementes atingem o seu máximo de peso seco, este corresponde ao máximo de maturação fisiológica, as sementes ainda têm neste momento, um teor de umidade muito elevado para poder ser conservada (TOLEDO e MARCOS FILHO, 1977). Segundo POPINIGIS (1988) o teor de umidade do feijão fisiologicamente maduro está em torno de 40 %, base úmida, a partir do qual inicia-se a deterioração do produto, e o atraso na colheita corresponde a armazenar sementes no campo, sob condições amplamente desfavoráveis. Portanto, a partir da maturação fisiológica, a colheita deve ser feita seguida da secagem.

A secagem de sementes consiste em retirar parte da água existente no produto de modo a diminuir sua atividade biológica e possibilitar o seu armazenamento por longos períodos de tempo, sendo esta técnica o processo comercial mais utilizado em todo o mundo.

A secagem comercial de sementes de feijão consiste em diminuir o seu teor de umidade de, aproximadamente, 30% base úmida (b.u.) para 13 % b.u. utilizando secadores mecânicos, sendo o mais utilizado no Brasil o secador em camada estacionária. O estudo da secagem em camada espessa realizada neste tipo de secador se fundamenta na secagem sucessiva das camadas delgadas do produto. Portanto, para que qualquer estudo mais profundo possa ser feito de dimensionamento, simulação e otimização de secadores, torna-se necessário conhecer as curvas de secagem em camada delgada do referido produto.

As curvas de secagem variam com a espécie, variedade, condições ambientais, localidade, fertilidade dos campos de cultivo, práticas agrícolas e maneiras de pré-processamento. Por isso devem ser constantemente investigadas até que se forme um banco de dados que possa estabelecer o comportamento de um produto nas diversas regiões produtoras.

Segundo SOARES (1986), na literatura são encontradas muitas equações de secagem em camada fina que foram propostas por diversos autores para diversos produtos. Os parâmetros mais estudados que influenciam nas curvas de secagem são: temperatura, umidade relativa, fluxo de ar de secagem e teor de umidade inicial do produto.

Com relação a influência do fluxo do ar e da umidade relativa sobre a taxa de secagem existem alguns trabalhos mostrando esta influência para produtos a ser secos no período de taxa decrescente. No entanto, existem outros trabalhos mostrando que dentro de determinado intervalo estudado esta influência não se evidencia e, desta forma, estes dois parâmetros são constantemente negligenciados no estudo do comportamento das taxas de secagem.

Diante ao exposto, os objetivos deste Capítulo são:

- Determinar as curvas de secagem das sementes de feijão “carioca” em camadas delgadas para as temperaturas de 30 a 80 °C e teor de umidade inicial variando de 25 a 45 %, base seca, e velocidade do ar de secagem de 0,5 m.s⁻¹.
- Determinar os coeficientes da equação de secagem em camada delgada para a equação simplificada de difusão usando o primeiro e o segundo termo da série, e as equações propostas por Page e Thompson
- Determinar o coeficiente de difusão de líquido (água) para as condições de secagem estabelecidas no primeiro item destes objetivos.
- Determinar as curvas de secagem das sementes de feijão “carioca” em camadas delgadas para as temperaturas de 30 a 80 °C e teores de umidade inicial de 25, 35 e 45%, base seca, e velocidade do ar de secagem de 0,2; 0,5 e 0,8 m.s⁻¹, para verificar a influência da velocidade do ar na taxa de secagem.
- Determinar as curvas de secagem das sementes de feijão “carioca” em camadas delgadas para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C e umidade relativas de 20, 30, 40 e 50%, para os teores de umidade inicial de 25, 35 e 45 %, base seca, e velocidade do ar de secagem de 0,5 m.s⁻¹, com a finalidade de verificar a influencia da umidade relativa do ar na taxa de secagem.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Processo de Secagem

A secagem de um produto como as sementes é um processo simultâneo de transferência de calor e massa, utilizado para evitar o desenvolvimento de fungos, microorganismos e insetos que normalmente são as causas de deterioração das sementes (BROOKER *et alii*, 1974).

O calor é requerido para evaporar a água contida no material durante a secagem do produto. A água evaporada na superfície externa do produto é removida e transferida para o meio de secagem, que é normalmente o ar.

Diversos produtos biológicos, quando estão sendo secos individualmente ou em camada delgada, apresentam uma perda de umidade a uma taxa constante durante o período inicial de secagem, seguido por um período de secagem a uma taxa decrescente. Contudo, a secagem comercial de sementes, geralmente, ocorre inteiramente no período em que a taxa de secagem é decrescente.

Os dois períodos distintos do processo de secagem em produtos agrícolas, que são: (1) período de secagem à taxa constante e (2) período de secagem à taxa decrescente, foram descritos por GERZHOI-SAMOCHETOU (1960), HALL (1971) e BROOKER *et alii* (1974).

2.1.1. Período de secagem à taxa constante

A secagem à taxa constante pode ser observada em produtos nos quais a resistência interna ao transporte de umidade é muito menor do que a resistência externa à remoção do vapor de água na superfície do produto para o meio ambiente. De acordo com SABBAAH (1968), o período de secagem à taxa constante é considerado como aquele em que a umidade das sementes é suficiente para manter a água na superfície do produto, de maneira similar a uma área de água livre, constantemente exposta às mesmas condições do ambiente.

Segundo HALL (1971), o período de secagem à taxa constante de produtos agrícolas depende dos seguintes fatores: (1) área exposta; (2) temperatura do ar; (3) diferença entre a umidade do ar e a da superfície do produto; (4) coeficiente de transferência de massa; e (5) velocidade do ar de secagem.

A taxa de secagem constante de um produto biológico pode ser aproximada pela análise de um termômetro de bulbo úmido.

A taxa de evaporação de um termômetro de bulbo molhado é dada por:

$$m_w = \frac{h_m \cdot S \cdot M_w}{R_0 \cdot T_{abs}} (P_{vs} - P_v) \quad (\text{Eq. 2.1})$$

em que

- m_w = taxa de evaporação de umidade, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- h_m = coeficiente de transferência de massa por convecção, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- S = área da superfície exposta, m^2
- M_w = peso molecular da água, $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
- R_0 = constante universal dos gases, $8314 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- T_{abs} = temperatura absoluta, K
- P_{vs} = pressão de vapor à temperatura do bulbo molhado, $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
- P_v = pressão de vapor à temperatura ambiente, $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$

Considerando a taxa de transferência de calor do ar para o bulbo molhado, desprezando a radiação da atmosfera e a condução ao longo da haste do termômetro de bulbo molhado de área S tem-se:

$$q = h \cdot S \cdot (T_\infty - T_{bu}) \quad (\text{Eq. 2.2.})$$

em que

- q = taxa de transferência de calor, W
- h = coeficiente de transferência de calor por convecção, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- S = área, m^2
- T_∞ = temperatura ambiente, K
- T_{bu} = temperatura de bulbo molhado, K

Por outro lado q pode ser dado por:

$$q = m_w \cdot h_{fg} = \frac{h_{fg} \cdot h_m \cdot S \cdot M_w}{R_v \cdot T} \cdot (P_{vs} - P_v) \quad (\text{Eq. 2.3})$$

em que

h_{fg} = calor latente de vaporização da água, J.kg^{-1}

A transferência de massa do bulbo molhado (taxa de evaporação) para o ar, devido à diferença de concentração, diferença de pressão parcial entre a película de água que envolve o bulbo e o fluxo de ar, é dada pela combinação das equações 2.2. e 2.3., obtendo-se:

$$m_w = \frac{h_m \cdot S}{R_v \cdot T} \cdot (P_{vs} - P_v) = \frac{h \cdot S}{h_{fg}} (T_\infty - T_{bu}) \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Como m_w é a taxa de evaporação de umidade pode-se escrever:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{h_m \cdot S \cdot (P_{vs} - P_v)}{R_v \cdot T} = \frac{h \cdot S \cdot (T_\infty - T_{bu})}{h_{fg}} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

em que

U = teor de umidade do produto, decimal, base seca

$\frac{dU}{dt}$ = taxa de secagem

R_v = constante dos gases para o vapor d'água, $462,69 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

O cálculo preciso da taxa de secagem constante dada pela Equação 2.5 é possível se a área superficial S e os coeficientes h_m e h forem conhecidos. Muitas vezes é difícil obter valores precisos para h_m , h e S por causa da heterogeneidade da forma dos produtos biológicos. Além disso, a temperatura superficial de um produto é, freqüentemente, maior que a temperatura de bulbo molhado, T_{bu} , e a pressão de vapor é, portanto, menor que P_{vs} (BROOKER *et alii*, 1974).

O teor de umidade no qual a taxa de secagem de um produto muda de uma taxa constante para uma taxa decrescente é chamado de teor de umidade crítico. Este teor de umidade depende das características do produto, tais como forma e tamanho e também das condições de secagem.

As sementes não apresentam, geralmente, o período de secagem à taxa constante, a menos que sejam colhidos em um estágio muito imaturo ou que tenha havido condensação de umidade ou chovido sobre elas. Entretanto, muitos outros produtos biológicos, tais como batatas e beterrabas, apresentam um comportamento de secagem com taxa constante, quando são desidratados sob condições ambientes constantes. O comportamento de secagem de um produto biológico é mostrado na Figura 2.1.

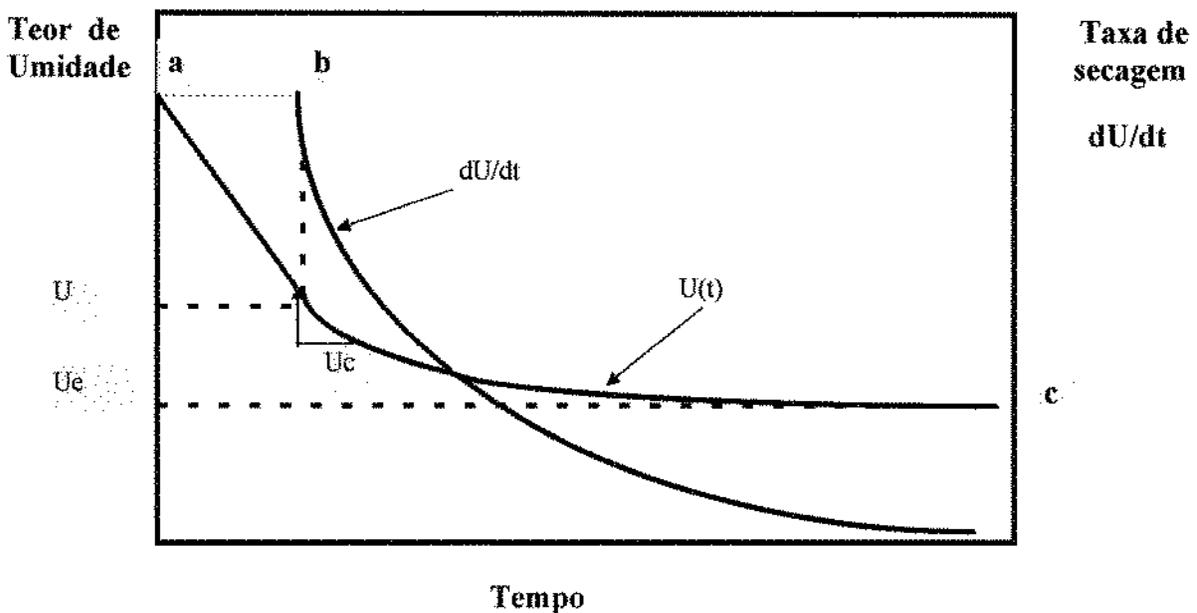


FIGURA 2.1. - Comportamento da secagem de um produto biológico (ab = período de secagem à taxa constante, bc = período de secagem a taxa decrescente).

2.1.2. Período de secagem à taxa decrescente

Durante o período de secagem à taxa decrescente, a superfície do produto não se encontra coberta por uma camada fina de água, como no caso anterior, porque a resistência interna ao transporte de água se torna maior do que a resistência externa. À medida em que o teor de umidade vai decrescendo abaixo do teor de umidade crítico, o potencial motriz do processo de secagem ($P_{vs} - P_v$) decresce junto com a taxa de secagem. Aparece também um gradiente de umidade no interior do produto e sua temperatura se eleva acima da temperatura de bulbo molhado.

O ideal para manter a qualidade das sementes seria que, depois de atingir seu ponto de maturação fisiológica, os processos de colheita, debulha e secagem fossem feitos sequencialmente. No entanto, tanto para a colheita quanto para a debulha existe um teor de umidade ideal no qual as sementes não sofrem injúrias mecânicas causadas por estes processos. Assim as sementes são colhidas e debulhadas com teores de umidade abaixo do ponto de maturação fisiológica. Portanto, a maioria dos grãos e sementes quando vão para as unidades de secagem apresentam teores de umidade em torno de 17 a 30 %, base úmida. Desta forma, geralmente, a secagem de sementes só é feita no período à taxa decrescente.

Curvas típicas da secagem de grãos e sementes são mostradas na Figura 2.2.

A previsão da taxa de secagem de um produto biológico durante o período de secagem à taxa decrescente é mais complexa do que durante à taxa constante. Neste caso, não somente devem ser considerados os mecanismos de transferência externa (transferência de calor e massa por convecção), como 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 e sementes durante o período de secagem à taxa decrescente, somente as relações semi-empíricas e empíricas têm se mostrado como melhores opções para prever o processo de secagem (MARTINS e CAVALCANTI MATA, 1984).

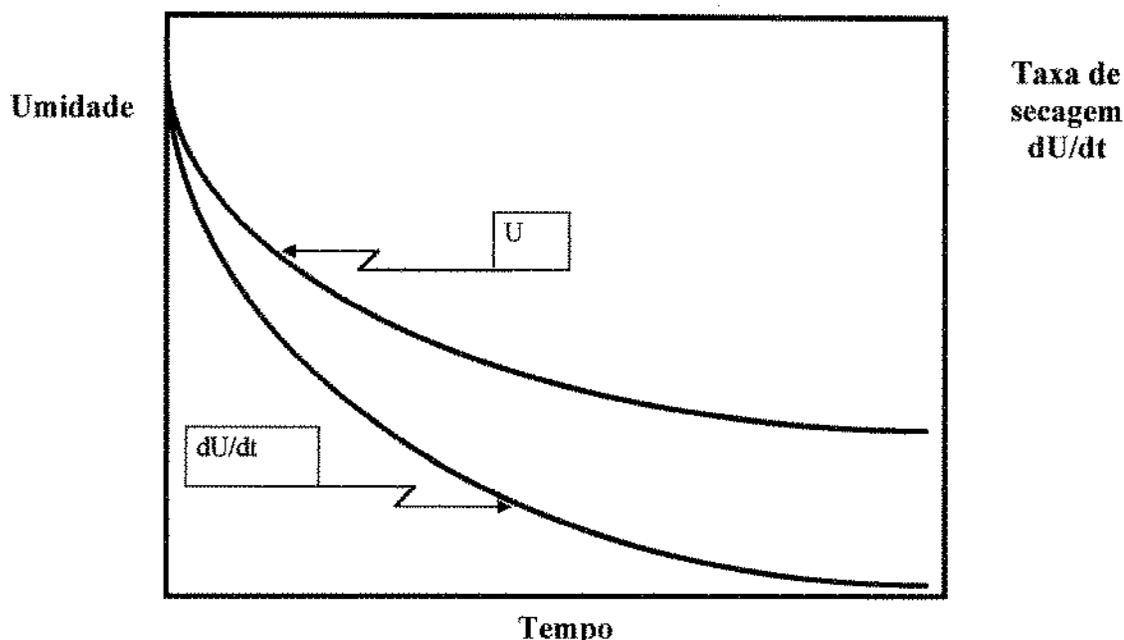


FIGURA 2.2 - Curvas típicas de secagem de grãos e sementes.

2.2. Teoria de secagem

Vários mecanismos físicos têm sido propostos para descrever a secagem de produtos biológicos e na literatura são descritos os métodos teóricos, semiteóricos e empíricos.

Segundo QUEIROZ *et alii* (S/D) as expressões empíricas menosprezam os fundamentos da secagem, visto que, embora possam descrever a curva de secagem para as condições do experimento, não podem dar uma visão clara e exata dos importantes processos que ocorrem durante a secagem. Os mesmos autores afirmam também que os métodos teóricos usados para descrever o processo de secagem são baseados em leis físicas que tentam explicar o mecanismo de transferência de umidade.

Vários mecanismos físicos foram propostos para descrever a transferência de umidade em produtos capilares porosos tais como grãos e sementes (FORTES, 1982; NEVES, 1982; BROOKER *et alii*, 1992), os quais são:

- 1 - movimento de líquido devido a forças superficiais (difusão capilar);
- 2 - movimento de líquido devido a diferenças na concentração de umidade (difusão de líquido);
- 3 - movimento de líquido devido a difusão da umidade nas superfícies dos poros (difusão na superfície);
- 4 - movimento de vapor devido a diferenças na concentração de vapor (difusão de vapor);
- 5 - movimento de vapor devido a diferenças de temperatura (difusão térmica);
- 6 - movimento de água e de vapor devido a diferenças de pressão total (fluxo hidrodinâmico).

Segundo NEVES (1982), várias teorias foram propostas para explicar os mecanismos do movimento de água em sólidos. Dentre elas, são citadas as seguintes:

- 1 - Teoria da Difusão Líquida;
- 2 - Teoria Capilar;
- 3 - Teoria da Vaporização-Condensação;
- 4 - Teoria de Luikov;
- 5 - Teoria de Philip e De Vries;
- 6 - Teoria de Berger e Pei;
- 7 - Teoria de Fortes e Okos;

2.2.1. Teoria de difusão líquida

Muitos pesquisadores de produtos agrícolas têm preferido a Teoria de Difusão Líquida. (WHITNEY e PORTERFIELD, 1969; KEEY, 1972; NEVES, 1982).

Na Teoria de Difusão Líquida a segunda lei de Fick tem sido utilizada uma vez que estabelece a difusão de umidade em termos do gradiente de concentração. No caso específico das sementes este gradiente de concentração é o gradiente do teor de umidade na base seca.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial U}{\partial x} \right) \quad (\text{Eq. 2.6})$$

em que

U = teor de umidade, base seca

D = coeficiente de difusão de líquido, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

x = distância em relação a um ponto de referência na partícula, m

Segundo FORTES e OKOS (1980), em geral, o coeficiente de difusão é considerado constante ou linearmente dependente da temperatura e/ou concentração ou, ainda, depende da temperatura, segundo uma equação do tipo Arrhenius:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right) \quad (\text{Eq. 2.7})$$

em que

D_0 = coeficiente de difusão para $T \rightarrow \infty$, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

E = energia de ativação, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$

R = constante dos gases para o vapor d'água, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T = temperatura, K

Na literatura encontra-se muita discrepância entre os valores experimentais e os teóricos decorrentes da aplicação desta teoria quando é considerado a difusão de líquido como o único mecanismo de movimento de água no produto. Contudo resultados mais expressivos têm sido obtidos considerando-se o coeficiente de difusão variável (NEVES, 1982).

Segundo BABBIT (1950), o coeficiente de difusão através de um sólido depende da pressão e não da concentração. A relação entre pressão e concentração nem sempre é linear, por causa da complexidade dos fenômenos de sorção. As equações, em termos de concentração, devem ser evitadas, porque falham na distinção entre difusão e outros mecanismos, que podem ocorrer simultaneamente.

Entretanto, as teorias mais modernas aceitam que em determinada fase da secagem o movimento de umidade seja, basicamente, determinado pela difusão de líquido (FORTES e OKOS, 1981).

A vantagem do emprego da teoria de difusão de líquido, em relação a modelos empíricos, na simulação de secagem em camada espessa está no fato de poder prever o que ocorre nas etapas de repouso nos secadores (QUEIROZ *et alii*, S/D).

As suposições feitas no desenvolvimento de modelos com base na teoria da difusão de líquido são: (a) a redução de volume é desprezível; (b) não há efeito de capilaridade; (c) os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente; (d) os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro são desprezíveis.

A secagem de materiais homogêneos segundo a teoria da difusão de líquido pode ser explicada pela seguinte equação:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right) \quad (\text{Eq. 2.8})$$

em que

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

$r =$ distância radial ou espessura, m

$t =$ tempo, s.

Várias soluções da equação 2.8 para diversas formas sólidas tem sido utilizadas para secagem em grãos e sementes onde são assumidas as seguintes condições de contorno:

$$U(r, 0) = U_i \quad (\text{Eq. 2.9})$$

$$U(R, t) = U_e \quad (\text{Eq. 2.10})$$

em que

$U_i =$ teor de umidade inicial, percentagem ou decimal base seca

$U_e =$ teor de umidade de equilíbrio, percentagem ou decimal, base seca

As soluções analíticas da equação 2.8 podem ser obtidas diretamente de livros sobre difusão. CRANK (1957), mostra as soluções para três formas geométricas:

• Placa plana infinita

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot X^2}{4} \right] \quad (\text{Eq. 2.11})$$

em que

$RU = (U - U_e) / (U_i - U_e)$, razão de umidade do grão ou semente, adimensional

$X = (A/V) \cdot (D \cdot t)^{1/2}$ = adimensional

$A/V =$ (metade da espessura da placa plana)⁻¹, m⁻¹

- Cilindro infinito

$$RU = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp\left[-\frac{\lambda_n^2 \cdot X^2}{4}\right] \quad (\text{Eq. 2.12})$$

em que

$$A/V = 2/R, \text{ m}^{-1}$$

λ_n = raízes da equação de Bessel de ordem zero.

- Esfera

$$RU = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot X^2}{9}\right] \quad (\text{Eq. 2.13})$$

em que

$$A/V = 3/R, \text{ m}^{-1}$$

R = Raio da esfera, m

Esta equação também tem sido resolvida usando-se o método de diferenças finitas de Crank-Nicolson, descritos por QUEIROZ *et alii* (S/D).

Segundo os autores as condições iniciais e de contorno usadas na solução são:

$$U(r, t) = U_i \quad t = 0, \quad 0 \leq r \leq R \quad (\text{Eq. 2.14})$$

$$\frac{\partial U}{\partial r}(r, t) = 0 \quad t \geq 0 \quad r = 0 \quad (\text{Eq. 2.15})$$

$$U(r, t) = U_e \quad t > 0 \quad r = R \quad (\text{Eq. 2.16})$$

No método de Crank-Nicolson, as derivadas parciais de U , com respeito ao espaço (r) e tempo (t), são aproximadas do modo que se segue (i e n correspondem ao incremento de espaço e tempo, respectivamente):

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \Big|_{i,n+1/2} = \frac{1}{2} \left[\frac{U_{i+1,n+1} - 2 \cdot U_{i,n+1} + U_{i-1,n+1}}{\Delta r^2} + \frac{U_{i+1,n} - 2 \cdot U_{i,n} + U_{i-1,n}}{\Delta r^2} \right] \quad (\text{Eq. 2.17})$$

$$\frac{\partial U}{\partial r} \Big|_{i,n+1/2} = \frac{1}{2} \left[\frac{U_{i+1,n+1} - U_{i-1,n+1}}{2 \cdot \Delta r} + \frac{U_{i+1,n} - U_{i-1,n}}{2 \cdot \Delta r} \right] \quad (\text{Eq. 2.18})$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{i,n+1/2} = \frac{1}{\Delta t} [U_{i,n+1} - U_{i,n}] \quad (\text{Eq. 2.19})$$

Para o nó central ($r = 0$), a Equação 2.8. apresenta uma indeterminação, pois $\partial U/\partial r$ e r são iguais a zero. Para eliminar essa indeterminação, faz-se

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \lim_{r \rightarrow 0} D \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right) = D \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \lim_{r \rightarrow 0} \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right) \quad (\text{Eq. 2.20})$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + 2 \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right) = D \cdot 3 \cdot \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right) \quad (\text{Eq. 2.21})$$

Substituindo as Equações 2.17 e 2.19 pela Equação 2.21 tem-se, para o nó central ($i = 1$):

$$\frac{1}{\Delta t} (U_{i,n+1} - U_{i,n}) = \frac{3 \cdot D}{2} \left[\frac{U_{i+1,n+1} - 2 \cdot U_{i,n+1} + U_{i-1,n+1}}{\Delta r^2} + \frac{U_{i+1,n} - 2 \cdot U_{i,n} + U_{i-1,n}}{\Delta r^2} \right] \quad (\text{Eq. 2.22})$$

Como $U_{i-1,n+1} = U_{i+1,n+1}$ e $U_{i-1,n} = U_{i+1,n}$ ($\partial U / \partial r = 0$ no centro da semente) tem-se:

$$U_{1,n+1} \left(\frac{1}{D \cdot \Delta t} + \frac{3}{\Delta r^2} \right) + U_{2,n+1} \left(\frac{-3}{\Delta r^2} \right) = U_{1,n} \left(\frac{1}{D \cdot \Delta t} - \frac{3}{\Delta r^2} \right) + U_{2,n} \left(\frac{3}{\Delta r^2} \right) \quad (\text{Eq. 2.23})$$

Para nós intermediários ($2 \leq i < \ell$)

$$\left(\frac{1}{2 \cdot \Delta r^2} - \frac{1}{2 \cdot r \cdot \Delta r} \right) \cdot U_{i-1,n+1} - \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{D \cdot \Delta t} \right) \cdot U_{i,n+1} + \left(\frac{1}{2 \cdot \Delta r^2} - \frac{1}{2 \cdot r \cdot \Delta r} \right) \cdot U_{i+1,n+1} = \left(\frac{1}{2 \cdot \Delta r^2} - \frac{1}{2 \cdot r \cdot \Delta r} \right) \cdot U_{i-1,n} + \left(\frac{1}{2 \cdot \Delta r^2} - \frac{1}{2 \cdot r \cdot \Delta r} \right) \cdot U_{i,n} - \left(\frac{1}{2 \cdot \Delta r^2} - \frac{1}{2 \cdot r \cdot \Delta r} \right) \cdot U_{i+1,n} \quad (\text{Eq. 2.24})$$

Para o nó da superfície ($i = \ell$):

$$U_{\ell,n+1} = U_c \quad (\text{Eq. 2.25})$$

As Equações 2.23, 2.24 e 2.25 formam um sistema de equações tridiagonais que pode ser resolvido por meio de um método numérico adequado.

2.2.2. Teoria capilar

A teoria capilar é baseada no conceito de potencial, que pode ser definido como a diferença de pressão entre a água e o ar na interface água-ar presente no capilar. A curvatura na interface é produzida pela tensão superficial da água (ALVARENGA, 1980). A equação de fluxo capilar líquido é dada por:

$$\vec{J}_L = K_h \nabla \Psi \quad (\text{Eq. 2.26})$$

em que

$$\begin{aligned}\vec{J}_\ell &= \text{fluxo de líquido, kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \\ \psi &= \text{potencial hidráulico capilar, J.kg}^{-1} \\ K_h &= \text{condutividade hidráulica, s}^{-1}\end{aligned}$$

Para condições isotérmicas, considera-se que o potencial capilar seja proporcional ao gradiente de concentração de água.

De acordo com PHILIP e DE VRIES (1957) a equação é escrita da seguinte forma:

$$\vec{J}_\ell = K_h \rho_s \nabla U \quad (\text{Eq. 2.27})$$

em que

$$\rho_s = \text{massa específica do sólido seco, kg.m}^{-3}$$

A teoria capilar afirma que na secagem de sólidos granulares o fluxo de água é inteiramente comandado pelas forças capilares, sendo, portanto, independente da concentração de água. Verificou-se experimentalmente que o fluxo de água pode ir da direção de concentração mais baixa para a mais alta.

MILLER e MILLER (1975) explicam esse fato dizendo que a força que induz o evento é um gradiente de tensão. Somente para materiais homogêneos e isotrópicos é que a tensão capilar é proporcional ao teor de umidade, valendo assim a equação 2.27. O transporte capilar, como único mecanismo de movimento de umidade, não tem sido utilizado em materiais biológicos.

2.2.3. Teoria de vaporização-condensação

A teoria de vaporização-condensação considera que a água, num meio poroso, migra inteiramente na fase gasosa. HENRY (1940) considera a difusão simultânea de calor e massa e, pressupõe que os poros tenham uma rede contínua de espaços incluídos no sólido. Considera, ainda, por conveniência matemática que o total de vapor no sólido varia linearmente de acordo com a concentração de água e a temperatura. O coeficiente de difusão é considerado constante.

Foram propostas as seguintes equações:

$$\gamma \frac{\partial U}{\partial t} = K_v^1 \cdot \nabla^2 U_v = \frac{\partial U_v}{\partial t} \quad (\text{Eq. 2.28})$$

$$\varepsilon \frac{\partial U}{\partial t} = K'' \cdot \nabla^2 T \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{Eq. 2.29})$$

em que γ , K_v^1 , ε e K'' são dados pelas seguintes expressões

$$\gamma = \frac{1-a}{a} \cdot \rho_s \quad (\text{Eq. 2.30})$$

$$K_v^1 = \varepsilon \cdot K_v \quad (\text{Eq. 2.31})$$

$$\varepsilon = \frac{L_v}{\rho_s \cdot C_s} \quad (\text{Eq. 2.32})$$

$$K_v^v = \frac{K \cdot T}{a \cdot \rho_s \cdot C_s} \quad (\text{Eq. 2.33})$$

em que

a = volume de ar / volume de sólido seco, adimensional

U_v = umidade na forma de vapor, decimal base seca

K_v = condutividade de vapor, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

L_v = calor latente de vaporização do vapor d'água, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$

C_s = calor específico do sólido $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

O movimento de água na fase de vapor foi verificado experimentalmente por GURR *et alii* (1952) e KUZMAK e SEREDA (1957), em material poroso insaturado, tal como solo em que não havia fluxo de água na fase líquida, fluxo causado pelo gradiente de temperatura. Entretanto, quando há gradiente de pressão ocorre fluxo de água na fase líquida.

2.2.4. Teoria de Luikov

A teoria de Luikov, citado por BROOKER *et alii* (1974), é baseada na termodinâmica dos processos irreversíveis e leva em consideração os mecanismos de difusão, efusão, convecção de vapor e difusão, além da convecção de água no interior do meio poroso. Luikov e seus colaboradores, propuseram o seguinte modelo matemático para descrever a secagem de produtos com poros capilares baseado nos mecanismos físicos já citados anteriormente:

$$\partial U / \partial t = \nabla^2 \cdot K_{11} \cdot U + \nabla^2 \cdot K_{12} \cdot \theta + \nabla^2 \cdot K_{13} \cdot P \quad (\text{Eq. 2.34})$$

$$\partial \theta / \partial t = \nabla^2 \cdot K_{21} \cdot U + \nabla^2 \cdot K_{22} \cdot \theta + \nabla^2 \cdot K_{23} \cdot P \quad (\text{Eq. 2.35})$$

$$\partial P / \partial t = \nabla^2 \cdot K_{31} \cdot U + \nabla^2 \cdot K_{32} \cdot \theta + \nabla^2 \cdot K_{33} \cdot P \quad (\text{Eq. 2.36})$$

em que

U = teor de umidade do produto, decimal base seca.

θ = temperatura do produto, K

P = Pressão Total, $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$

∇^2 = operador de Laplace em Laplaciano

K_{ij} = coeficiente fenomenológicos ($i = j = 1, 2, 3$)

K_{ij} = coeficiente combinados ($i \neq j$; $i, j = 1, 2, 3$)

A secagem de grãos e sementes ocorre sob circunstâncias que permitem a simplificação das equações de Luikov, uma vez que o gradiente de pressão total só é significativo na secagem para temperatura do produto bem acima da faixa empregada na secagem de sementes. Portanto, as equações 2.34., 2.35. e 2.36. tornam-se:

$$\partial U/\partial t = \nabla^2 . K_{11} . U + \nabla^2 . K_{12} . \theta \quad (\text{Eq. 2.37})$$

$$\partial \theta/\partial t = \nabla^2 . K_{21} . U + \nabla^2 . K_{22} . \theta \quad (\text{Eq. 2.38})$$

As equações 2.37. e 2.38. foram aplicadas para vários produtos por Husain *et alii*, citados por BROOKER *et alii* (1992), os quais concluíram que o efeito combinado de temperatura e umidade na análise de secagem de sementes só é utilizado para um número muito limitado de sementes. Assim as equações 2.37 e 2.38. tornam-se:

$$\partial U/\partial t = \nabla^2 . K_{11} . U \quad (\text{Eq. 2.39})$$

$$\partial \theta/\partial t = \nabla^2 . K_{21} . U \quad (\text{Eq. 2.40})$$

Outra simplificação pode ser feita nos gradientes de temperatura, já que na prática estes não são considerados. Desta forma teremos:

$$\partial U/\partial t = \nabla^2 . K_{11} . U \quad (\text{Eq. 2.41})$$

Como normalmente o fluxo de umidade dentro do grão ocorre através da difusão (líquido e/ou vapor), o coeficiente K_{11} é substituído por D , que é o coeficiente de difusão.

2.2.5. Teorias de Philip e De Vries e de Berger e Pei

As teorias de Philip e De Vries e de Berger e Pei, em linhas gerais, consideram que a água se move em meios porosos basicamente por meio dos mecanismos de difusão de líquido e capilaridade (ALVARENGA, 1980). Segundo FORTES (1978) nesta teoria se propõe uma abordagem mecanística, sendo que as equações de Berger e Pei são semelhantes às de Luikov.

2.2.6. Teoria de Fortes e Okos

Segundo FORTES e OKOS (1981), mesmo que a teoria da difusão de líquido seja preferida por diversos pesquisadores, esta pode conduzir a erros significativos, quando utilizada para prever processos de secagem. Os autores propuseram um modelo baseado na termodinâmica de processos irreversíveis, aceitando o princípio de equilíbrio local e a validade:

- (1) da equação de Gibb para condições de não-equilíbrio;
- (2) das leis fenomenológicas lineares;
- (3) das relações fundamentais de Onsager;
- (4) de um sistema ser tomado como um contínuo;
- (5) da migração de água na fase de líquido e vapor;
- (6) da razão de transferência de calor e massa ser mais lenta que a razão de mudança de fase;
- (7) do princípio de Curie.

De acordo com FORTES e OKOS (1981), a diferença fundamental entre a sua teoria e as citadas anteriormente é que eles demonstraram que a força motriz para o movimento isotérmico, tanto do líquido como do vapor, é o gradiente do teor de umidade de equilíbrio e não o gradiente do teor de umidade simplesmente. Assim, o teor de umidade de equilíbrio é apresentado como uma escolha mais natural para o potencial de transporte de massa criado por Luikov.

Considerando que o modelo de Fortes e Okos supõe as relações de Onsager válidas, tem-se então as seguintes expressões matemáticas para os fluxos:

Para fluxo líquido:

$$\vec{J}_l = K_l \rho_l \nabla \mu \quad (\text{Eq. 2.42})$$

em que

K_l = condutividade de líquido, s

μ = potencial químico, J.kg⁻¹

ρ_l = massa específica do líquido, kg.m⁻³

∇ = operador nabla = $\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ (em coordenadas cartesianas)

Para fluxo de vapor:

$$\vec{J}_v = K_v \nabla \rho_v \quad (\text{Eq. 2.43})$$

em que

\vec{J}_v = fluxo de vapor, kg.m⁻².s⁻¹

K_v = condutividade de vapor, m².s⁻¹

Para fluxo de calor na ausência de transporte de massa:

$$\left(\vec{J}_q \right)_m = -K_T \nabla T \quad (\text{Eq. 2.44})$$

em que

$\left(\vec{J}_q \right)_m$ = fluxo de calor na ausência de transporte de massa, J.m⁻².s⁻¹

K_T = condutividade térmica aparente, W.m⁻¹.K⁻¹

T = temperatura termodinâmica, K

Os autores derivaram as seguintes equações de fluxo, para corpos capilares porosos (NEVES, 1982).

Fluxo de calor

$$\left(\vec{J}_q\right)_m = -K_T \nabla T - \left[\rho_l \cdot k_l \cdot R_v \cdot \ln UR + K_v \left(\rho_{vo} \cdot \frac{\partial H}{\partial T} + UR \cdot \frac{d\rho_{vo}}{dT} \right) \right] \frac{R_v \cdot T^2}{UR} \cdot \frac{\partial UR}{\partial U} \cdot \nabla U \quad (\text{Eq. 2.45})$$

em que

UR = umidade relativa, decimal

\vec{J}_q = fluxo de calor, $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$

R_v = constante do gás para o vapor, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

Fluxo de líquido

$$\vec{J}_l = -\rho_l \cdot k_l \cdot R_v \cdot \ln H \cdot \nabla T - \rho_l \cdot k_l \cdot \frac{R_v \cdot T}{H} \cdot \frac{\partial H}{\partial U} \cdot \nabla U \quad (\text{Eq. 2.46})$$

Fluxo de vapor

$$\vec{J}_v = -K_v \left(\rho_{vo} \cdot \frac{\partial H}{\partial T} + H \cdot \frac{d\rho_{vo}}{dT} \right) \cdot \nabla T - K_v \cdot \rho_{vo} \cdot \frac{\partial H}{\partial U} \cdot \nabla U \quad (\text{Eq. 2.47})$$

A equação para conservação de massa é:

$$\frac{\partial (\rho_s \cdot U)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v) \quad (\text{Eq. 2.48})$$

A equação de conservação de energia é:

$$\rho_s \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_s \cdot \Delta h_w \frac{\partial U}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{J}_q - \Delta h_v \nabla \cdot \vec{J}_v - \vec{J}_l \cdot c_l \nabla T - \vec{J}_v \cdot c_v \nabla T \quad (\text{Eq. 2.49})$$

em que

c_p = calor específico do produto, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

c_l = calor específico do líquido, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

c_v = calor específico do vapor, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

h_w = calor diferencial específico de sorção, $J \cdot kg^{-1}$

h_v = calor latente específico de vaporização, $J \cdot kg^{-1}$

As equações 2.48 e 2.49 já foram usadas para analisar a transferência de calor e massa em solos em regime transiente, em milho extrudado e para seca-aeração segundo FORTES e OKOS (1981) e para modelagem físico matemática do processo de seca-aeração realizada por NEVES (1982).

2.2.7. Coeficiente de difusão e constante de secagem

Os coeficientes de difusão e as constantes de secagem de grãos e sementes são determinados para uma equação de secagem específica e são aplicáveis somente dentro de uma determinada faixa de temperatura e teor de umidade para a qual foram ajustados (BROOKER *et alii*, 1974).

A relação entre o coeficiente de difusão e, portanto, a constante de secagem e a temperatura da semente são, geralmente, do tipo Arrhenius. Assim pode-se escrever:

$$D = C_1 \exp (C_2/\theta) \quad (\text{Eq. 2.50})$$

em que

C_1 e C_2 = são constantes que dependem de cada produto particularmente.

O coeficiente de difusão aumenta de acordo com o aumento da temperatura da semente.

HENDERSON e PABIS (1961) observaram que não houve efeito da umidade relativa do ar na constante de secagem, nos seus estudos com milho. Os autores chegaram experimentalmente à equação que descreve a relação entre a constante de secagem e a temperatura absoluta, que é a seguinte:

$$K_s = 0,54 \cdot \exp (-5023 / (1,8 \cdot T_{\text{abs}} + 491.67)) \quad (\text{Eq. 2.51})$$

em que

K_s = constante de secagem, s^{-1}
 T_{abs} = temperatura absoluta, K

ALVARENGA (1980) determinou o coeficiente de difusão líquida para grãos de feijão preto obtidos dos dados de secagem de SATHLER (1979). A equação obtida foi:

$$D = 128,8 \cdot \exp \left(-\frac{4278}{T_{\text{abs}}} \right) \quad (\text{Eq. 2.52})$$

Embora várias teorias tenham sido propostas para predizer o comportamento de secagem de grãos durante o período de secagem a taxa decrescente, somente as relações semi-empíricas e empíricas têm-se mostrado como melhores opções para predizer o processo de secagem (BROOKER *et alii*, 1974; ROSSI e ROA, 1980).

2.2.8. Equações de secagem semi-empíricas e empíricas

Uma simplificação da equação de difusão em coordenadas esféricas tem sido usada para predizer a secagem de grãos. Ao invés de um número infinito de termos, somente o primeiro termo é empregado para calcular a taxa de secagem (BROOKER *et alii*, 1974). Essa simplificação resulta na seguinte equação:

$$\frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (\text{Eq. 2.53})$$

em que

$$k = D \cdot \pi^2 / R^2 = \text{constante de secagem, h}^{-1}$$

$$t = \text{tempo, h}$$

Os resultados obtidos pela Equação 2.53 são diferentes daqueles obtidos pela Equação 2.13, para pequenos valores de t . A diferença entre os valores do teor de umidade calculados pela solução em série da Equação 2.13 e aqueles obtidos pela solução de um termo da Equação 2.53 é menor do que 5 % se a razão adimensional $k \cdot t$ for maior que 1,2, isto é:

$$D \cdot \pi^2 / R^2 > 1,2 \quad (\text{Eq. 2.54})$$

Diversos pesquisadores tem utilizado uma equação de secagem baseada na solução analítica da equação de difusão com as considerações já apresentadas, onde "a" se constitui num recurso para fazer a correção dos demais termos da série

$$\frac{U - U_e}{U_i - U_e} = a \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (\text{Eq. 2.55})$$

em que "a" é um coeficiente geralmente dependente da temperatura e da variedade do produto.

HUSTRULID e FLIKKE (1959) determinaram a curva teórica de secagem de milho em espiga. A Equação por eles encontrada é semelhante à equação 2.53 para esferas ou ao primeiro termo da série da equação 2.13. No entanto, a espiga tem um formato nada semelhante ao de uma esfera, Assim para poder utilizar esta equação os pesquisadores determinaram as dimensões da espiga e a converteram para as dimensões de uma esfera equivalente. O raio da esfera obtido desta maneira recebeu a denominação de raio da esfera equivalente.

$$\frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{D_1 \cdot \pi^2 \cdot t}{R_E^2}\right) \quad (\text{Eq. 2.56})$$

em que

$$D_1 = \text{coeficiente de difusão do produto, m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$R_E = \text{raio da esfera equivalente, m}$$

Hukill citado por BROOKER *et alii*, (1974) propôs que a taxa de secagem de um produto, em um meio com temperatura constante, fosse proporcional à diferença entre a umidade do grão e sua umidade de equilíbrio. A equação proposta é análoga à lei de resfriamento de Newton, sendo freqüentemente utilizada para secagem de produtos agrícolas:

$$\frac{dU}{dt} = -K \cdot (U - U_e) \quad (\text{Eq. 2.57})$$

Separando as variáveis e integrando entre os limites apropriados de acordo com as condições de contorno, obtém-se a relação para estimar a razão de umidade do produto em função do tempo.

$$\frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \text{EXP}(-k.t) \quad (\text{Eq. 2.58})$$

As equações 2.57 e 2.58 são denominadas de equações de secagem do tipo exponencial e a constante k chamada de constante de secagem e tem unidade de t^{-1} .

PAGE (1949) sugeriu a seguinte equação para secagem de milho em camada fina, uma vez que a equação 2.53 não satisfazia seus dados experimentais:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \text{EXP}(-k.t^n) \quad (\text{Eq. 2.59})$$

em que

- RU = razão de umidade, adimensional
- U = teor de umidade do produto, decimal, base seca
- U_e = teor de umidade de equilíbrio, decimal, base seca
- U_i = teor de umidade inicial, decimal, base seca
- k = constante de secagem, h⁻¹
- t = tempo de secagem, h

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:

$$\frac{dU}{d(t^n)} = -k(U - U_e) \quad (\text{Eq. 2.60})$$

O expoente n pode ser considerado como o fator modificador da variável tempo, refletindo a resistência interna da semente 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 também reflete o efeito das condições externas e n representa o efeito das mudanças internas das sementes, em função da maneira com que as condições externas são impostas (MISRA e BROOKER, 1980).

Uma equação totalmente empírica proposta por THOMPSON *et alii* (1968) tem sido bastante utilizada na secagem em camada delgada com os coeficientes A e B modificados apropriadamente para cada produto estudado:

$$t = A . \ln (RU) + B . [\ln(RU)]^2 \quad (\text{Eq. 2.61})$$

em que para milho:

$$\begin{aligned} A &= -1,862 + 0,00488 \cdot T \\ B &= 427,4 \exp(-0,033 \cdot T) \end{aligned}$$

WANG e SINGH (1978) apresentaram uma equação, que segundo eles, apresenta um resultado melhor que a equação de Thompson.

$$\frac{U - U_e}{U_i - U_e} = 1 + A \cdot t + B \cdot t^2 \quad (\text{Eq. 2.62})$$

ROA e MACEDO (1976) descreveram a seguinte equação de secagem em camada delgada:

$$\frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \exp\left[-m(P_{vs} - P_{va})^n \cdot t^q\right] \quad (\text{Eq. 2.63})$$

em que m , n e q são coeficientes que dependem do produto e a pressão do vapor de saturação (P_{vs}) e a pressão de vapor d'água no ar (P_{va}) podem ser calculadas pelas seguintes equações:

$$P_{vs} = 6894,79 \cdot \exp(51,594 - (6834/T_{abs}) - 5,169 \cdot \ln(T_{abs})) \quad (\text{Eq. 2.64})$$

em que

$$T_{abs} = \text{Temperatura absoluta, } ^\circ\text{R}$$

e

$$P_{va} = UR \cdot P_{vs} \quad (\text{Eq. 2.65})$$

Os valores dos coeficientes para feijão carioca são:

$$m = 0,070490; \quad n = 0,139227; \quad q = 0,713140$$

Diversas equações empíricas de secagem são encontradas ainda na literatura mas não são tão utilizadas quanto as aqui descritas.

2.2.9. Efeito da umidade relativa e da velocidade do ar na taxa de secagem

As equações de secagem tem sido escritas em função das variáveis que influenciam a secagem. As variáveis mais pesquisadas são: temperatura, teor de umidade inicial do produto, umidade relativa e fluxo ou velocidade do ar de secagem.

A temperatura tem sido a variável sempre presente na equações que descrevem o processo de secagem (SOKHANSANJ *et alii*, 1984; LI e MOREY 1984; CAVALCANTI MATA, 1995).

De acordo com LI e MOREY (1984), o efeito da umidade relativa sobre a taxa de secagem de produtos agrícolas, inclusive sementes, é relativamente menor para altos valores de razão de umidade, verificados no início da secagem. Segundo esses autores, em consequência disso, a umidade relativa pode ser negligenciada no desenvolvimento de equações de secagem em camada delgada.

SATHLER (1979) estudou o efeito da umidade relativa de 40 e 50% na secagem de sementes de feijão-preto para as temperaturas de 30 a 50 °C, tendo concluído que não existem diferenças significativas entre as curvas de secagem para essas duas umidades relativas.

Muitos autores têm considerado que o efeito da umidade relativa na taxa de secagem seja desprezível, uma vez que já está incluída na equação de secagem quando se determina a razão de secagem, $(U - U_e) / (U_i - U_e)$, onde U_e é função da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem. Contudo este fator pode não estar plenamente contemplado dentro do contexto físico do que ocorre na secagem. Há que considerar também que este fator pode não ser significativo quando se trabalha com temperaturas altas de secagem. No entanto, quando a secagem é feita com temperaturas próximas à do ar ambiente este fator passa a ter uma maior influência sobre a taxa de secagem.

CHRIST (1996), trabalhando com secagem de sementes de canola em camadas finas estudou o comportamento da taxa de secagem para a temperatura de 30 a 60 °C e umidades relativas de 30 a 60%, tendo constatado um efeito significativo da umidade relativa do ar na taxa de secagem. Para isso ajustou o modelo de Page onde os coeficientes "k" e "n" são funções da temperatura e da umidade relativa do ar.

O efeito do fluxo de ar sobre a taxa de secagem em camada delgada tem sido frequentemente negligenciado, uma vez que tem-se constatado, em diversos trabalhos, que para taxa de secagem decrescente, como é o caso da secagem em sementes, o fenômeno mais importante é a difusão da umidade para a área externa da semente. Desta forma, o fluxo de ar na faixa de 0,2 a 1,0 m.s⁻¹, que são os mais utilizados para a secagem de grãos e sementes, não influenciam significativamente a taxa de secagem (HENDERSON e PABIS, 1962; MISRA e BROOKER, 1980; SYARIEF *et alii*, 1984).

Simmonds *et alii* citado, por HALL (1971), estudaram o mecanismo de secagem em camadas finas em grãos de trigo e concluíram que a taxa de secagem era independente da velocidade do ar na faixa de 0,15 a 0,81 m.s⁻¹.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta etapa do presente trabalho foi realizada no Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, usando o Laboratório de Operações Unitárias do Departamento de Engenharia Química - DEQ, ambos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

Para a realização desta pesquisa foram utilizadas sementes de feijão, variedade "carioca" plantado no campo experimental situado no município de Lagoa Seca pertencente a Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária do Estado da Paraíba - EMEPA.

O feijão foi colhido na vagem com um teor de umidade em torno de 46 %, base seca (b.s.), levado ao Laboratório de Processamento e Armazenagem de Produtos Vegetais e debulhado neste local manualmente. Para condução dos testes de secagem em camada delgada, as

sementes foram separadas em lotes de 300 gramas, sendo que, para cada teor de umidade inicial, as sementes foram secas com auxílio de um ventilador utilizando ar ambiente. As sementes que atingiam o teor de umidade desejado eram embaladas em saco de plástico e colocadas em câmaras BOD da FANEN, controladas à temperatura de 5 °C, até que fosse possível conduzir o teste de secagem.

3.1. Secagem em camada delgada

Nesta etapa de condução da pesquisa não houve como objetivo preservar a integridade das qualidade fisiológica das sementes pois o estudo refere-se ao seu comportamento cinético.

Inicialmente foram conduzidos testes de secagem para determinar a influência do teor de umidade inicial na taxa de secagem. Desta forma, foram feitas secagens de sementes de feijão em camada delgada às temperaturas de 30, 40, 50, 60, 70 e 80 °C com teores de umidade inicial de 45, 40, 35, 30 e 25 %, base seca, e velocidade do ar de 0,5 m.s⁻¹.

Em seqüência foram conduzidos testes para verificação da influência da velocidade do ar na taxa de secagem das sementes de feijão. Para este fim, foram feitas secagens das sementes com teores de umidade inicial de 45, 35 e 25%, base seca, e velocidade do ar de 0,2; 0,5 e 0,8 m.s⁻¹ às temperaturas de 30, 40, 50, 60, 70 e 80 °C.

Para verificação do efeito da umidade relativa do ar em temperaturas mais baixas foram feitas secagens de sementes de feijão às temperaturas de 30, 40 e 50 °C e umidades relativas do ar de 20, 30, 40 e 50%.

As umidades relativas do ar foram obtidas por meio de um filtro de sílica gel colocado na zona de homogeneização do ar (Figura 2.3). A umidade relativa era controlada por meio de um higrômetro DH 106. Quando existia um desvio de aproximadamente 2% na umidade relativa parte ou toda a sílica gel era removida e adicionada uma nova quantidade ao filtro e a vazão novamente regulada, caso necessário.

As sementes de feijão eram retiradas dos sacos plásticos, que estavam em câmara fria, a 5 °C e colocadas no ambiente até que atingissem o equilíbrio térmico com o meio. Em seguida, para cada teste de secagem foi previamente determinado o teor de umidade das sementes em estufa marca FANEN modelo 330, com circulação de ar segundo as regras para análise de sementes (BRASIL, 1976) com modificações no binômio tempo temperatura. A temperatura utilizada foi de 130 °C durante um período de tempo de 4 horas.

Posteriormente, uma amostra de 100 gramas de sementes era colocada em um secador experimental localizado no Laboratório de Operações Unitárias do DEQ com o sistema pré-estabilizado para a temperatura e a vazão de ar desejadas (Figura 2.3). Os teste foram realizados duas vezes (2 repetições).

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

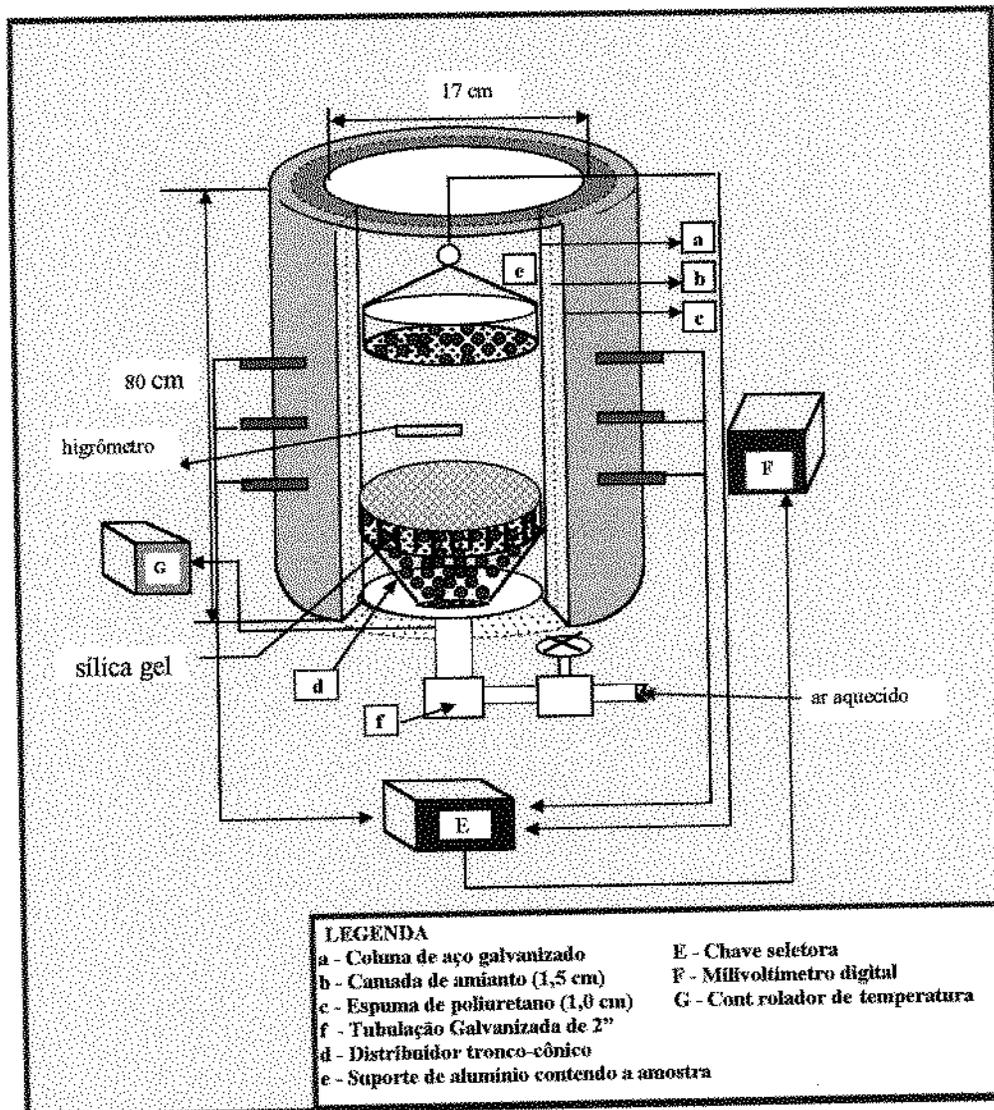


FIGURA 2.3 - Secador experimental utilizado para a secagem de sementes de feijão "carioca".

3.2. Tratamento dos dados

Foram ajustados aos dados experimentais a equação baseada na teoria de difusão de líquido (Equação 2.53) com um e dois termos, e as equações propostas por Page (Equação 2.59) e Thompson (Equação 2.61). A determinação dos coeficientes dessas equações foi feita por regressão não linear utilizando o programa STATISTICA 5.0.

Para o cálculo do teor de umidade de equilíbrio do feijão "carioca" foram utilizadas as curvas de desorção obtidas no Capítulo 1, utilizando a equação de Henderson modificada por este autor, devido a sua simplicidade e coeficiente de determinação satisfatório.

$$U_e = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-0,003944 \cdot T^{0,29328515}} \right]^{0,58391229} \quad (\text{Eq. 2.66})$$

em que

- U_e = Umidade de equilíbrio, % base seca
- T_e = Temperatura, °C
- UR = Umidade Relativa, decimal

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de cada etapa desta pesquisa com a cinética de secagem utilizando-se o feijão variedade "carioca" são descritos a seguir:

4.1. Curvas de secagem em camada fina

Os dados de secagem de sementes de feijão obtidos experimentalmente e as razões de umidade correspondentes encontram-se no Apêndice 2A, conjuntamente com os valores calculados pelas Equações de difusão de líquido simplificada, de Thompson e de Page.

Nas Tabelas 2.1 a 2.4 encontram-se os coeficientes das equações de difusão líquida simplificada com um e dois termos da série, e os coeficientes da equação de Page e de Thompson, respectivamente, para cada temperatura e teor de umidade inicial de secagem estudados, obtidos por regressão não linear.

Na Tabela 2.1, que mostra os coeficientes da equação de difusão de líquido simplificada para o primeiro termo da série, observou-se que não existia uma variação acentuada do coeficiente "a", encontrando-se valores entre 0,83 e 0,87. Diante deste fato, determinou-se um valor médio para representar o coeficiente "a", que foi de **0,849275**, com um coeficiente de variação de **1,89 %**. As Figuras de 2.4 a 2.8 mostram respectivamente, os dados experimentais e os calculados com as equações de difusão de líquido simplificada para o primeiro termo da série para os teores de umidade inicial de 25 a 45 % base seca. As curvas dos dados calculados foram elaboradas a partir dos valores do coeficiente **k** obtidos por meio das regressões não lineares feitas em função da temperatura de secagem e do teor de umidade inicial das sementes de feijão. A superfície de resposta do coeficiente **k** é mostrado na Figura 2.9.

Observa-se na Tabela 2.1, que os coeficientes de determinação são inferiores aos das demais equações estudadas e que as representações gráficas da equação de difusão simplificada não permitem prever satisfatoriamente as taxas de secagem em camada delgada em toda sua extensão. O comportamento mais satisfatório dessas curvas ocorre depois de 50 minutos e antes dos 300 minutos de secagem, o que corresponde a uma razão de umidade aproximada de 0,8 a 0,4, respectivamente.

O valor inicial do coeficiente "a" se aproxima do valor obtido por SOARES (1986) para soja, que foi de 0,8365 com um coeficiente de variação de 5,35%. No entanto, o autor atribui como satisfatória essa equação para soja. Os dados obtidos pelo autor vão até uma razão de umidade de 0,2 e na maioria dos trabalhos com feijão até 0,3 ou 0,4. Portanto aí pode estar a resposta do porquê que em alguns casos os coeficientes se apresentam satisfatórios e em outros casos não. Pois, observando as Figuras de 2.4 a 2.8 verifica-se que os maiores desvios se dão a partir da razão de umidade abaixo de 0,3.

Os resultados concordam com as afirmações feitas por BROOKER *et alii* (1974) e FORTES e OKOS (1980), de que esses modelos dificilmente permitem descrever a secagem em camada delgada em toda sua extensão, daí a necessidade do desenvolvimento de novos modelos teóricos.

No período inicial ($t = 0$) este comportamento não satisfatório já era esperado, pois a Razão de umidade é 1, e no modelo de difusão simplificado este valor é equivalente ao valor de "a", ou seja de 0,849275.

TABELA 2.1 - Coeficiente da equação de difusão de líquido simplificada, usando um termo da série obtidos por meio de regressão não linear para cada temperatura e teor de umidade inicial estudados.

Equação de difusão de líquido simplificada usando um termo da série				
RU= a.exp (+k.t)				
Temperatura o C.	Umidade Inicial (% base seca)	a	k (t ⁻¹)	R ²
30	25	0,8545397	- 0,0015032	96,18 %
40		0,8546037	- 0,0017659	96,46 %
50		0,8491988	- 0,0023014	97,32 %
60		0,8562523	- 0,0034335	98,15 %
70		0,8712237	- 0,0057597	98,17 %
80		0,8915663	- 0,0089397	98,86 %
30	30	0,8512342	- 0,0014435	96,40 %
40		0,8385731	- 0,0022416	96,91 %
50		0,8361083	- 0,0030353	97,44 %
60		0,8404038	- 0,0041285	97,96 %
70		0,8579675	- 0,0069810	97,93 %
80		0,8720703	- 0,0089473	98,41 %
30	35	0,8466675	- 0,0017041	96,67 %
40		0,8332947	- 0,0025557	97,02 %
50		0,8344531	- 0,0030306	97,39 %
60		0,8375703	- 0,0044542	97,95 %
70		0,8491550	- 0,0065788	97,63 %
80		0,8717719	- 0,0093013	98,41 %
30	40	0,8431474	- 0,0015696	96,30 %
40		0,8331714	- 0,0025471	97,01 %
50		0,8237743	- 0,0032469	97,19 %
60		0,8304164	- 0,0045507	97,79 %
70		0,8565897	- 0,0075998	97,93 %
80		0,8717919	- 0,0093624	98,41 %
30	45	0,8461480	- 0,0017332	96,70 %
40		0,8369856	- 0,0026048	97,18 %
50		0,8312129	- 0,0034494	97,50 %
60		0,8363248	- 0,0048746	97,99 %
70		0,8509566	- 0,0068672	97,68 %
80		0,8710696	- 0,0091803	98,39 %
média		0,849275		
Coeficiente de Variação - CV		1,89 %		

Na Tabela 2.2, observa-se fato semelhante ao ocorrido nas equações de difusão de líquido simplificada para o primeiro termo da série, onde foram encontradas tendências para os coeficientes "a" e "b". Notou-se que o valor do coeficiente "a" varia em sua maioria entre 0,57 e 0,63 e o coeficiente "b" entre 0,31 e 0,39. Calculando a média e determinado-se o coeficiente de variação, foram obtidos os valores de 0,599674 para "a", 0,358103 para "b" e coeficientes de variação de 5,38% e 5,01%, respectivamente. Observa-se também que o coeficiente "a" é muito próximo ao valor de $6/\pi^2$ que é 0,607927. A partir deste fato foram feitas novas regressões fixando-se este valor para "a", observando-se ainda que os valores de "b"

estavam próximos do valor de 0,39. Desta forma, procederam-se novas análises de regressão não linear fixando-se os valores de “a” em 0,607927 e “b” em 0,39.

TABELA 2.2 - Coeficientes da equação de difusão de líquido simplificada usando dois termos da série obtidos por meio de regressão não linear para cada temperatura e teor de umidade inicial estudados.

Equação de Difusão líquida simplificada usando dois termos da série						
RU= a.exp (-k'.t) + b.exp (-k''.t)						
Temperatura o C.	Umidade Inicial (% base seca)	a	k' (t ⁻¹)	b	k'' (t ⁻¹)	R ²
30	25	0,614017	- 0,0007585	0,333118	- 0,0072656	99,78 %
40		0,612272	- 0,0009116	0,336342	- 0,0085468	99,78 %
50		0,587745	- 0,0014139	0,360966	- 0,0118406	99,81 %
60		0,595699	- 0,0022576	0,360971	- 0,0162698	99,86 %
70		0,660786	- 0,0042804	0,313602	- 0,0291772	99,90 %
80		0,666173	- 0,0066106	0,314661	- 0,0371848	99,92 %
30	30	0,599669	- 0,0008506	0,345826	- 0,0079922	99,79 %
40		0,575499	- 0,0013440	0,368380	- 0,0120154	99,79 %
50		0,568756	- 0,0018886	0,378196	- 0,0155413	99,82 %
60		0,583137	- 0,0027246	0,372168	- 0,0206922	99,88 %
70		0,631267	- 0,0049975	0,341606	- 0,0348529	99,92 %
80		0,634945	- 0,0063550	0,342095	- 0,0398019	99,95 %
30	35	0,586737	- 0,0009986	0,357320	- 0,0091740	99,78 %
40		0,566309	- 0,0015389	0,376844	- 0,0135557	99,78 %
50		0,566641	- 0,001874-	0,379635	- 0,0155991	99,81 %
60		0,583955	- 0,0029653	0,372597	- 0,0227026	99,86 %
70		0,624253	- 0,0046814	0,366475	- 0,0346663	99,88 %
80		0,632411	- 0,0065697	0,344827	- 0,0411545	99,92 %
30	40	0,586265	- 0,0009098	0,355772	- 0,0087403	99,76 %
40		0,566090	- 0,0015324	0,376942	- 0,0135154	99,78 %
50		0,555606	- 0,0019946	0,388007	- 0,0172241	99,78 %
60		0,577416	- 0,0030102	0,377690	- 0,0238873	99,84 %
70		0,624102	- 0,0053715	0,349041	- 0,0372239	99,90 %
80		0,631588	- 0,0066025	0,345650	- 0,0413059	99,92 %
30	45	0,585769	- 0,0010163	0,358184	- 0,0093213	99,78 %
40		0,570383	- 0,0015837	0,374555	- 0,0136017	99,80 %
50		0,565197	- 0,0021691	0,382490	- 0,0177843	99,81 %
60		0,586786	- 0,0032798	0,371851	- 0,0251201	99,86 %
70		0,618797	- 0,0048396	0,352235	- 0,0347539	99,88 %
80		0,631940	- 0,0064847	0,345050	- 0,0407855	99,92 %
Média		0,599674		0,358103		
Coeficiente de Variação- CV		5,38%		5,01%		

TABELA 2.3 - Coeficientes da equação de Page obtida por regressão não linear para cada temperatura e teor de umidade inicial estudada

Equação de Page				
RU= exp (+ k. t ⁿ)				
Temperatura o C.	Umidade Inicial (% base seca)	k (min ⁻¹)	n	R ²
30	25	- 0,0202102	0,60125	99,98
40		- 0,0217078	0,60724	99,98
50		- 0,0267162	0,62097	99,99
60		- 0,0285526	0,65568	99,99
70		- 0,0312793	0,70257	99,98
80		- 0,0337566	0,74633	99,97
30	30	- 0,0221020	0,60124	99,99
40		- 0,0297538	0,60211	99,98
50		- 0,0336665	0,61588	99,98
60		- 0,0359397	0,64031	99,99
70		- 0,0394974	0,68601	99,97
80		- 0,0407981	0,71099	99,99
30	35	- 0,0247676	0,60112	99,97
40		- 0,0327945	0,60130	99,98
50		- 0,0342315	0,61313	99,98
60		- 0,0380329	0,63988	99,99
70		- 0,0414582	0,67026	99,99
80		- 0,0420972	0,71004	99,97
30	40	- 0,0250771	0,59813	99,99
40		- 0,0327964	0,60094	99,99
50		- 0,0388262	0,60115	99,98
60		- 0,0410186	0,62997	99,97
70		- 0,0421371	0,68482	99,97
80		- 0,0423027	0,70996	99,96
30	45	- 0,0250622	0,60111	99,99
40		- 0,0317518	0,60822	99,96
50		- 0,0368681	0,61587	99,99
60		- 0,0399379	0,64223	99,98
70		- 0,0418187	0,67386	99,98
80		- 0,0419735	0,70893	99,99

TABELA 2.4- Coeficientes da equação de Thompson obtida por regressão não linear para cada temperatura e teor de umidade inicial estudada

Equação de Thompson				
$t = A \cdot \ln(RU) + B \cdot (\ln(RU))^2$				
Temperatura o C.	Umidade Inicial (% base seca)	A	B	R ²
30	25	- 262,46737	386,84157	99,96 %
40		- 236,56226	307,25313	99,93 %
50		- 193,73681	157,70733	99,92 %
60		- 175,92521	072,52078	99,90 %
70		- 095,79011	043,90207	99,91 %
80		- 080,40305	018,19213	99,91 %
30	30	- 239,90084	323,60156	99,94 %
40		- 171,25477	179,71411	99,93 %
50		- 153,40413	109,10616	99,93 %
60		- 142,18300	061,16813	99,91 %
70		- 077,86001	036,05359	99,91 %
80		- 072,27333	022,45478	99,90 %
30	35	- 214,18421	258,16684	99,94 %
40		- 155,31730	150,02941	99,94 %
50		- 150,80311	110,91350	99,93 %
60		- 135,35442	054,70038	99,91 %
70		- 075,45893	042,19101	99,91 %
80		- 070,20916	021,42700	99,90 %
30	40	- 206,95324	302,02886	99,94 %
40		- 154,93094	151,19407	99,94 %
50		- 131,19681	107,30690	99,94 %
60		- 126,49086	056,47897	99,91 %
70		- 073,10133	032,29222	99,91 %
80		- 069,82727	021,27758	99,91 %
30	45	- 211,49414	252,27810	99,94 %
40		- 161,90164	141,03674	99,93 %
50		- 140,24096	090,91912	99,93 %
60		- 127,73063	047,79393	99,91 %
70		- 076,10277	038,37611	99,83 %
80		- 070,507456	021,97922	99,91 %

Os valores dos coeficientes k' e k'' são mostrados na Tabela 2.5 onde constata-se que os coeficientes de determinação estão bem próximos aos valores apresentados na Tabela 2.2 e podem ser considerados equivalentes. A vantagem desta última equação é sua proximidade ao modelo teórico.

A equação utilizando dois termos da série, embora possa prever melhor os dados experimentais, apresenta a desvantagem de não permitir a determinação diretamente do tempo de secagem em simulação de camada espessa, em função desta equação ser implícita.

TABELA 2.5 - Coeficientes da equação de difusão de líquido simplificada usando dois termos da série obtidos por meio de regressão não linear para cada temperatura e teor de umidade inicial estudada, usando dois coeficientes fixos

Equação de Difusão líquida simplificada usando dois termos da série				
RU= 0,607927.EXP (+k'.t) + 0,39.EXP (+k".t)				
Temperatura o C.	Umidade Inicial (% base seca)	k'	k"	R ²
30	25	- 0,000731	-0,0090073	99,45%
40		- 0,0008855	-0,0105330	99,50 %
50		- 0,0014516	-0,0157702	99,66 %
60		- 0,0022812	-0,0200587	99,79 %
70		- 0,0039568	-0,0264596	99,83 %
80		- 0,0061404	-0,0328625	99,91 %
30	30	- 0,0008483	-0,0105136	99,50 %
40		- 0,0014191	-0,0171165	99,60 %
50		- 0,0020094	-0,0219928	99,69 %
60		- 0,0028172	-0,0265917	99,78 %
70		- 0,0048101	-0,0349949	99,84 %
80		- 0,0061024	-0,0390228	99,88 %
30	35	- 0,0010265	-0,0127117	99,55 %
40		- 0,0016566	-0,0198669	99,62 %
50		- 0,0020285	-0,0223079	99,68 %
60		- 0,0030616	-0,0288875	99,74 %
70		- 0,0045456	-0,0358750	99,82 %
80		- 0,0063286	-0,0406439	99,88 %
30	40	- 0,0009375	-0,0122898	99,50 %
40		- 0,0016504	-0,0198365	99,62 %
50		- 0,0021892	-0,0258583	99,65 %
60		- 0,0031455	-0,0312871	99,77 %
70		- 0,0052230	-0,0382435	99,85 %
80		- 0,0063674	-0,0409028	99,54 %
30	45	- 0,0010479	-0,0129680	99,55 %
40		- 0,0016883	-0,0194448	99,64 %
50		- 0,0023274	-0,0252692	99,70 %
60		- 0,0033700	-0,0313119	99,80 %
70		- 0,0047378	-0,0366659	99,83 %
80		- 0,0062504	-0,0403677	99,88 %

Nas Figuras de 2.10 a 2.14 estão os dados experimentais e os calculados com as equações de difusão de líquido simplificada usando dois termos da série para os teores de umidade inicial de 25 a 45 %, base seca, respectivamente. As curvas dos dados calculados foram elaboradas a partir dos valores dos coeficientes "a" = 0,607927, "b" = 0,39 e k' e k" obtidos por meio de regressão não linear em função da temperatura de secagem e do teor de umidade inicial das sementes de feijão. A superfície de resposta dos coeficientes k' e k" estão nas Figuras 2.15 e 2.16, respectivamente.

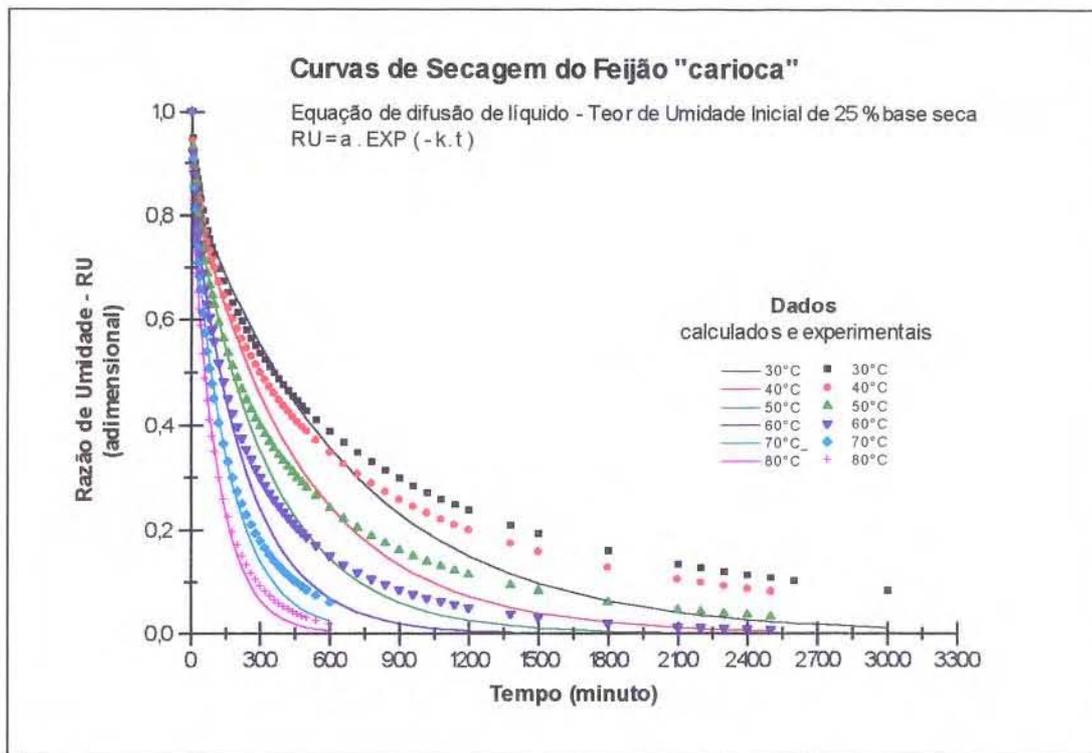


FIGURA 2.4 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada da **teoria de difusão de líquido utilizando o primeiro termo da série**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 25% b.s.

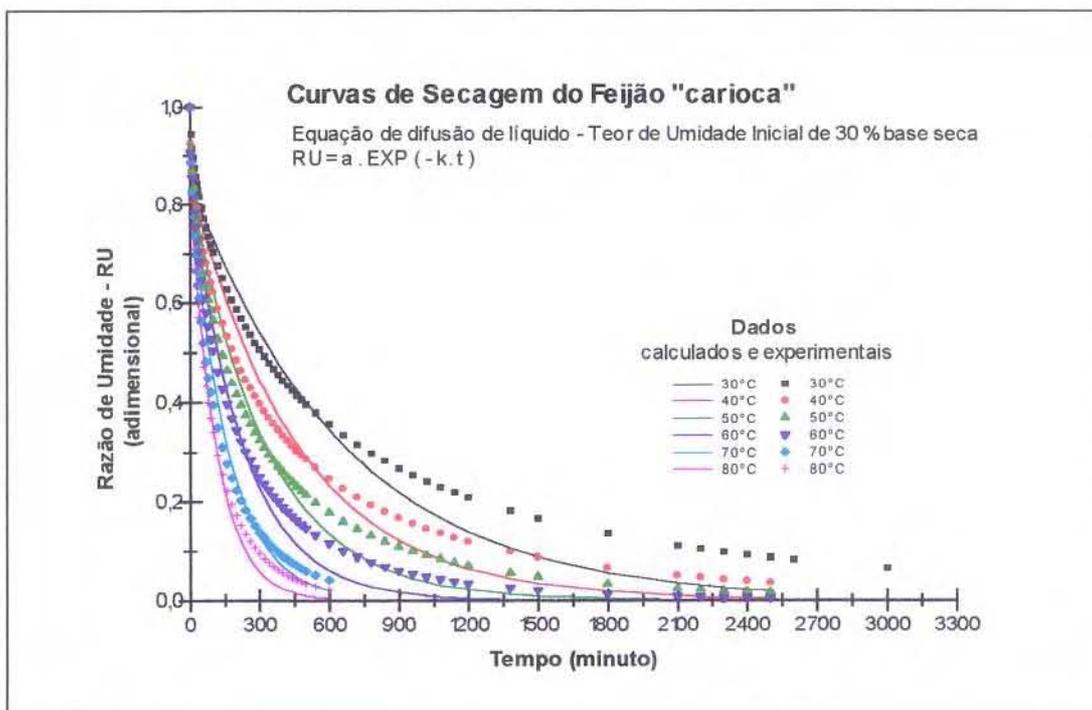


FIGURA 2.5 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada da **teoria de difusão de líquido utilizando o primeiro termo da série**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 30% b.s.

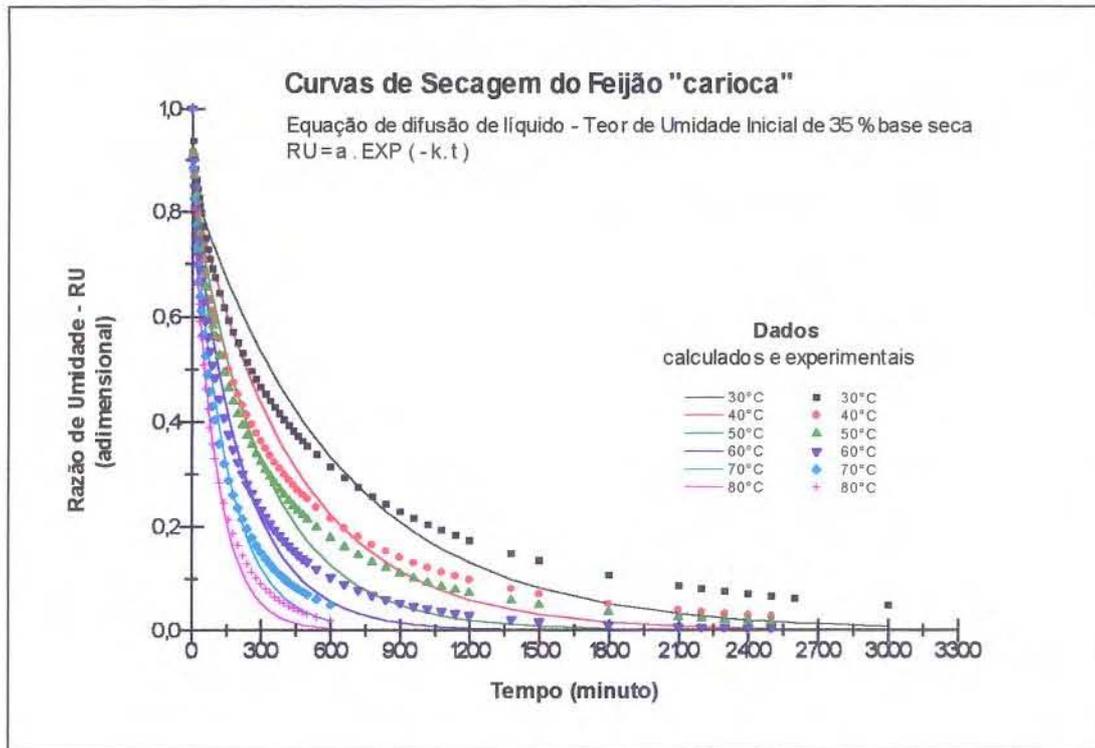


FIGURA 2.6 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada da **teoria de difusão de líquido utilizando o primeiro termo da série**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 35% b.s.

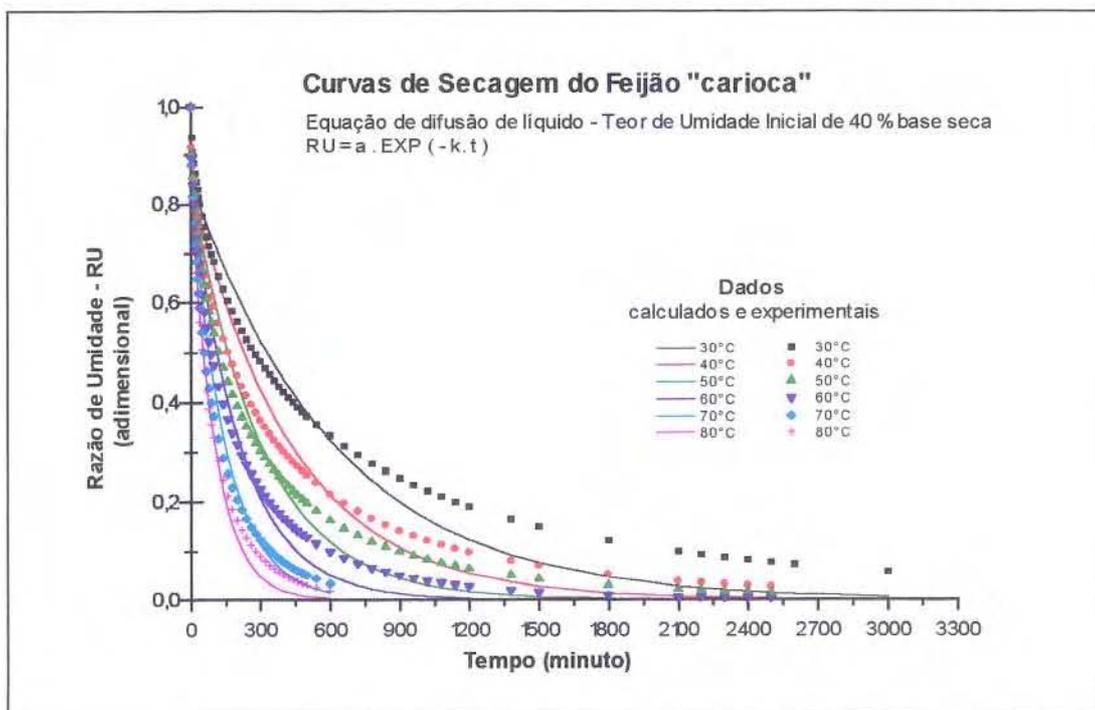


FIGURA 2.7 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculados pela equação simplificada da **Teoria de difusão de líquido utilizando o primeiro termo da série**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 40% b.s.

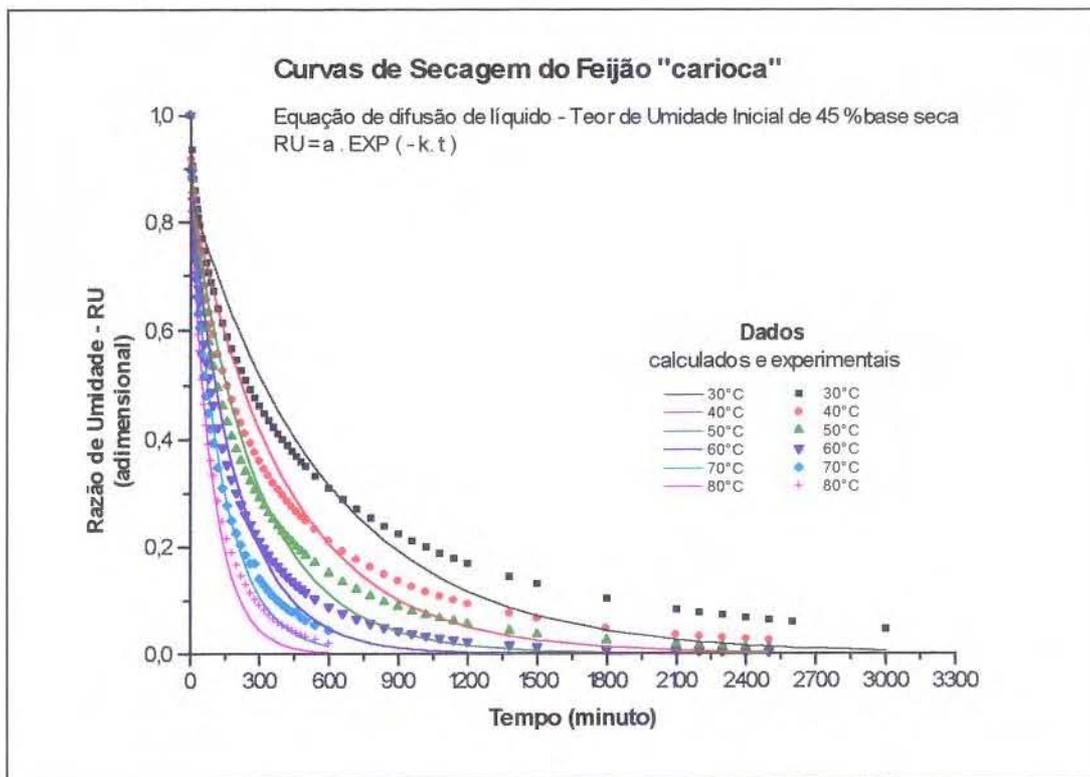


FIGURA 2.8 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculados pela equação simplificada da teoria de difusão de líquido utilizando o primeiro termo da série, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 45% b.s.

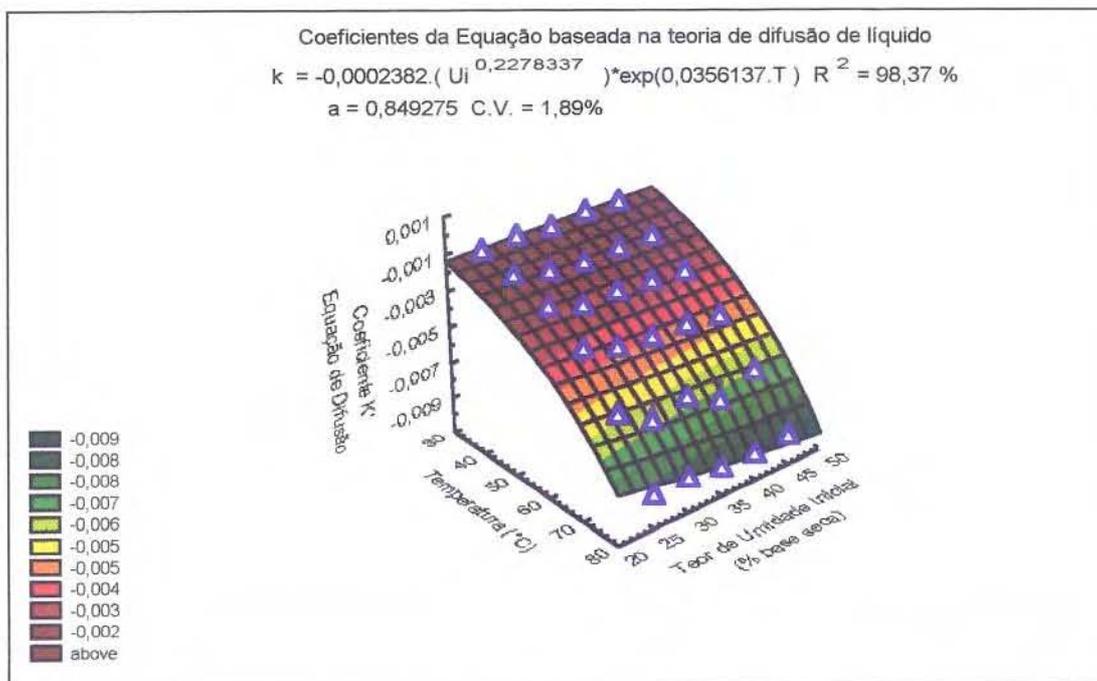


FIGURA 2.9 - Superfície de resposta do parâmetro “k” da equação simplificada baseada na teoria de difusão de líquido utilizando o primeiro termo da série, obtidas por regressão não linear.

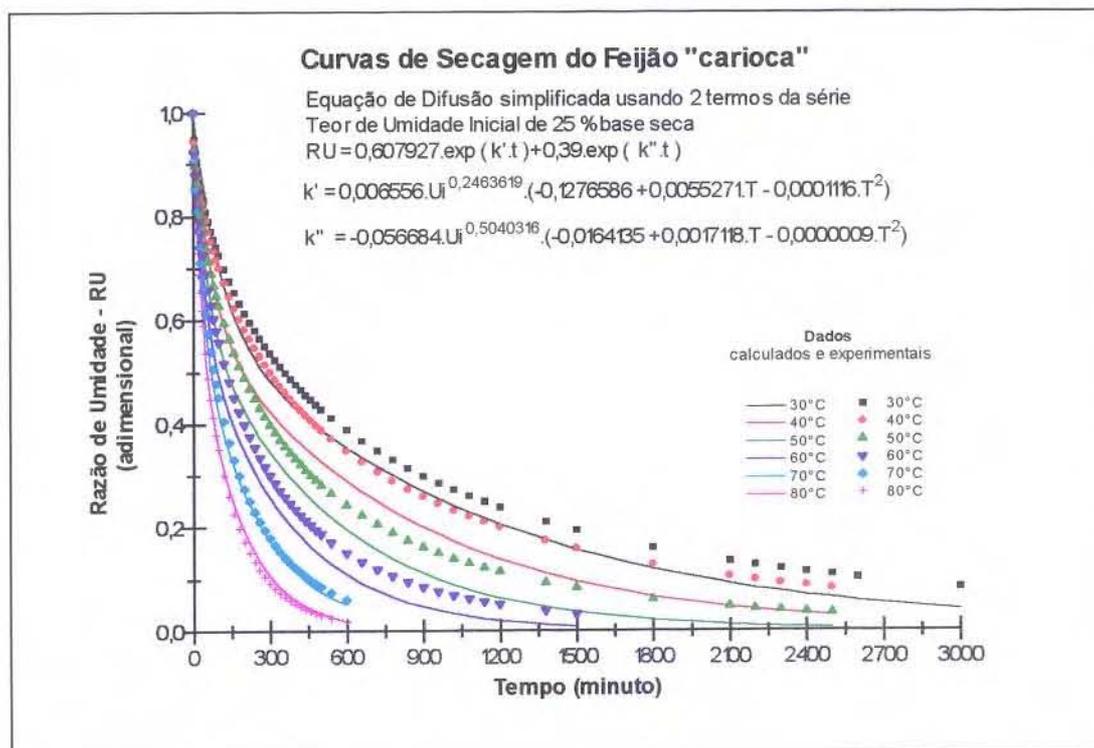


FIGURA 2.10 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada baseada na **teoria de difusão de líquido utilizando dois termo da série**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 25% b.s.

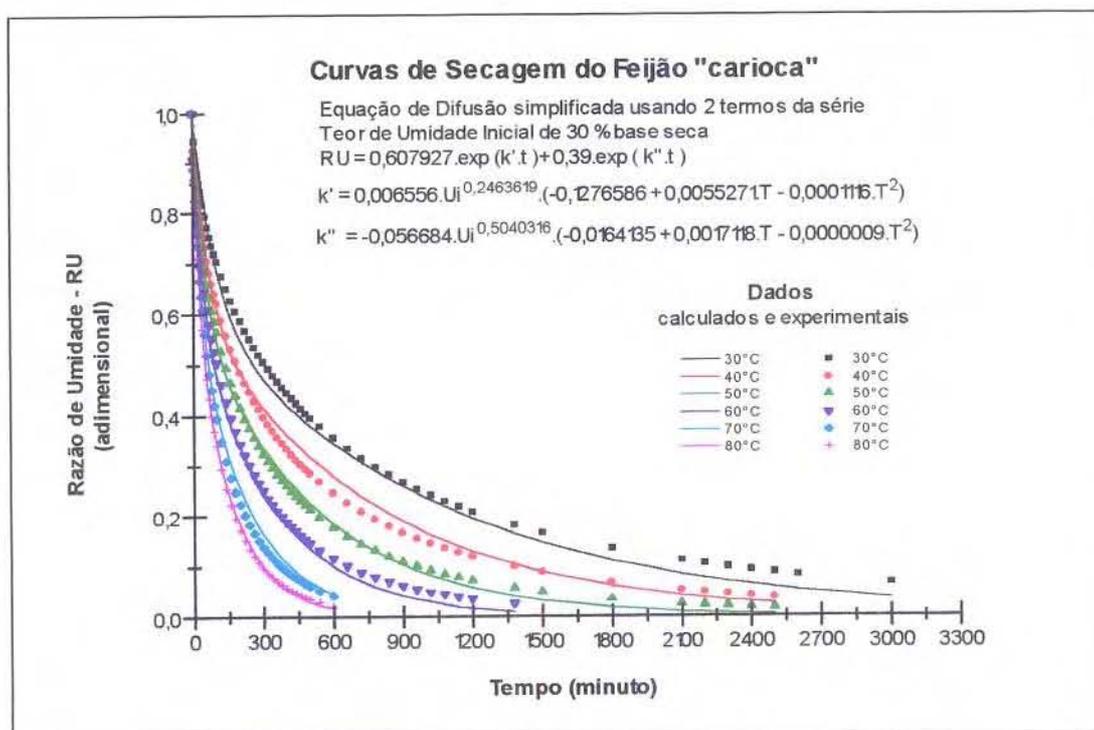


FIGURA 2.11 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada baseada na **teoria de difusão de líquido utilizando dois termo da série**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 30% b.s.

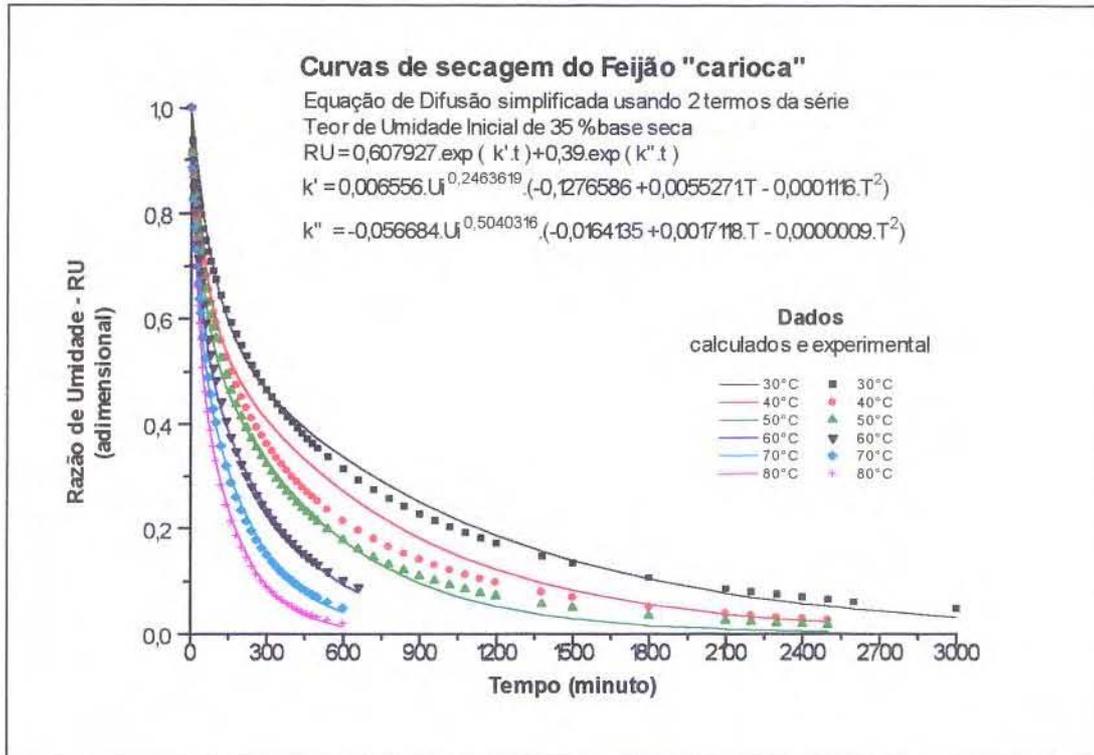


FIGURA 2.12 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada baseada na **teoria de difusão de líquido utilizando dois termo da série**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 35% b.s.

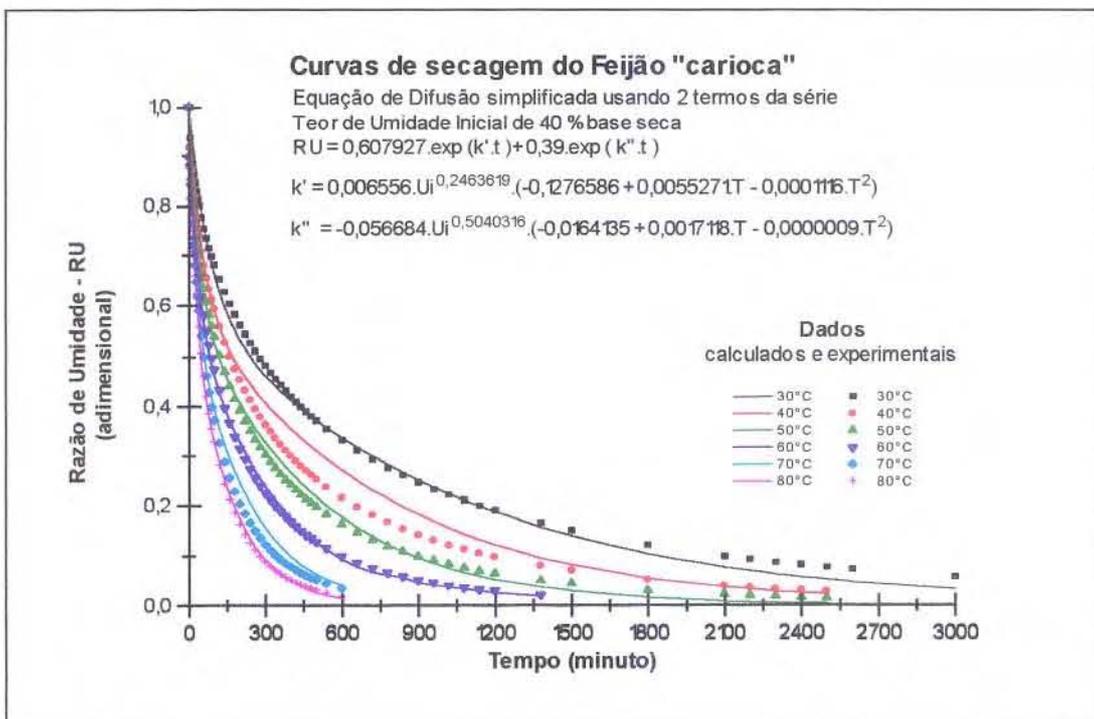


FIGURA 2.13 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada baseada na **teoria de difusão de líquido utilizando dois termo da série**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 40% b.s.

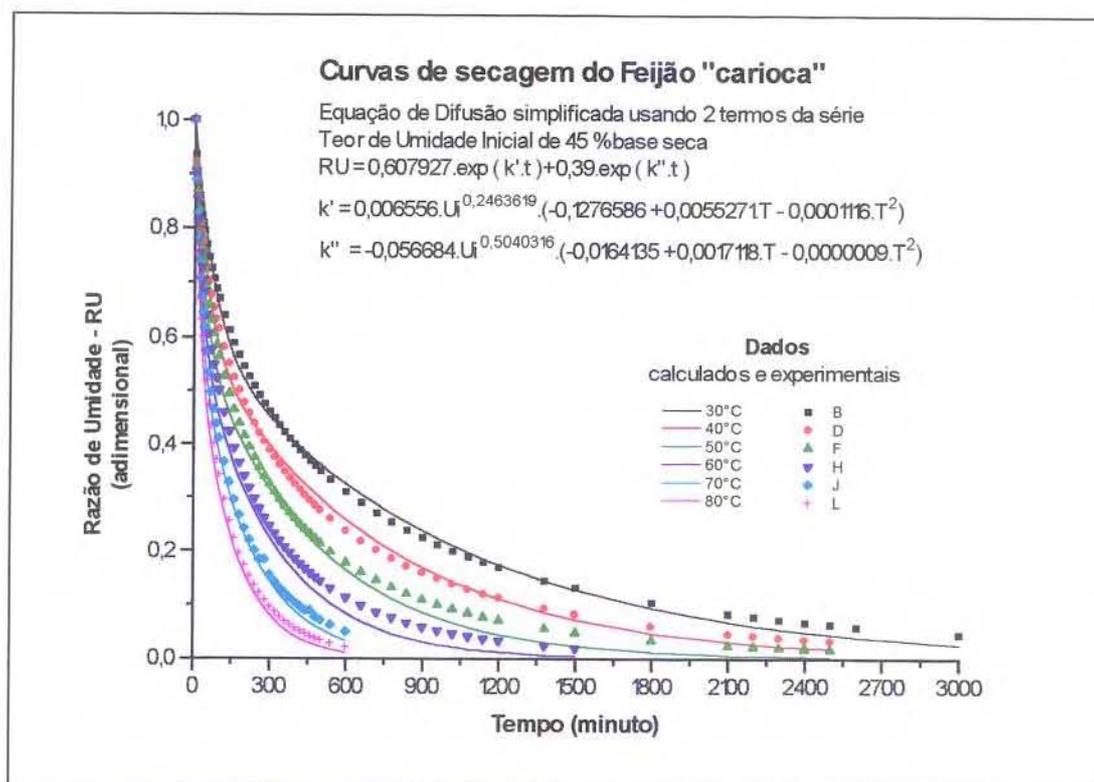


FIGURA 2.14 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação simplificada baseada na teoria de difusão de líquido utilizando dois termo da série, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 45% b.s.

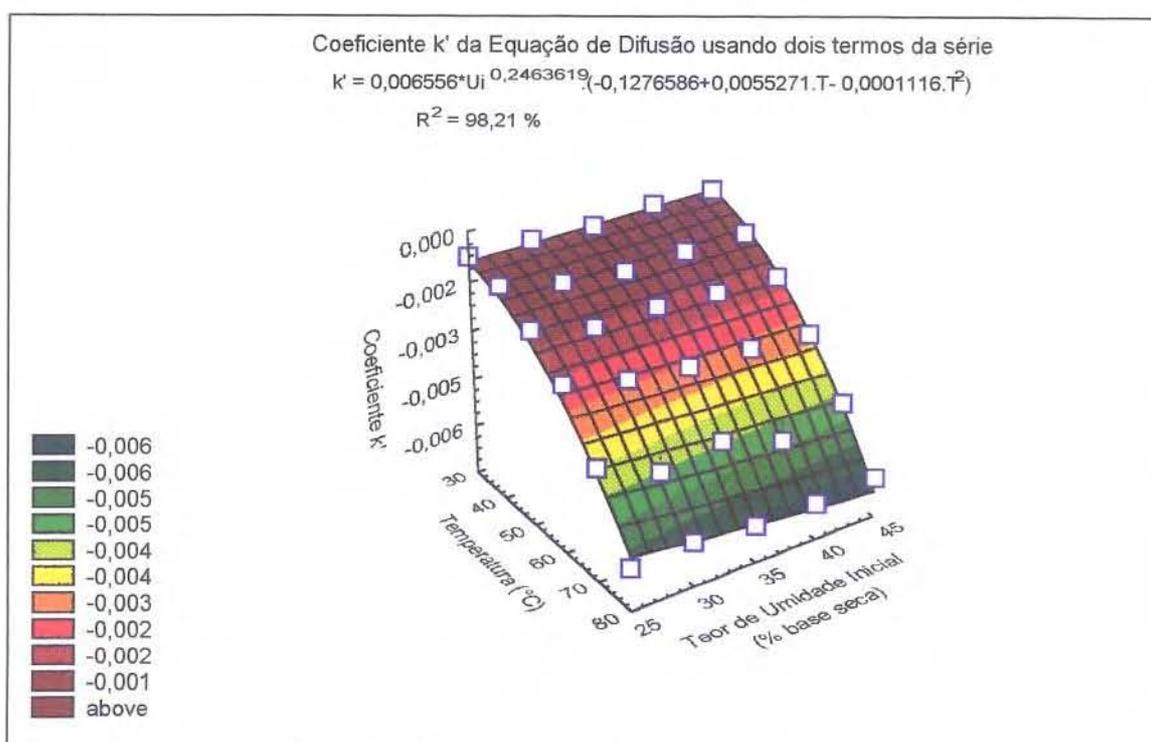


FIGURA 2.15 - Superfície de resposta do parâmetro k' da equação simplificada baseada na teoria de difusão de líquido utilizando dois termos da série, obtida por regressão não linear.

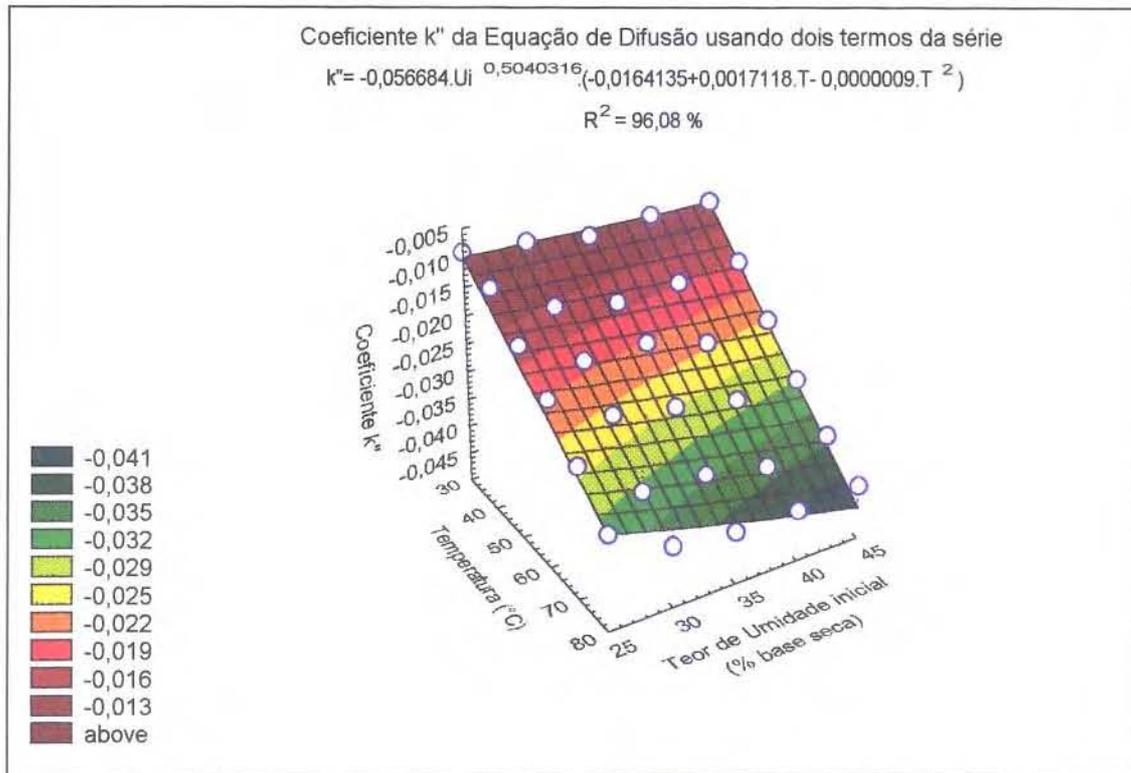


FIGURA 2.16 - Superfície de resposta do parâmetro k'' da equação simplificada baseada na Teoria de difusão de líquido utilizando dois termos da série, obtidas por regressão não linear.

Nas Tabelas 2.3 e 2.4 onde estão os coeficientes das equações de Page e Thompson obtidos por regressão não linear, observa-se que os coeficientes de determinação para a equação proposta por Page são superiores aos da equação de Thompson. No entanto é possível dizer que estas duas equações se equivalem, já que essas diferenças são mínimas e estão na ordem de duas casas decimais. Este mesmo fato é verificado para a equação de difusão de líquido utilizando dois termos da série. Contudo a equação de Page e a de Thompson são as equações de mais fácil uso na simulação de secagem.

Nas Figuras de 2.17 a 2.21 e de 2.22 a 2.26 encontram-se os dados experimentais e calculados usando as equações de Page e Thompson, para os teores de umidade inicial de 25 a 45 % base seca, respectivamente. As curvas dos dados calculados estão representadas graficamente a partir dos valores dos coeficientes " k " e " n " da equação de Page e " A " e " B " da equação de Thompson, obtidos por das regressão não linear em função da temperatura de secagem e do teor de umidade inicial das sementes de feijão, sendo que a superfície de resposta para os respectivos coeficientes estão nas Figuras de 2.27 a 2.30.

Os resultados deste trabalho mostrando que as equações de Page e Thompson são as que apresentam um melhor comportamento para representar a secagem de grãos e sementes em camada delgada, vem reforçar esta mesma afirmação feita por diversos autores para diversos produtos (O'CALLAGHAN *et alii*, 1971, MISRA e BROOKER, 1980; SOARES, 1986; CAVALCANTI MATA, 1993; CHRIST, 1996).

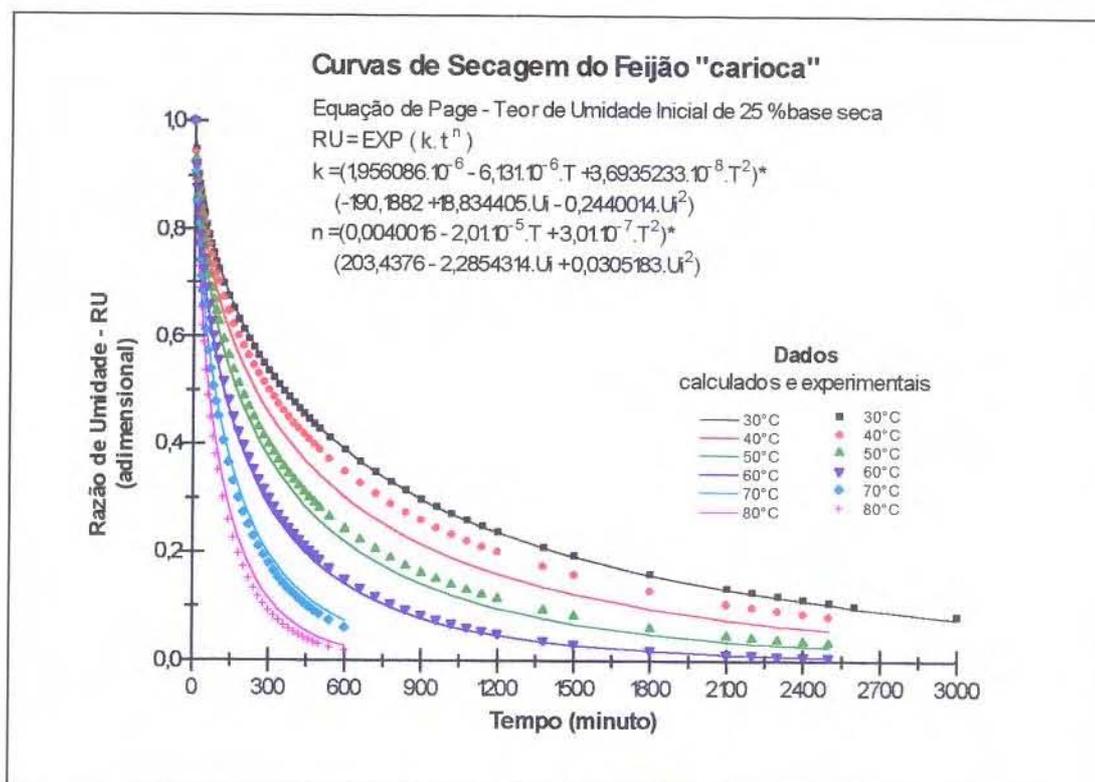


FIGURA 2. 17 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Page, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 25% b.s.

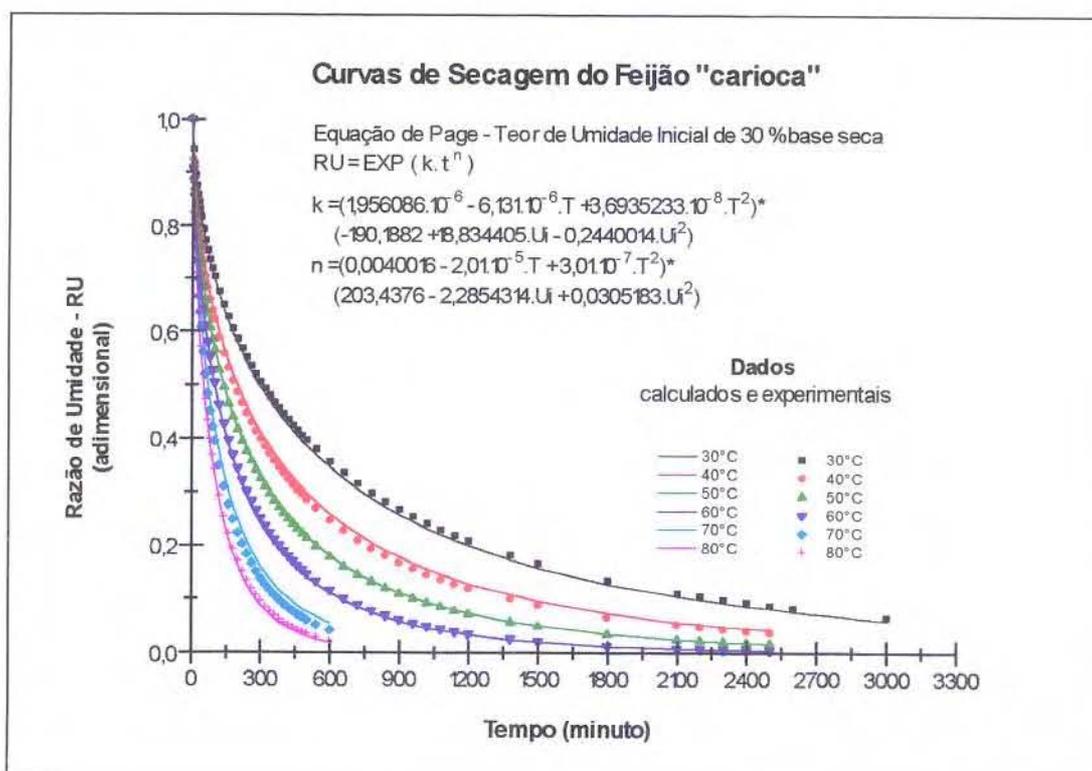


FIGURA 2.18 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Page, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 30% b.s.

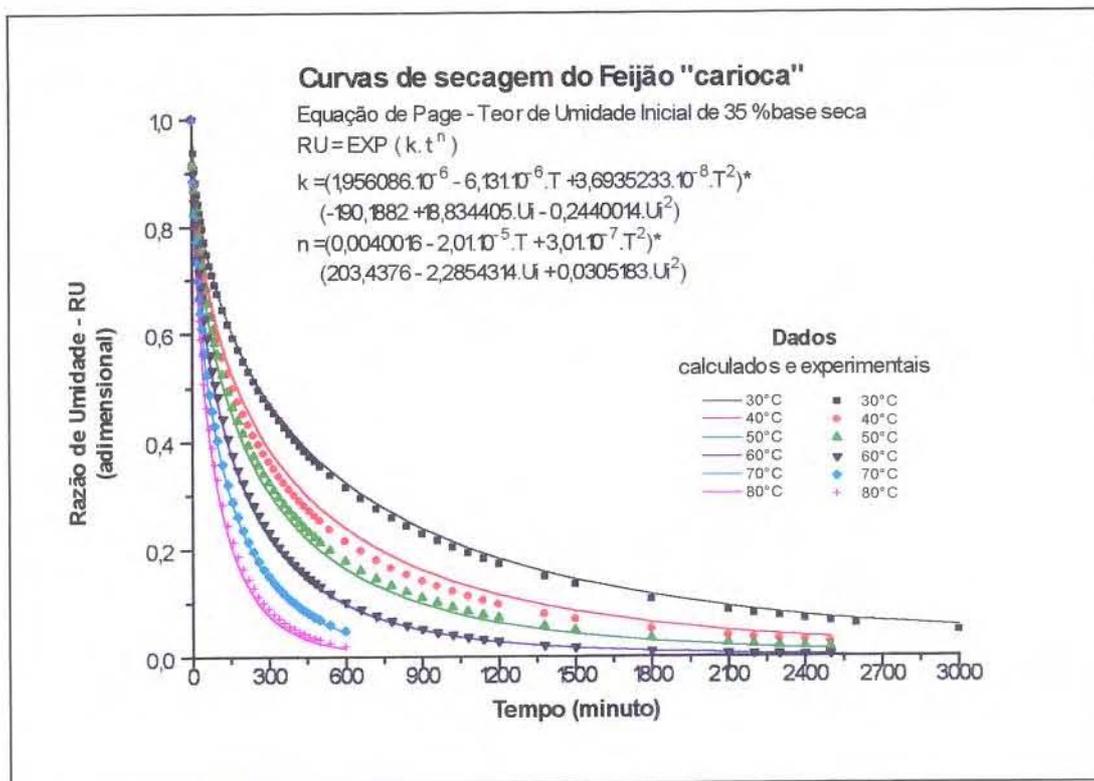


FIGURA 2.19 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Page, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 35% b.s.

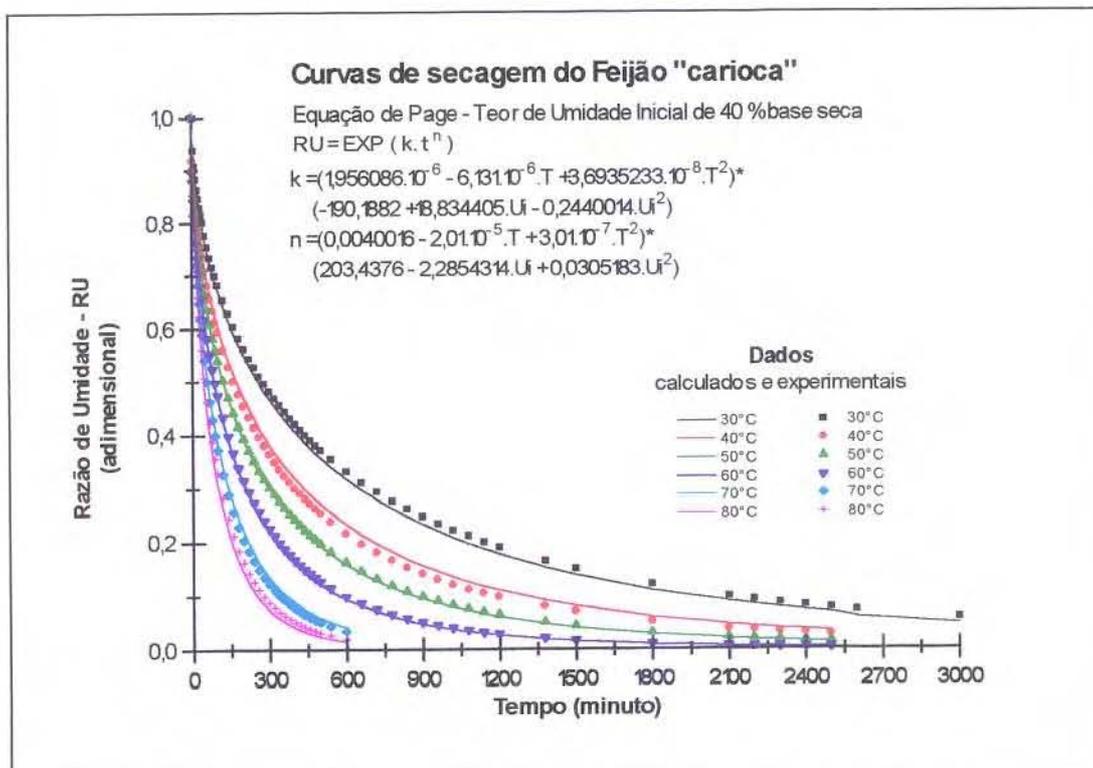


FIGURA 2.20 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de Page, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 40% b.s.

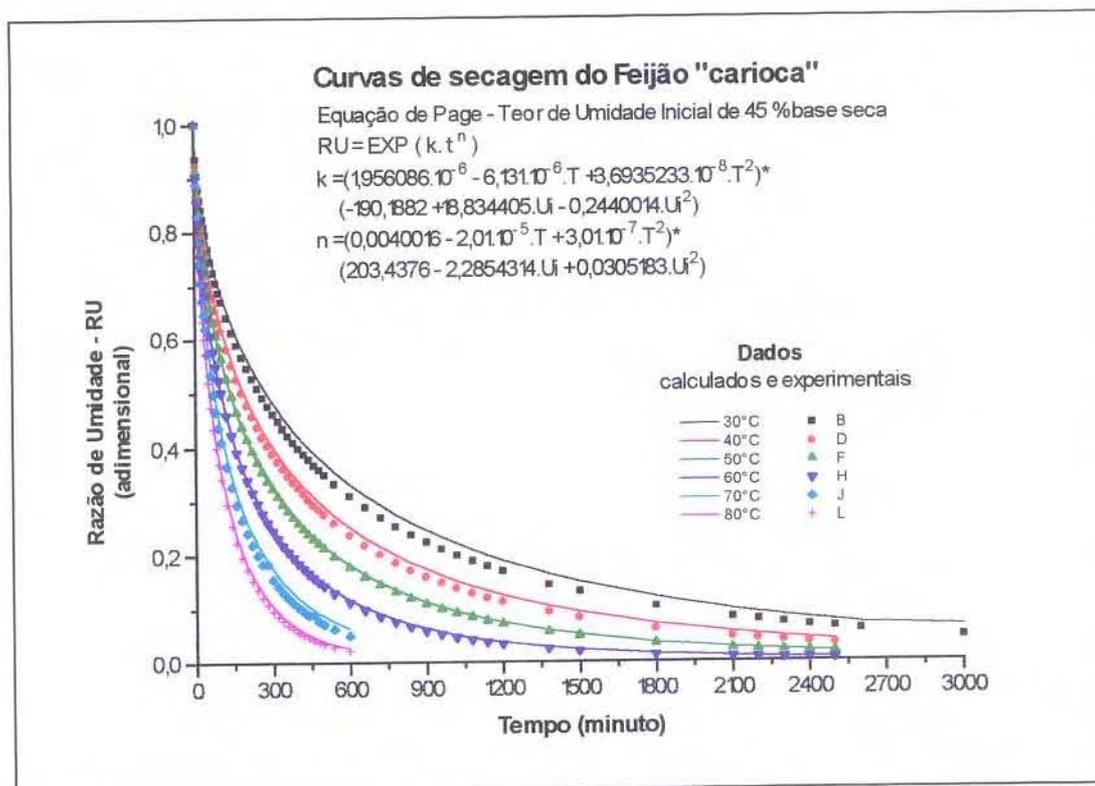


FIGURA 2.21 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de **Page**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 45% b.s.

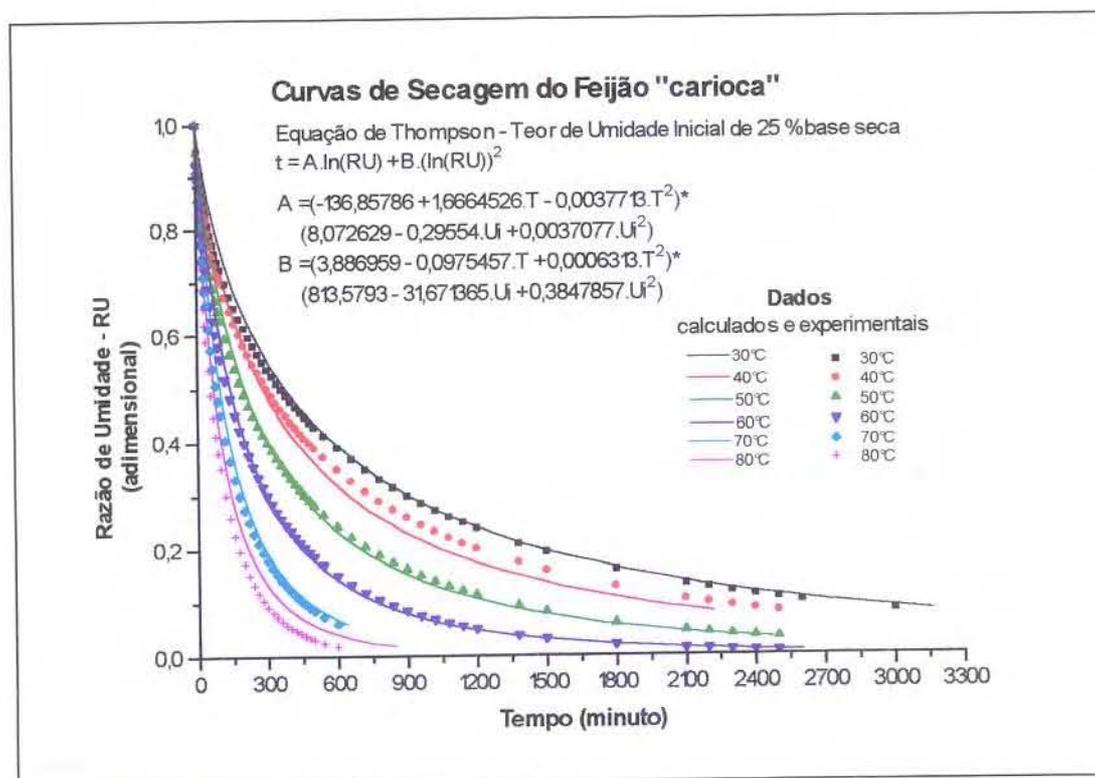


FIGURA 2.22 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de **Thompson**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 25% b.s.

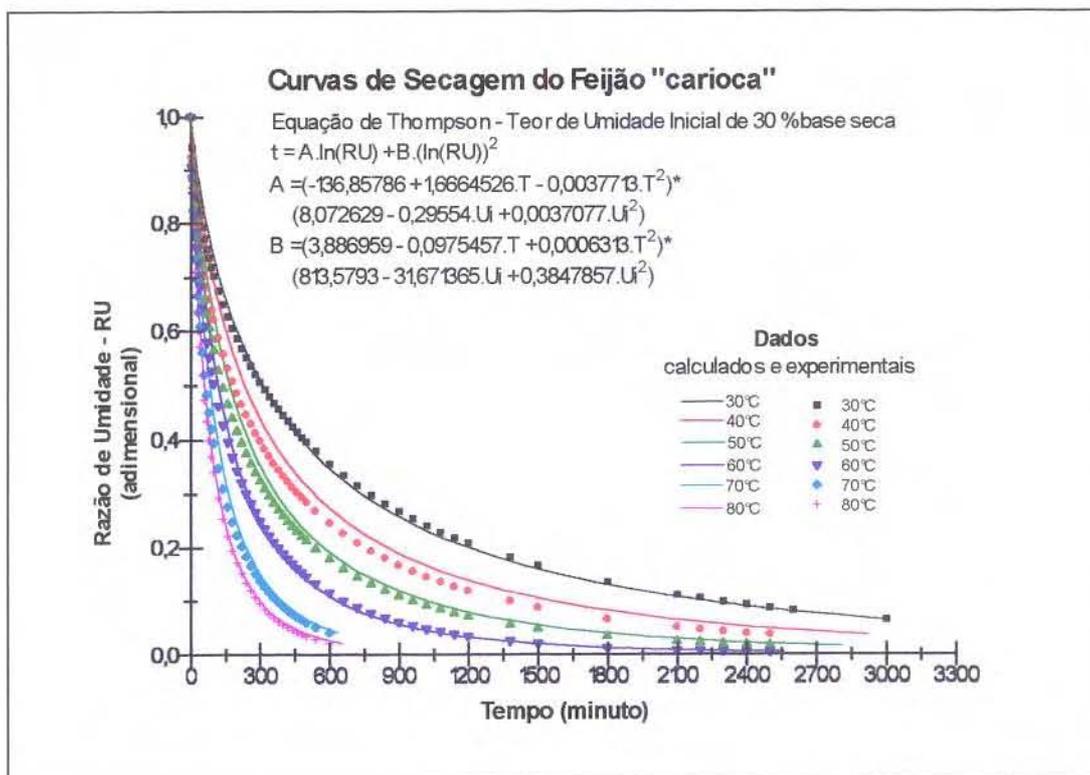


FIGURA 2.23 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de **Thompson**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 30% b.s.

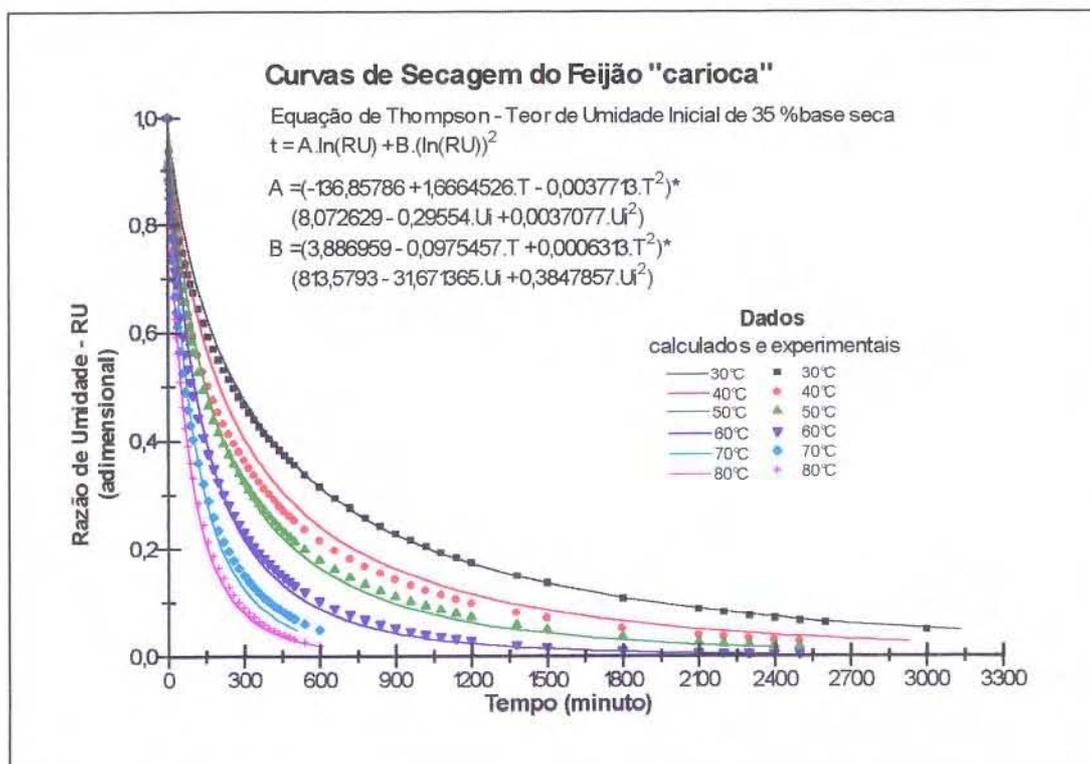


FIGURA 2.24 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de **Thompson**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 35% b.s.

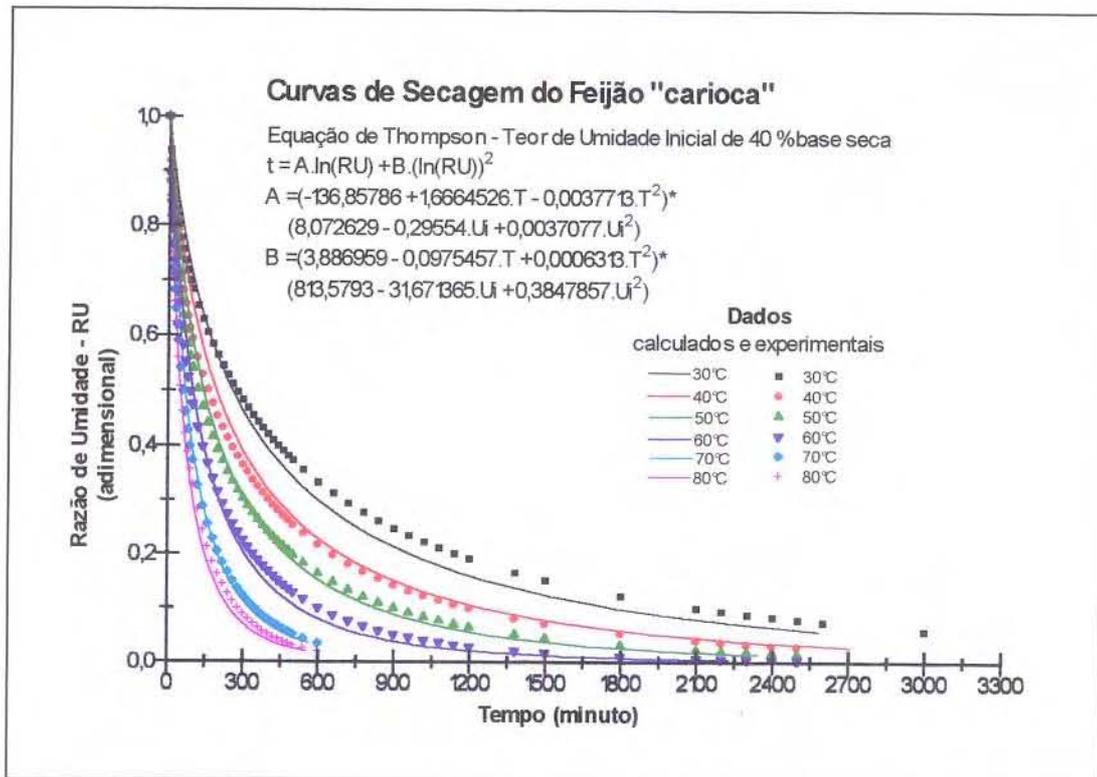


FIGURA 2.25 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de **Thompson**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 40% b.s.

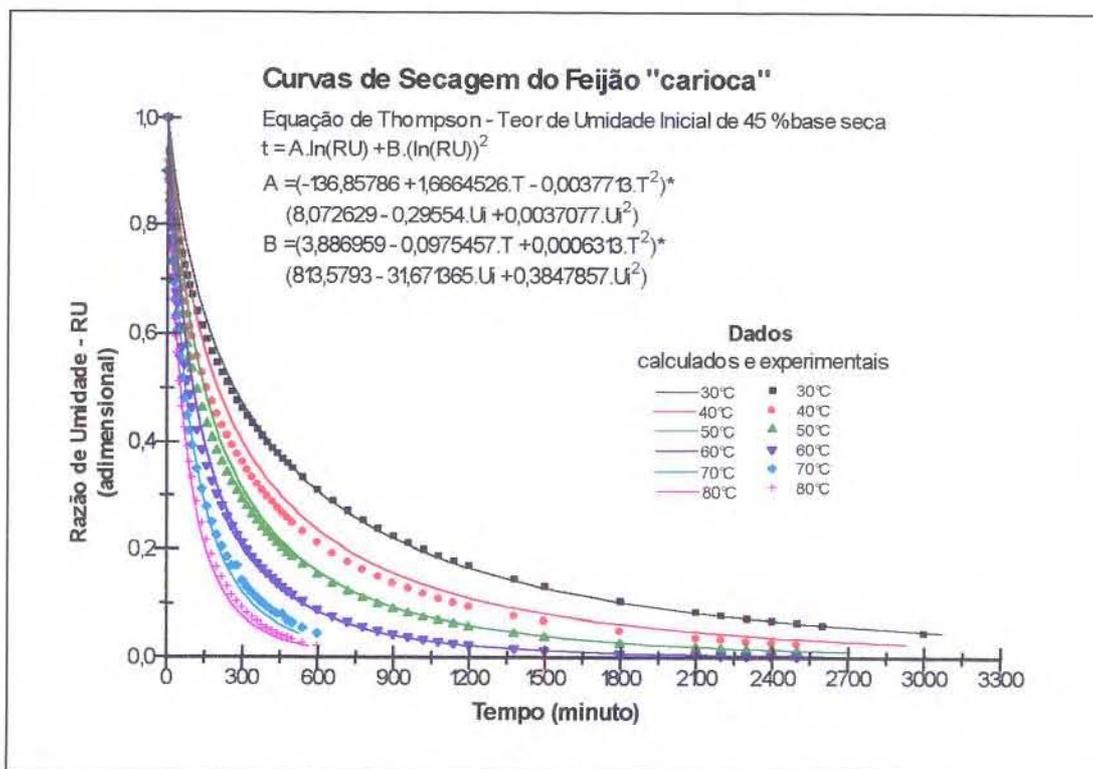


FIGURA 2.26 - Curvas dos dados experimentais das sementes de feijão “carioca” e calculadas pela equação de **Thompson**, obtidas por regressão não linear para o teor de umidade inicial de 45% b.s.

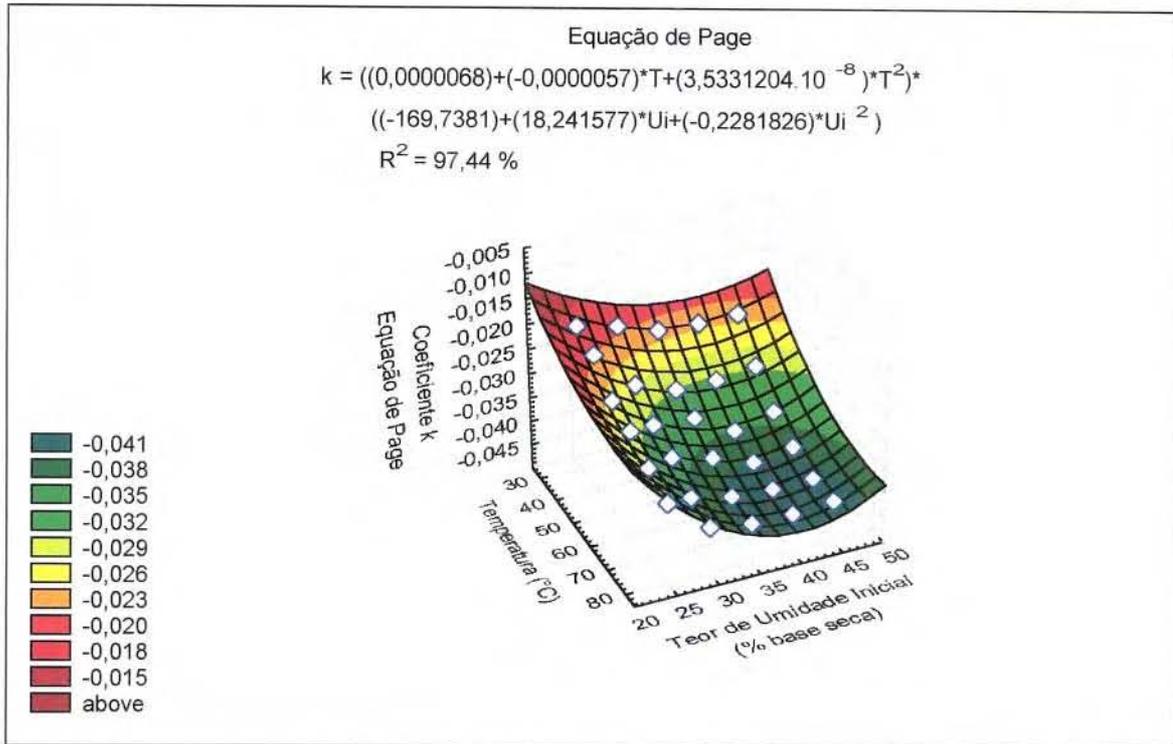


FIGURA 2.27 - Superfície de resposta do coeficiente “k” da equação de Page em função do teor de umidade inicial e da temperatura de secagem, obtidas por regressão não linear.

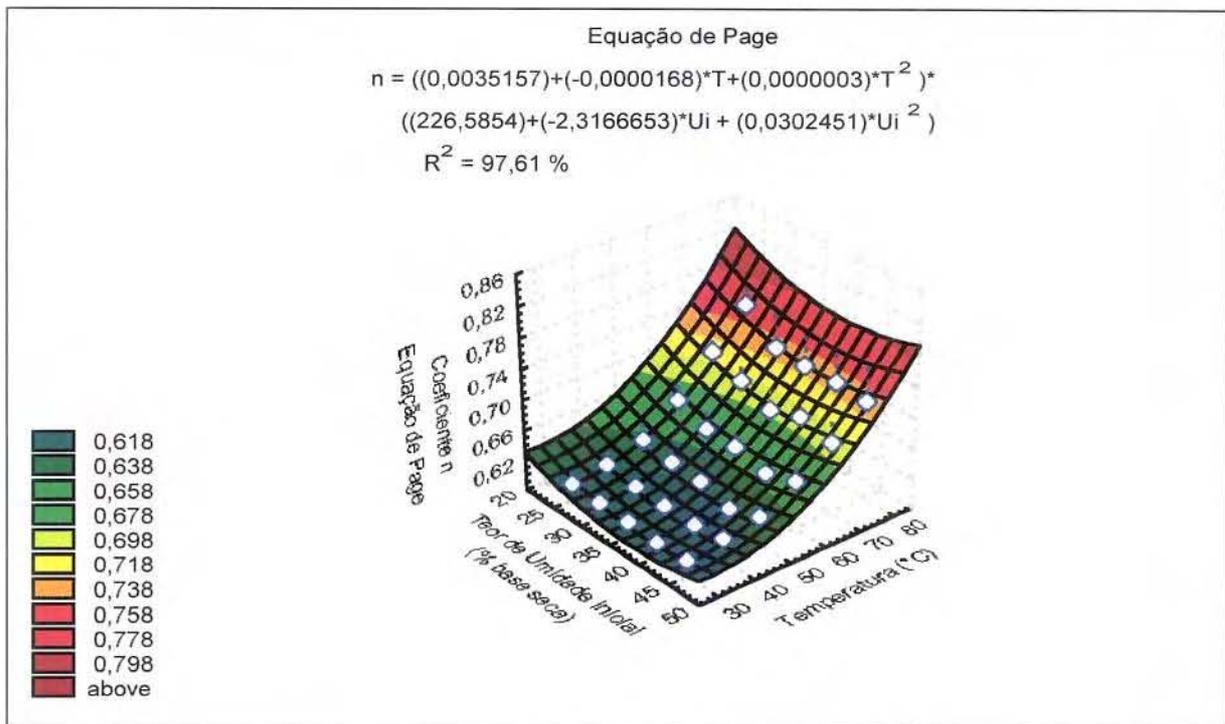


FIGURA 2.28 - Superfície de resposta do coeficiente “n” da equação de Page em função do teor de umidade inicial e da temperatura de secagem, obtidas por regressão não linear.

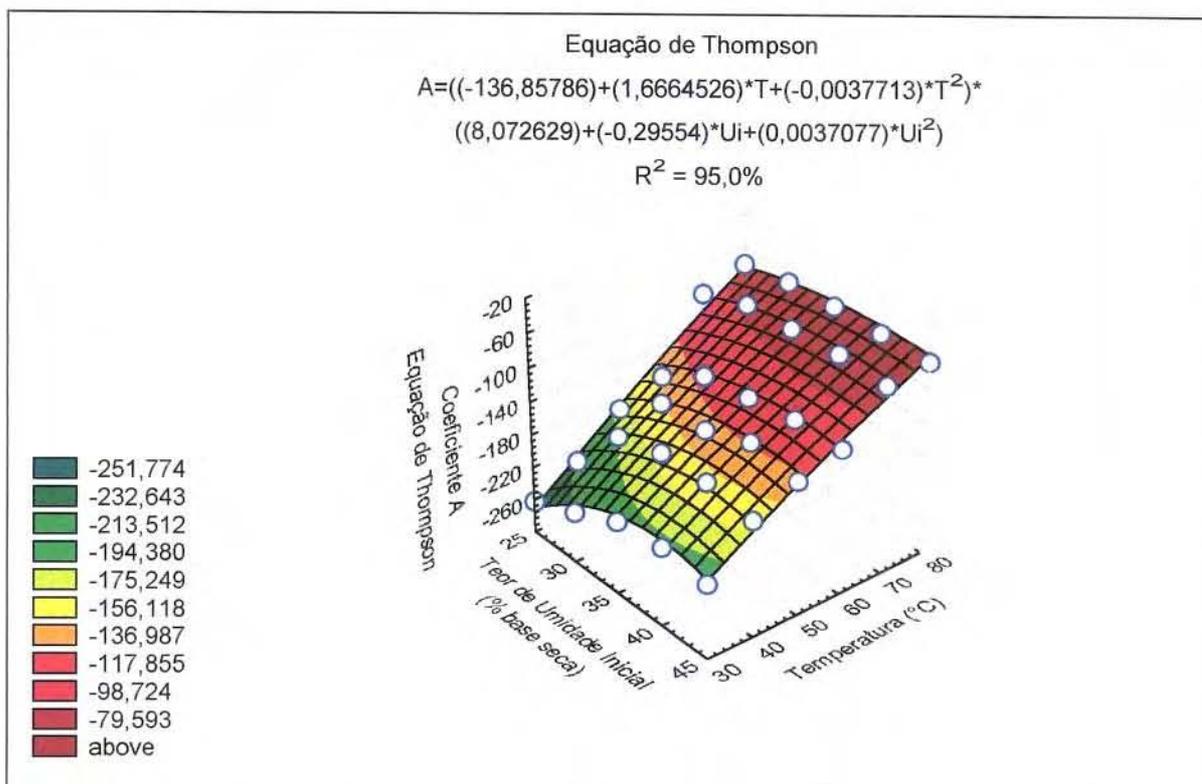


FIGURA 2.29 - Superfície de resposta do coeficiente “A” da equação de **Thompson** em função do teor de umidade inicial e da temperatura de secagem, obtidas por regressão não linear.

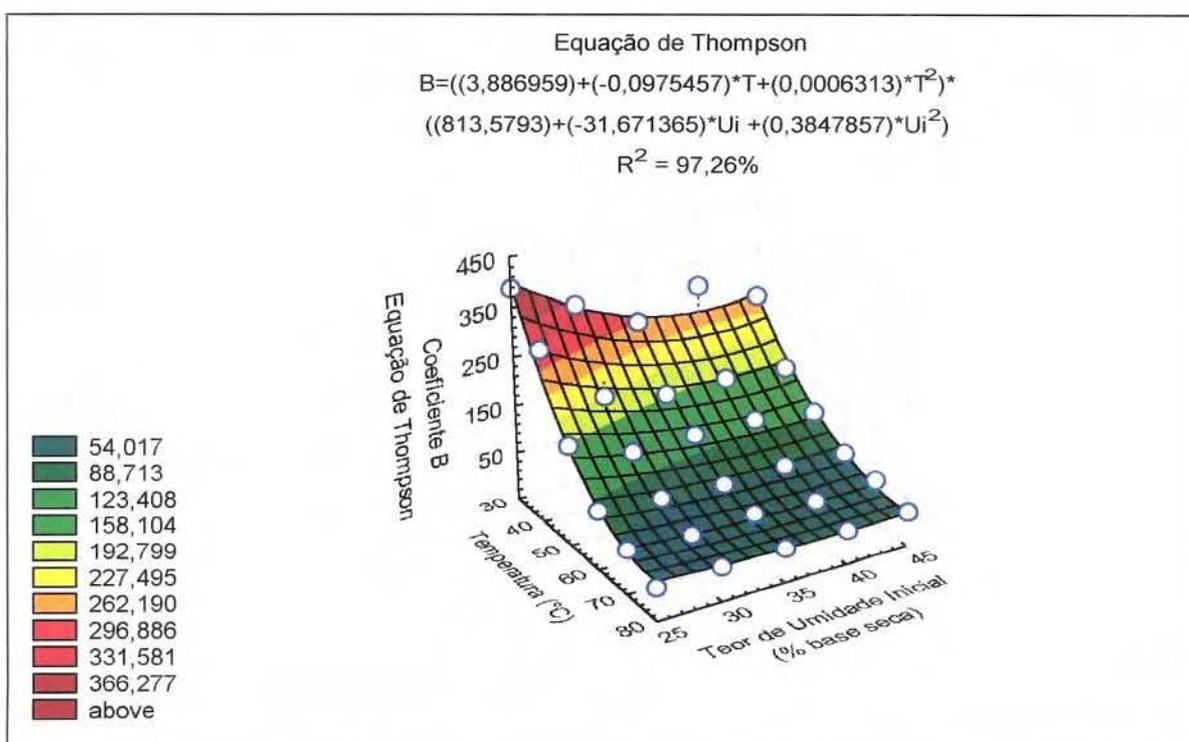


FIGURA 2.30 - Superfície de resposta do coeficiente “B” da equação de **Thompson** em função do teor de umidade inicial e da temperatura de secagem, obtidas por regressão não linear.

4.2. Coeficiente de difusão

Os valores dos coeficientes de difusão de líquido em função da temperatura e do teor de umidade inicial das sementes de feijão são mostrados na Tabela 2.6. Observa-se que existe uma tendência dos coeficientes de difusão crescerem tanto com o aumento da temperatura como com o aumento do teor de umidade inicial do produto.

A variação do coeficiente de difusão com o teor de umidade inicial também foi observada por CHU e HUSTRULID (1968) para milho e por SOARES (1986) para soja. A Figura 2.31 mostra essa variação através de uma equação correspondente a sua superfície de resposta.

Segundo CHINNAM e YOUNG (1977) e FORTES e OKOS (1980), no início da secagem, existe uma predominância da difusão de líquido em relação à difusão de vapor, devido à maior concentração de umidade e de menores gradientes de temperatura. Portanto deve-se esperar que as equações baseadas na teoria de difusão de líquido descrevam melhor o processo de secagem na fase inicial e apresentem uma discrepância mais acentuada nas etapas finais de secagem. Este fato é observado nas Figuras de 2.4 a 2.8, embora no início da secagem este fato não ocorre pois, como mencionado anteriormente, o valor inicial da razão de umidade é 0,84927 e o valor experimental é 1. Contudo, essa convergência se dá rapidamente e a partir dos 50 minutos, aproximadamente, existe uma proximidade dos dados experimentais com os dados observados.

Outra consideração a ser feita com relação à determinação do coeficiente de difusão é que segundo o estudo feito no capítulo anterior, existe uma variação no tamanho das sementes de feijão com a variação do seu teor de umidade, e a maioria dos autores assumem em suas considerações teóricas, que estas variações não ocorrem. Para minimizar esses erros assumiu-se, neste trabalho, as dimensões das sementes de feijão como as encontradas para cada teor de umidade, determinadas a partir das equações de comprimento, largura e espessura, obtidas no item 1.4. Com esses dados determinou-se o raio da esfera equivalente para cada teor de umidade inicial e a partir deste ponto o raio foi considerado como constante. Na Tabela 2.6 também são mostrados esses valores do raio da esfera equivalente.

TABELA 2.6 - Coeficientes de difusão de líquido para sementes de feijão "carioca" para as condições de secagem e teores de umidade iniciais estudados

	Coeficiente de Difusão ($\times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)				
	Teor de Umidade Inicial (% base seca)				
	25	30	35	40	45
raio da esfera equivalente(cm)	0,3801925	0,389434	0,3986755	0,407917	0,4171585
Temperatura (°C)					
30	2,2015172	2,2181083	2,7443051	2,6462497	3,0559701
40	2,5862555	3,4444832	4,1157330	4,2942550	4,5927711
50	3,3705240	4,6640970	4,8805182	5,4740750	6,0819658
60	5,0285453	6,3439280	7,1731024	7,6722022	8,5948718
70	8,4353902	10,7272849	10,5945863	12,4756107	12,1082147
80	13,0926711	13,7485834	14,9789362	15,7844344	16,1866617

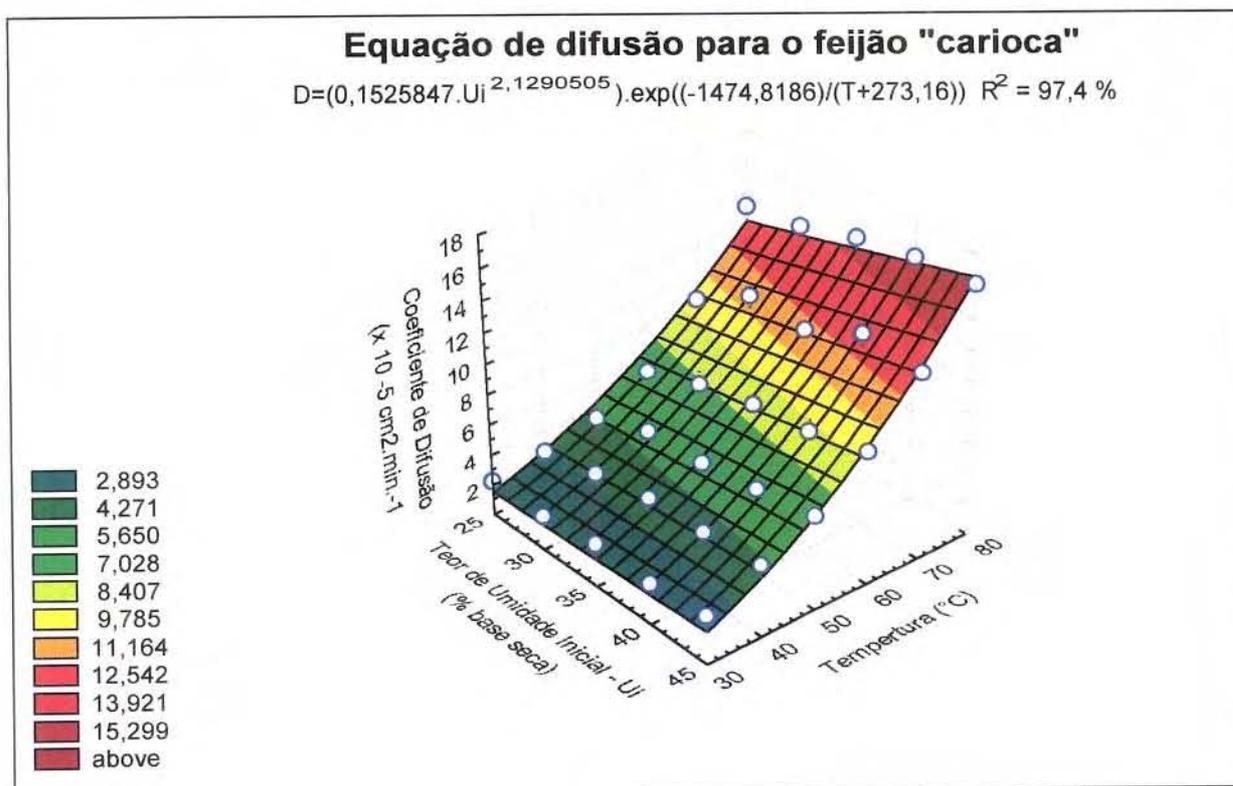


FIGURA 2.31 - Superfície de resposta do coeficiente de difusão de líquido para sementes de feijão "carioca" em função da temperatura de secagem e do teor de umidade inicial.

4.3. Efeito da umidade inicial das sementes de feijão sobre a taxa de secagem

Nas Figuras de 2.32 a 2.36 são apresentadas as curvas de secagem das sementes de feijão para as temperaturas de 30 a 80 °C, respectivamente. Nessas figuras é mostrado o efeito do teor de umidade inicial na taxa de secagem. Observa-se também nessas figuras que até à temperatura de 70 °C existe uma influência do teor da umidade inicial na taxa de secagem, embora para determinadas temperaturas, principalmente para as temperaturas intermediárias, essa diferença nem sempre se evidencia.

Contudo, constata-se uma diferença bastante visível quando se compararam as curvas de secagem do feijão com um teor de umidade inicial de 45 % b.s. com a de um teor de umidade inicial de 25 % b.s., para as temperaturas de 30 a 70 °C. Estas constatações também foram feitas por MISRA e BROOKER (1980) em seus trabalhos com milho amarelo, onde os autores ajustaram os coeficientes "k" e "n" da equação de Page não só em função do teor de umidade inicial, mas também em função da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem.

Na Figura 2.36 é possível notar que para a temperatura de 80 °C o teor de umidade inicial não influencia a taxa de secagem das sementes de feijão. Observações semelhantes foram feitas por OVERHULTS *et alii* (1973) para grãos de soja, trabalhando com temperaturas do ar de secagem de 38 a 104 °C e teor de umidade inicial de 20, 23 e 33 % b.s.. Os autores constaram que para altas temperaturas o teor de umidade inicial tem pouca influência na taxa de secagem, podendo esta influência ser desprezada.

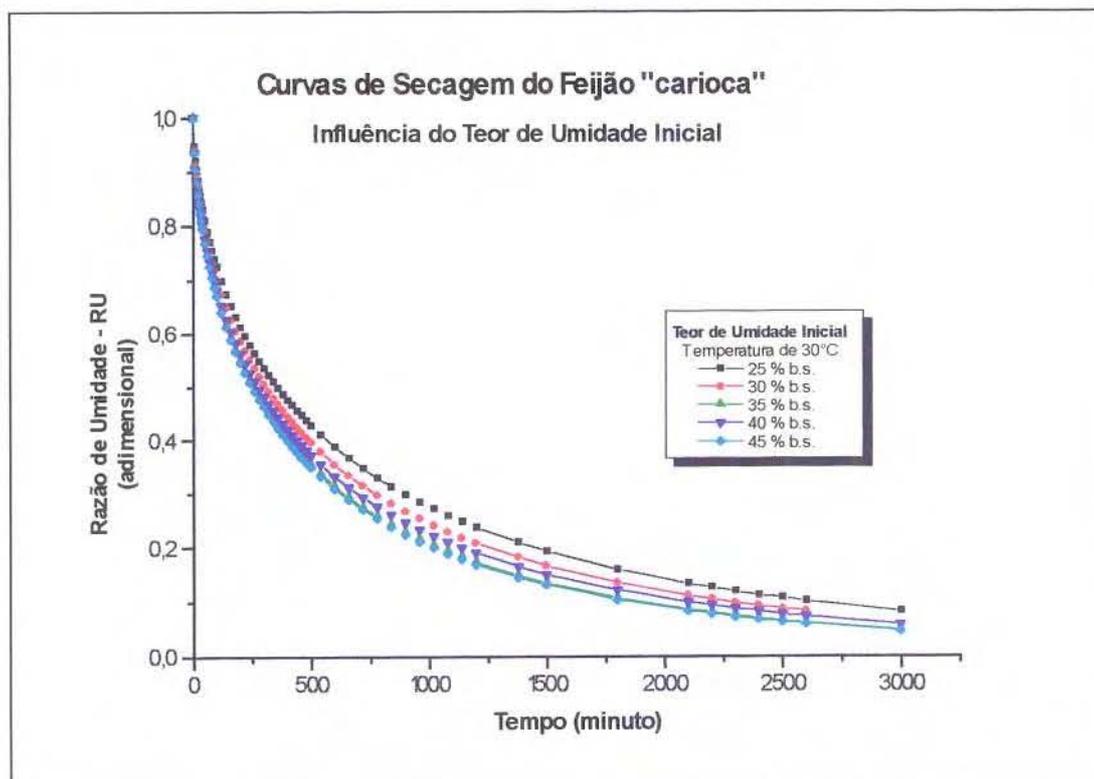


FIGURA 2.32 - Efeito do teor de umidade inicial sobre a taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para a temperatura de 30 °C.

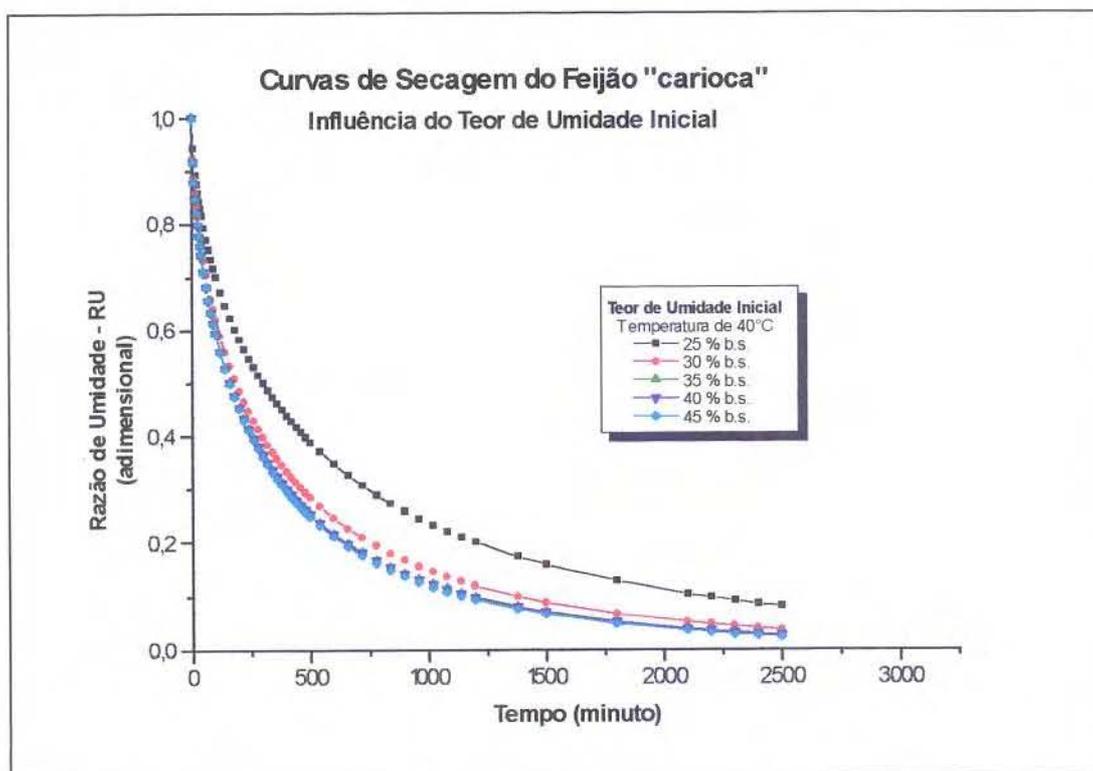


FIGURA 2.33 - Efeito do teor de umidade inicial sobre a taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para a temperatura de 40 °C.

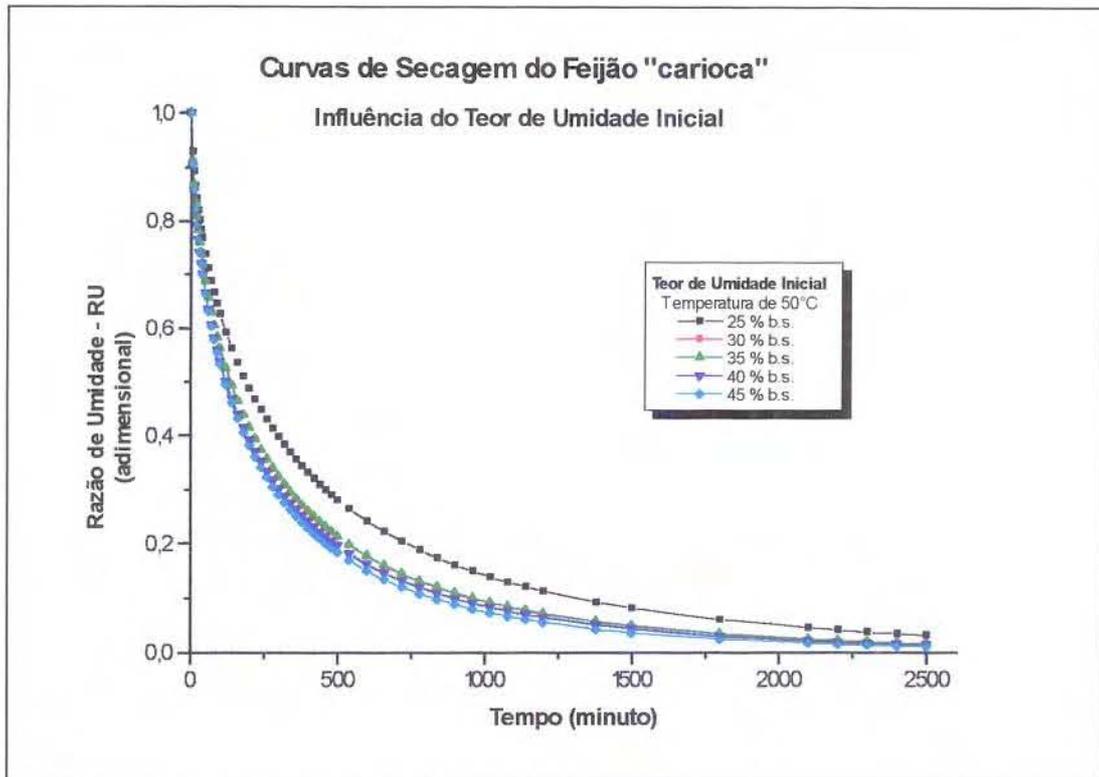


FIGURA 2.34 - Efeito do teor de umidade inicial sobre a taxa de secagem de sementes de feijão "carioca" para a temperatura de 50 °C.

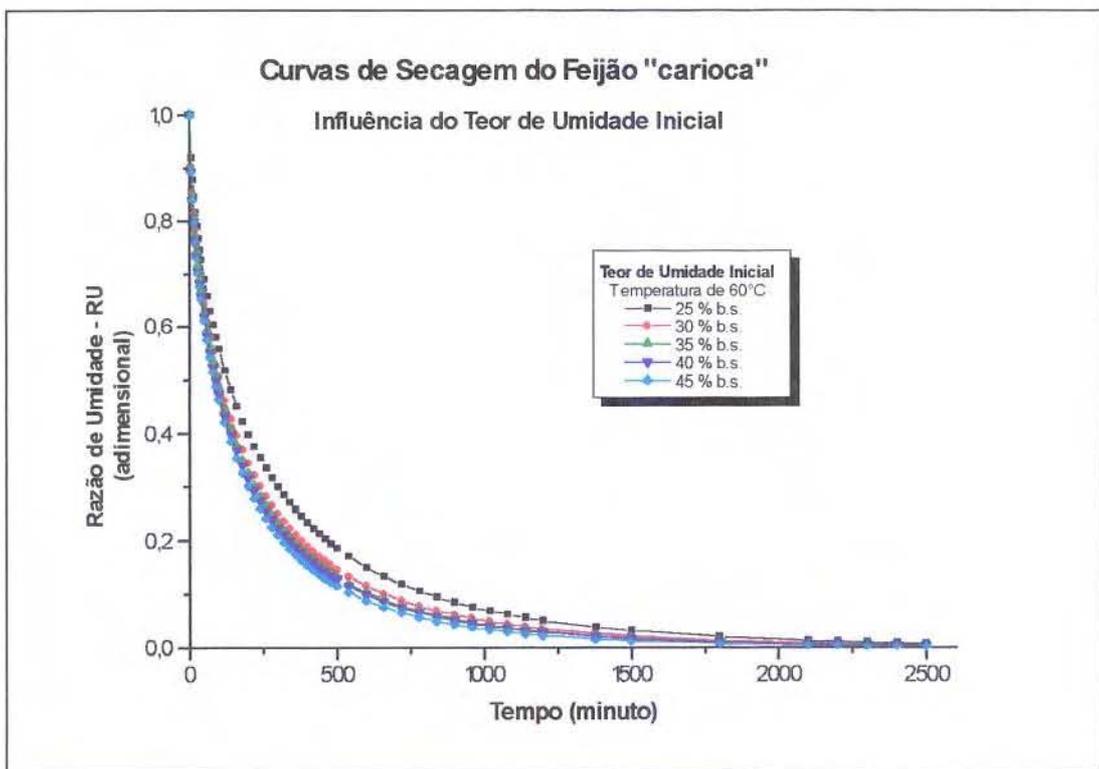


FIGURA 2.35 - Efeito do teor de umidade inicial sobre a taxa de secagem de sementes de feijão "carioca" para a temperatura de 60 °C.

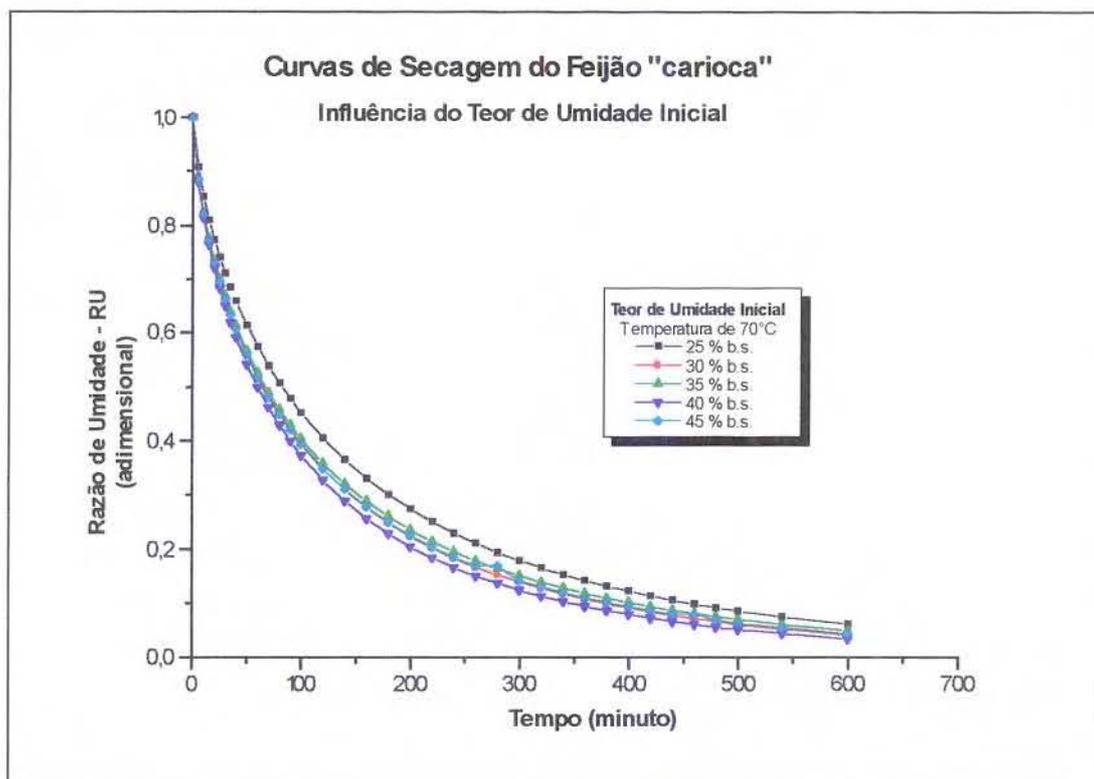


FIGURA 2.36 - Efeito do teor de umidade inicial sobre a taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para a temperatura de 70 °C.

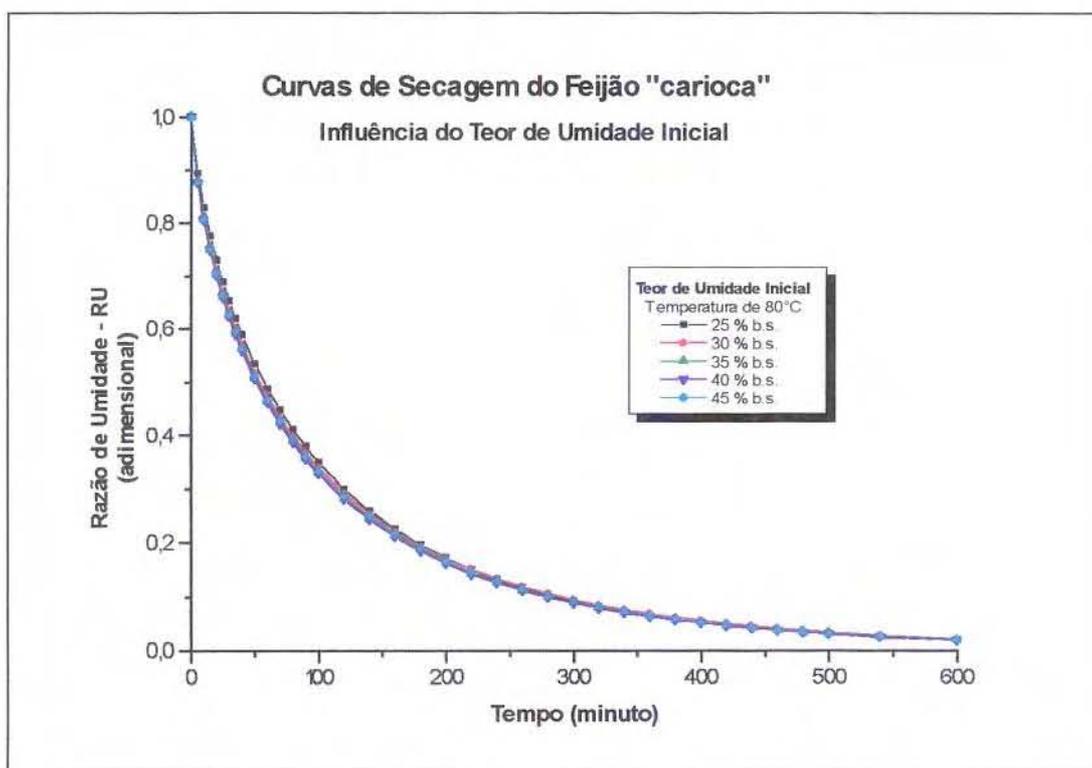


FIGURA 2.37 - Efeito do teor de umidade inicial sobre a taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para a temperatura de 80 °C.

4.4. Efeito da velocidade do ar sobre a taxa de secagem das sementes de feijão

Nos itens 4.1. e 4.2. deste trabalho fica evidenciado que a equação de Page é a equação que melhor representa os dados experimentais. Assim, com a finalidade de estudar o possível efeito da velocidade do ar na taxa de secagem das sementes de feijão, determinaram-se os valores dos coeficientes “k” e “n” da equação de Page para as temperaturas de 30 a 80 °C, teor de umidade inicial de 25, 35 e 45% b.s. e velocidade do ar de secagem de 0,2; 0,5 e 0,8 m.s⁻¹. Nas Figuras 2.38 e 2.39 estão as variações desses coeficientes para os parâmetros acima descritos. Observa-se nessas figuras que retirando-se o efeito da temperatura e do teor de umidade inicial das sementes de feijão, a influência da velocidade do ar de 0,2 a 0,8 m.s⁻¹ praticamente inexistente, pois seus valores estão bastante próximos. Os valores dos coeficientes “k” e “n” da equação de Page mostrados graficamente nas Figuras 2.38 e 2.39 encontram-se no Apêndice 2B.

Esses resultados estão de acordo com as observações feitas por HENDERSON e PABIS (1962) que não encontraram influência da velocidade do ar na faixa de 0,02 a 6,8 m.s⁻¹ para secagem de grãos de trigo, embora existam resultados discordantes na literatura com relação à influência da velocidade do ar na taxa de secagem, como é o trabalho de PATIL e WARD (1989) que constataram que a velocidade do ar influenciava na taxa de secagem de grãos de canola para a faixa estudada de 0,21 a 0,53 m.s⁻¹.

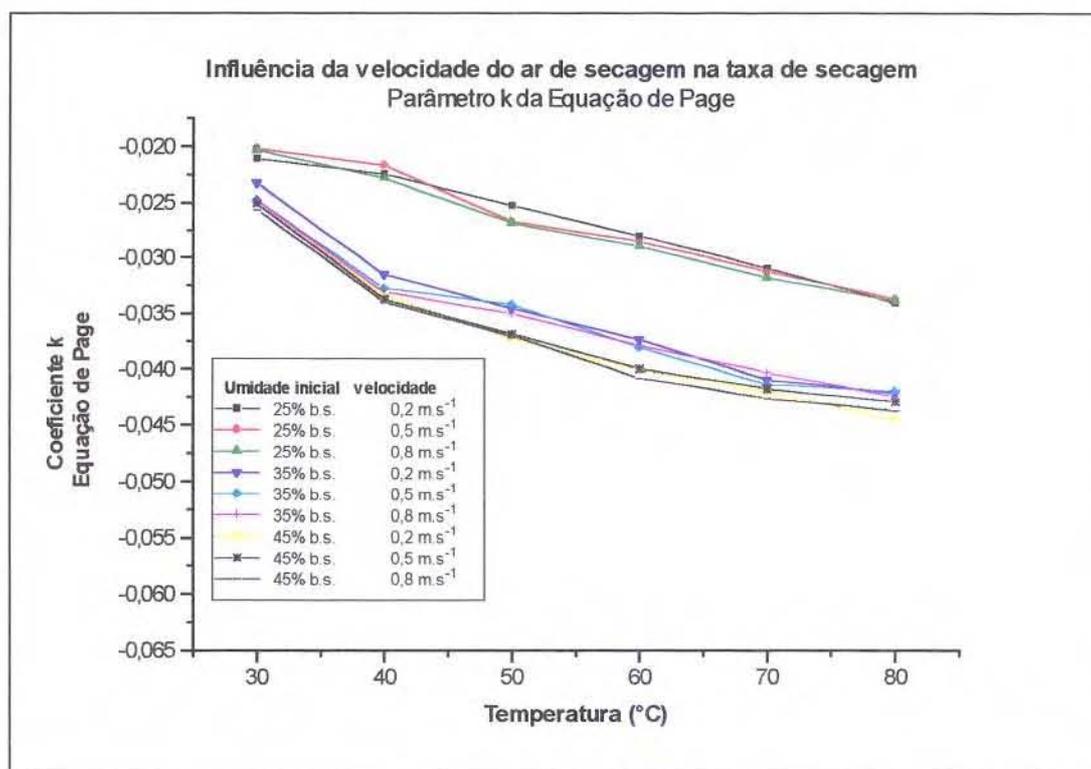


FIGURA 2.38 - Efeito da velocidade do ar na taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para as temperaturas de 30 a 80 °C e teor de umidade inicial do produto de 25, 35 e 45% b.s. - Parâmetro “k” da equação de Page.

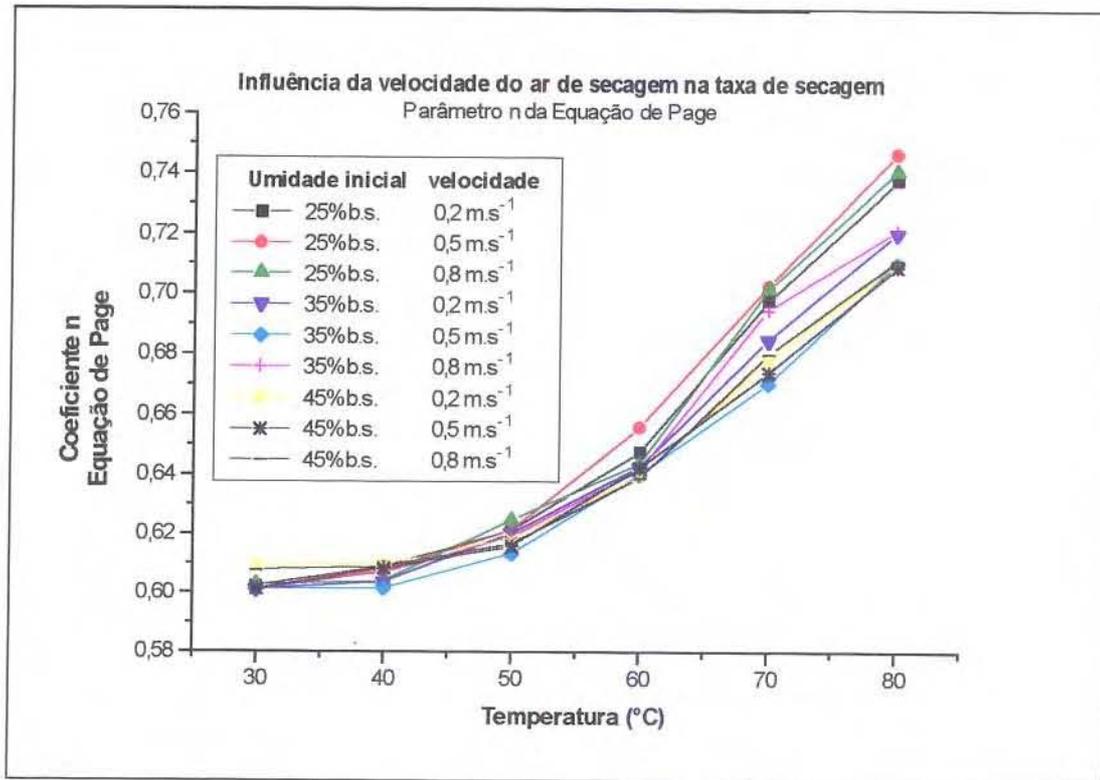


FIGURA 2.39 - Efeito da velocidade do ar na taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para as temperaturas de 30 a 80 °C e teor de umidade inicial do produto de 25, 35 e 45% b.s. - Parâmetro “n” da equação de Page.

4.5. Efeito da Umidade Relativa do ar sobre a taxa de secagem de sementes de feijão

Para verificar o efeito da umidade relativa do ar na taxa de secagem de sementes de feijão, utilizou-se a equação de Page, já que, segundo os itens anteriores, foi a equação que melhor se ajustou aos dados experimentais. Inicialmente ajustaram-se os parâmetros “k” e “n”. Como esses coeficientes não apresentaram alguma tendência e tendo-se observado que os valores “n” variavam de 0,595 e 0,61, optou-se então em fixar um valor médio para “n” que foi de **0,605977**, e realizar novas análises de regressão. Com este procedimento observou-se que era possível obter-se um comportamento do coeficiente “k” em função das variáveis estudadas.

Na Tabela 2.7 estão os valores do coeficiente “k” da equação de Page para cada umidade relativa do ar, temperatura e teor de umidade inicial estudados.

Nas Figuras de 2.40 a 2.42 encontram-se graficamente a razão de umidade em função do tempo para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C, mostrando-se a influência da umidade relativa nas taxas de secagem. Para melhor observação foram consideradas somente as umidades relativas de 20 e 50 %.

Observando-se as Figuras de 2.40 a 2.42 pode-se constatar que a influência da umidade relativa na taxa de secagem é melhor distribuída para os teores de umidade inicial de 45 %, base seca, embora se encontre a maior variação da taxa de secagem com a umidade relativa à temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 25 % b.s.

Observando cuidadosamente as curvas nessas figuras, é possível notar que, se for considerado alguns parâmetros aqui estudados, constata-se que não existe uma influência nítida da umidade relativa na taxa de secagem, como é o caso da secagem à temperatura de 30 °C e teor de umidade inicial de 25 e 35 % b.s.. Contudo, à temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 25 % b.s. a influência da umidade relativa na taxa de secagem é melhor percebida.

Devido a esta dificuldade de se observar com nitidez a influência da umidade relativa na taxa de secagem em todos os experimentos conduzidos, onde diversos parâmetros são alterados, alguns autores ora relatam essa influência e outros, por vezes, consideram que ela pode ser negligenciada (HUSTRULID e FLIKKE, 1959; HENDERSON e PABIS, 1962; SINÍCIO, 1983; SOARES, 1986; CHRIST 1996).

Na Figura 2.43 é mostrada a equação genérica do coeficiente “k” da equação de Page, expressa em função do teor de umidade inicial, temperatura e umidade relativa, sendo que o gráfico representa os dados observados versus os dados calculados por essa equação.

As Figuras 2.44 e 2.45 dão uma visão espacial da superfície de resposta do coeficiente “k” da equação de Page. Estas duas figuras mostram a superfície de resposta em ângulos rotacionais diferentes de modo a dar percepção que existem 3 superfícies de respostas em planos diferentes, correspondentes aos teores de umidade inicial de 25, 35 e 45 % base seca.

Substituída a equação genérica do coeficiente “k” na equação de Page obteve-se a equação:

$$RU=[(-0,20348.U_i^{0,366578}.T^{0,7911066})*(0,0025138-1,9568.10^{-5}.UR+1,836368.10^{-7}.(UR)^2)].t^{0,605977}$$

TABELA 2.7 - Coeficiente “k” da equação de Page em função da umidade relativa do ar, temperatura e teor de umidade inicial.

Coeficiente “k” da Equação de Page				
RU = exp (k . t ^{0,605977})				
Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Umidade inicial (% base seca)		
		25	35	45
30,0	50,0	- 0,021496	- 0,02189130	- 0,024666
30,0	40,0	- 0,020346	- 0,02210100	- 0,025365
30,0	30,0	- 0,020564	- 0,02138260	- 0,025989
30,0	20,0	- 0,020804	- 0,02257150	- 0,027003
40,0	50,0	- 0,021891	- 0,02635672	- 0,030746
40,0	40,0	- 0,023379	- 0,02737421	- 0,031372
40,0	30,0	- 0,025567	- 0,02943057	- 0,032134
40,0	20,0	- 0,028608	- 0,03167600	- 0,033209
50,0	50,0	- 0,028714	- 0,03400840	- 0,036646
50,0	40,0	- 0,029011	- 0,03422378	- 0,036863
50,0	30,0	- 0,030407	- 0,03557830	- 0,037214
50,0	20,0	- 0,033868	- 0,03612540	- 0,037763

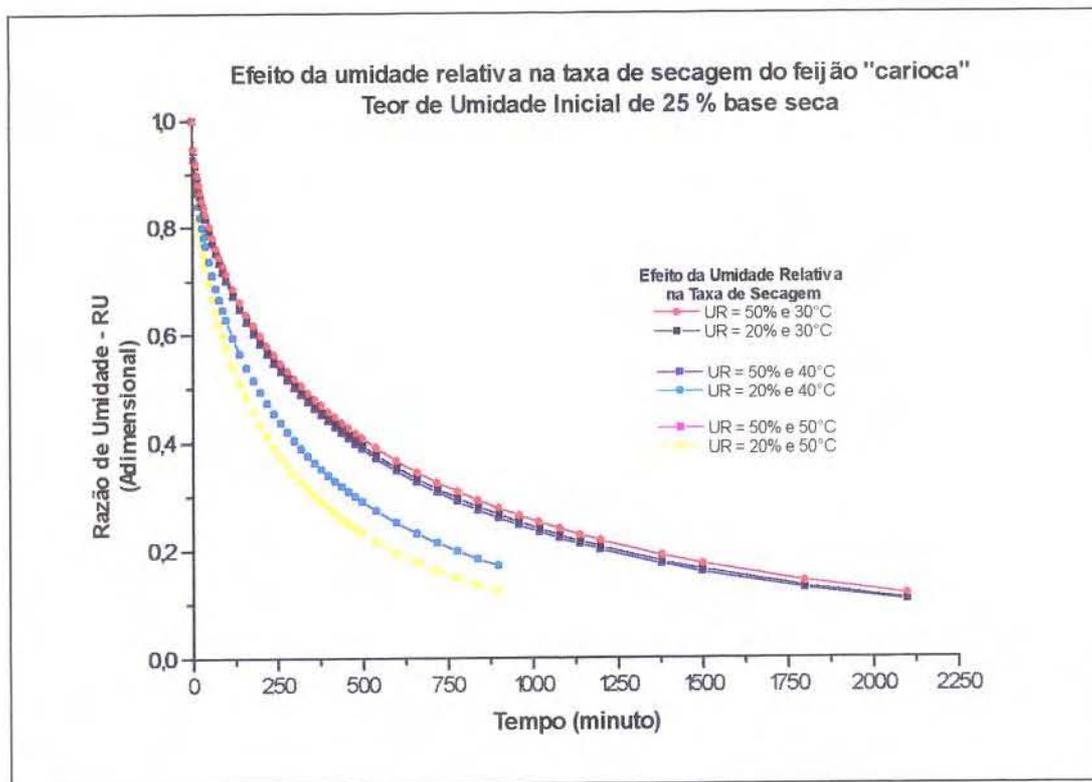


FIGURA 2.40 - Efeito da umidade relativa do ar de 20 a 50% na taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C e teor de umidade inicial do produto de 25 % b.s.

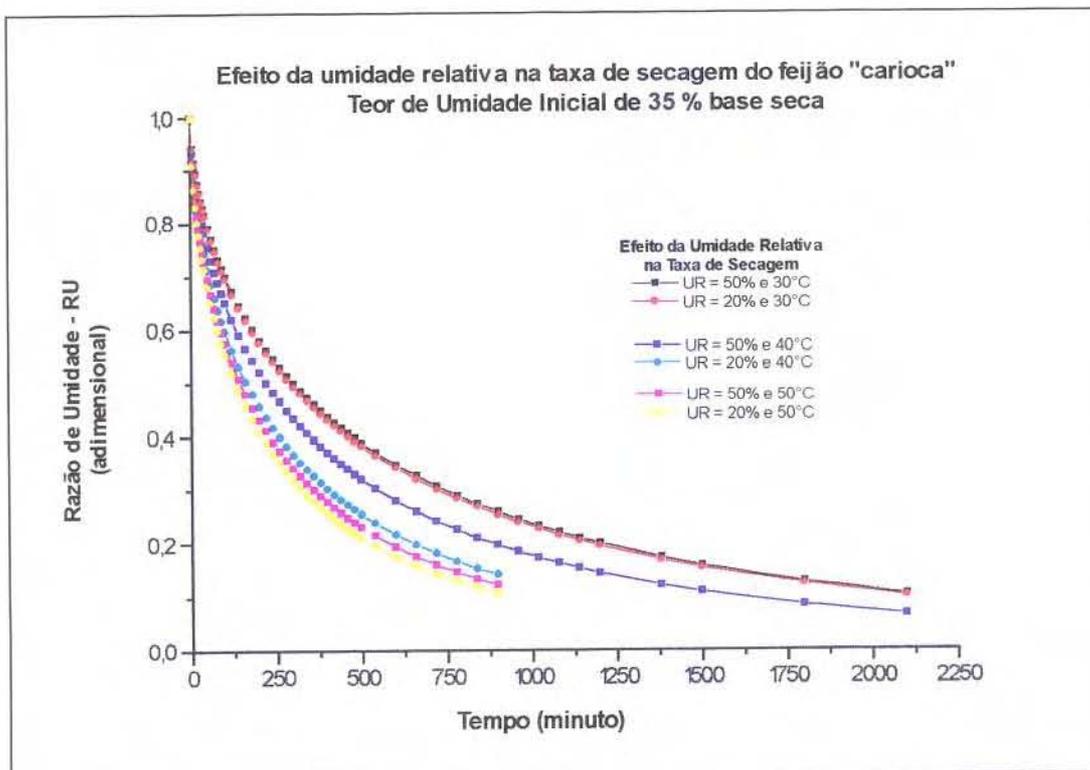


FIGURA 2.41 - Efeito da umidade relativa do ar de 20 a 50% na taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C e teor de umidade inicial do produto de 35 % b.s.

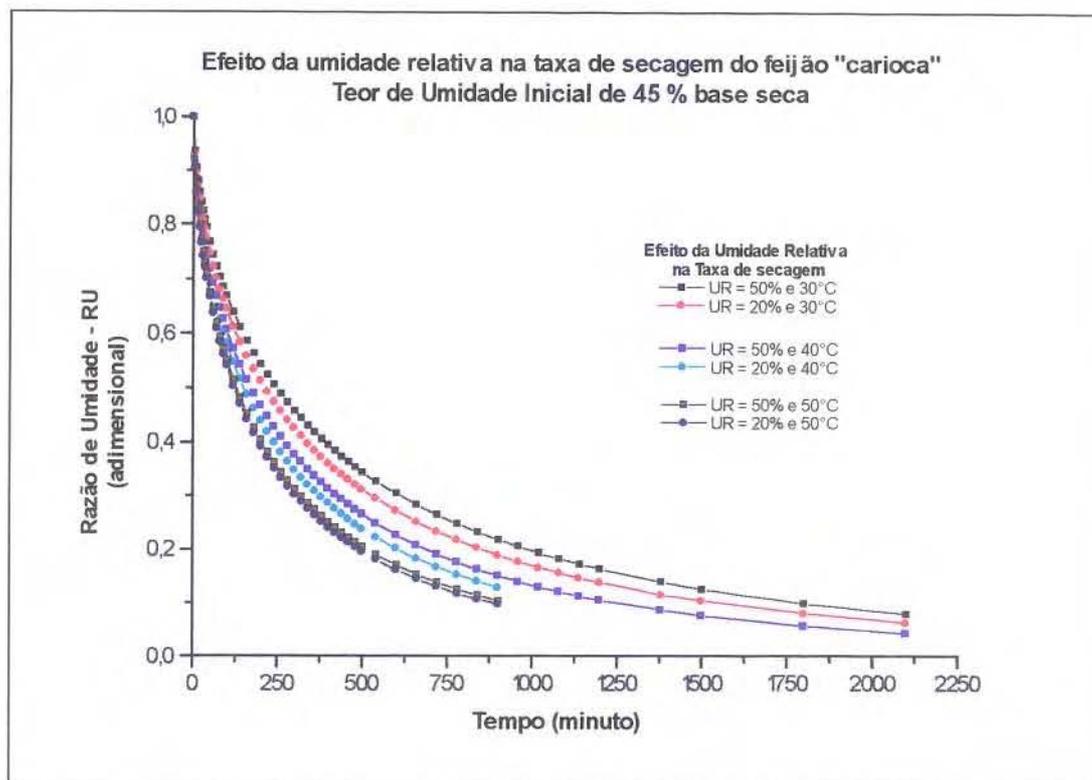


FIGURA 2.42 - Efeito da umidade relativa do ar de 20 a 50 % na taxa de secagem de sementes de feijão “carioca” para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C e teor de umidade inicial do produto de 45 % b.s.

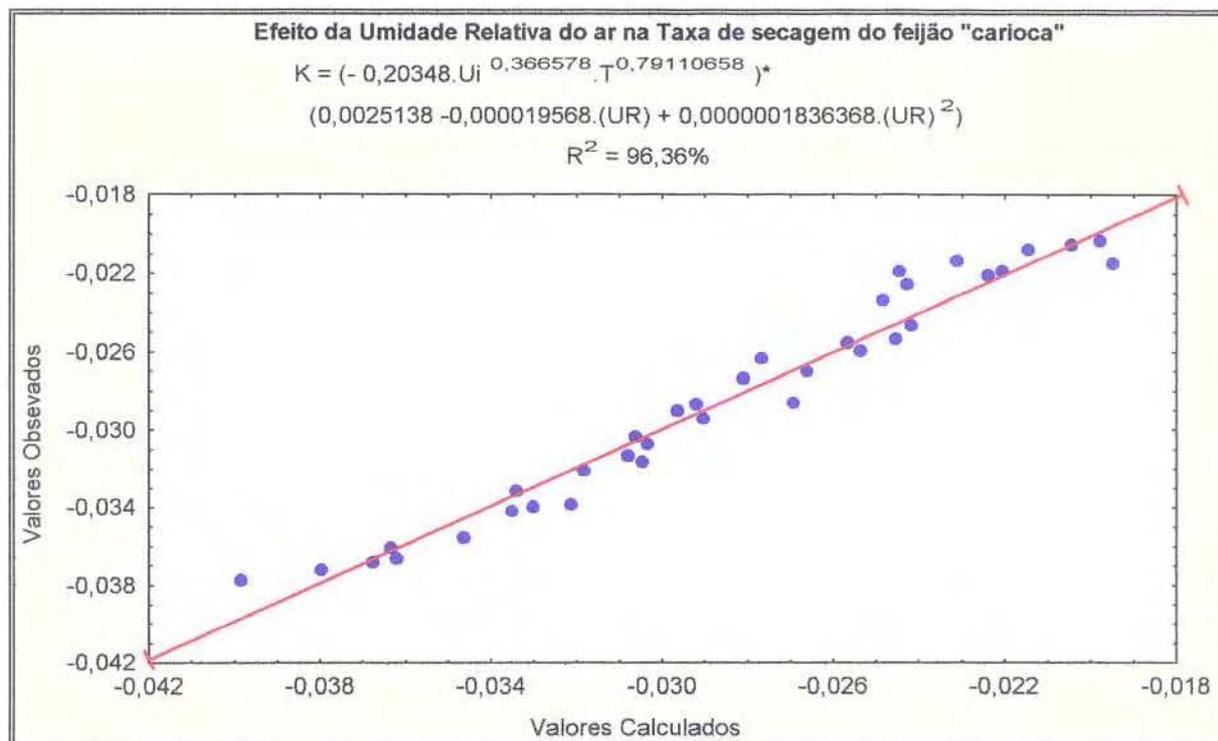


FIGURA 2.43 - Coeficiente “k” da equação de Page em função da umidade relativa do ar, temperatura e teor de umidade inicial das sementes de feijão “carioca”.

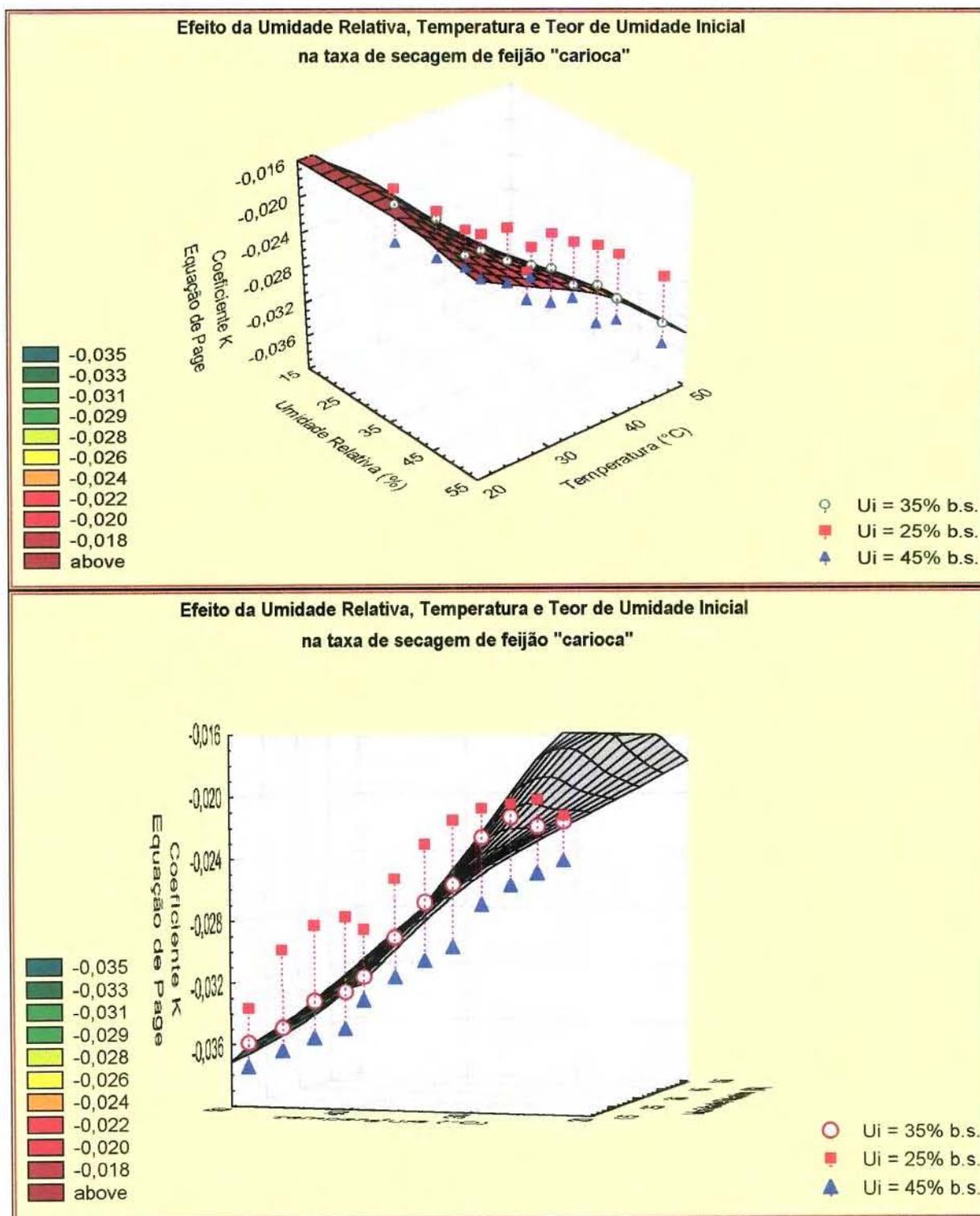


FIGURA 2.44 - Visão espacial do coeficiente "K" da Equação de Page em função da umidade relativa do ar de 20 a 50% , temperaturas de 30, 40 e 50 °C e teor de umidade inicial do produto de 25, 35 e 45 % b.s.

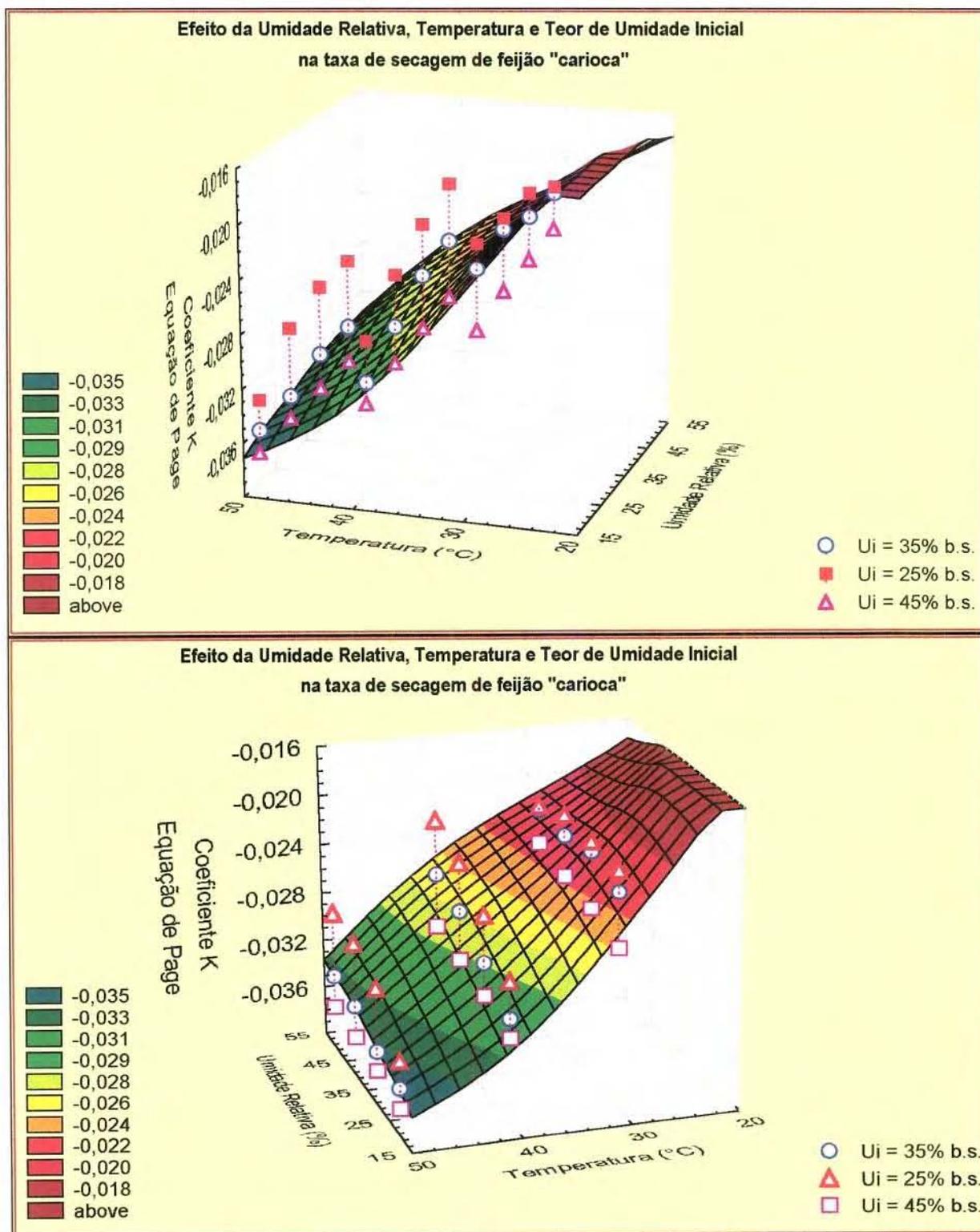


FIGURA 2.45 - Visão espacial da Superfície de resposta correspondente ao coeficiente "K" da Equação de Page em função da umidade relativa do ar de 20 a 50% , temperaturas de 30, 40 e 50 °C e teor de umidade inicial do produto de 25, 35 e 45 % b.s.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos neste etapa sobre a secagem de feijão “carioca” em camada delgada conclui-se que:

1. Embora o coeficiente de difusão de líquido permita predizer o que ocorre com as sementes no seu interior, esta só consegue expressar satisfatoriamente os dados experimentais em apenas trechos das curvas de secagem.
2. A equação que melhor se ajustou aos dados experimentais do coeficiente de difusão para o feijão “carioca” em função da temperatura e teor de umidade inicial é:

$$D = (653170,14.U_i^{0,5388462}) * \exp(-3964,6355/(T+273,16)) \quad R^2 = 98,58\%$$

3. A equação proposta por Page é a que melhor representa os dados experimentais, quando comparada com as equações de difusão de líquido simplificada, utilizando-se um e dois termos da série, e a proposta por Thompson. A equação de Page em função da temperatura de 30 a 80 °C e do teor de umidade inicial das sementes de feijão de 25 a 45 %, base seca é:

$$RU = \exp(-k.t^n)$$

$$k = (6,8 \cdot 10^{-6} - 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot T + 3,53312 \cdot 10^{-8} \cdot T^2) \cdot (-169,7381 + 18,2416 \cdot U_i - 0,2281 \cdot U_i^2)$$

$$n = (3,5157 \cdot 10^{-3} - 1,68 \cdot 10^{-5} \cdot T + 3,0 \cdot 10^{-7} \cdot T^2) \cdot (226,5854 - 2,3166 \cdot U_i + 0,03024 \cdot U_i^2)$$

4. A taxa de secagem é influenciada pelo teor de umidade inicial e temperatura embora constate-se que para a temperatura de 80 °C esta dependência não ocorreu.
5. Não foi verificado efeito da velocidade do ar de 0,2 a 0,8 m.s⁻¹ na taxa de secagem das sementes de feijão “carioca”.
6. Na taxa secagem determinada pela equação de Page, apenas o coeficiente **k** expressa sua dependência em função da umidade relativa do ar, sendo a equação para o intervalo de temperatura de 30 a 50 °C e umidade relativa de 20 a 50% dada por:

$$RU = [(-0,20348 \cdot U_i^{0,366578} \cdot T^{-0,7911066}) * (0,0025138 - 1,9568 \cdot 10^{-5} \cdot UR + 1,836368 \cdot 10^{-7} \cdot (UR)^2)] \cdot t^{0,605977}$$

Capítulo 3

Efeito da secagem a altas temperaturas por curtos períodos de tempo na qualidade fisiológica das sementes

1. INTRODUÇÃO

A produção de sementes requer cuidados diferentes dos adotados na produção de grãos, por esse motivo recebe tratamento diferenciado desde a sua semeadura. Durante o período que vai do plantio à colheita, o campo de produção de sementes recebe inspeções constantes quanto ao desenvolvimento da cultura, incidência de pragas e tratos culturais.

Qualquer falta de atenção na produção de sementes causa a condenação do campo sendo sua produção não totalmente perdida, mas destinada à produção de grãos. Contudo, os prejuízos são elevados e o produtor perde grande parte de sua rentabilidade. Assim, nenhuma etapa no sistema de produção de sementes deve ser desconsiderada ou negligenciada.

Até à colheita, o produtor de sementes aceita bem as tecnologias de produção. No entanto, a partir da etapa subsequente, que é a de pós-colheita, os cuidados com o sistema de produção são insipientes, o que tem levado o produtor a perdas de qualidade dificilmente de serem aceitas atualmente. Não é fácil entrar nas razões pelas quais isto ocorre, sem mencionar que muitos desses fatos tem origem cultural e de despreparo dos produtores, já que esta etapa é mais trabalhosa e exige do produtor conhecimentos específicos, que não estão afetos ao campo.

Numa agricultura como a Brasileira, que tenta se modernizar e atingir padrões internacionais, não é mais possível conviver com tanto esforço de produção e numa etapa subsequente ver parte deste esforço ser dizimado por falta de conhecimento do processo de produção como um todo.

A secagem de sementes, na realidade, entra no sistema de pós-colheita devido a estas atingirem seu ponto de maturação fisiológica quando estão com seu máximo de peso seco e, neste momento, segundo POPINIGIS (1977) e TOLEDO e MARCOS FILHO (1977), as sementes estão com um teor de umidade em torno de 35 a 40%, base úmida, conseqüentemente um teor de umidade impróprio para o seu beneficiamento e armazenagem.

A secagem mecânica de sementes ainda é um "tabu" entre os produtores, onde se prefere secar sementes na própria planta ou em terreiros expostas ao sol. Este tipo de secagem não condiz com a eficiência a ser empregada na agricultura pois, neste processo, muitos são os fatores que corroboram para uma perda significativa da qualidade das sementes.

Se, por um lado, as sementes devem ser colhidas com teores de umidade entre 35 e 40 %, base úmida, por outro lado estes valores, muitas vezes, não condizem com a rigidez mecânica empregada pelas máquinas colheitadeiras, que tem, no seu processo de colheita, também a desgrana do material. O ideal, neste caso, seria colher o material e só fazer a sua debulha com um teor de umidade ideal para este processo (ARAÚJO, 1983). Neste período seria feita uma pré-secagem do material sob condições controladas.

O que ocorre no campo, do período ideal em que as sementes devem ser colhidas até a sua efetiva colheita, é uma pré-secagem. No entanto, o material fica sujeito às condições pouco sanitárias do campo podendo, neste tempo, adquirir pragas que diminuem a sua qualidade fisiológica. As sementes neste período também podem sofrer um reumedecimento, devido às elevadas umidades relativas que ocorrem no período noturno, ou devido ao orvalho da manhã, além de estarem sujeitas ao reumedecimento pela chuva.

Com vista à eficiência do sistema produtivo de sementes, não resta outra alternativa ao produtor a não ser a secagem mecânica, depois da colheita. Esta etapa deve ser feita com rapidez e segurança, pois quando o teor de umidade está em torno de 35 % b.u. as sementes podem perder sua qualidade fisiológica em curtos períodos de tempo. O teor de umidade ideal para que as sementes de feijão sejam armazenadas sob condições climáticas controladas está em torno de 12 % b.u. e, portanto, depois da secagem, este deve ser o seu teor de umidade final.

A secagem de sementes é um processo que deve ser realizado com cautela, pois os parâmetros que influenciam são temperatura, umidade relativa, velocidade do ar, teor de umidade inicial, variedade e histórico do produto. Esses parâmetros não são independentes o que implica dizer que estes influem na secagem de sementes como um conjunto de fatores, e não isoladamente.

Mesmo na secagem mecânica, se por um lado a secagem a baixas temperaturas é demorada e pode acarretar perdas à qualidade fisiológica do produto, por outro lado o emprego da elevação de temperatura para acelerar o processo de secagem é desaconselhável, uma vez que este é o principal fator que provoca perda da qualidade fisiológica, quando empregado no valor acima de 45 °C. Portanto, o conceito de temperatura elevada de secagem, para sementes, deve ser acima de 45 °C.

É universalmente aceito que a temperatura de secagem de sementes não deve ser superior a 45 °C. Essa afirmação por si só não é completa, uma vez que o tempo de exposição do produto ao ar de secagem é fator que deve ser considerado.

Na literatura são mencionados alguns trabalhos realizados com diversos produtos onde são identificadas as perdas da qualidade fisiológica das sementes em função da temperatura elevada, umidade relativa baixa, secagem com teor de umidade elevado, ou ainda uma associação desses fatores. Contudo, não se encontrou na literatura consultada, alguma investigação estudando até que teor de umidade uma semente específica pode ser seca a determinada temperatura elevada, sem que sua qualidade fisiológica seja alterada.

Portanto, com a finalidade de dar uma contribuição para o aperfeiçoamento da secagem de sementes e com vistas a inovações tecnológicas os objetivos deste capítulo foram:

- Determinar a perda da qualidade fisiológica das sementes de feijão “carioca” quando secas em camada fina às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C dos teor de umidade inicial de 45% base úmida até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15 % base seca e secagem complementar a temperatura de 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % base seca.
- Determinar a perda da qualidade fisiológica das sementes de feijão “carioca” quando secas em camada fina às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C do teor de umidade inicial de 35% base úmida até os teores de umidade de 30, 25, 20 e 15 % base seca e secagem complementar a temperatura de 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % base seca.
- Determinar a perda da qualidade fisiológica das sementes de feijão “carioca” quando secas em camada fina às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C do teor de umidade inicial de 25% base úmida até os teores de umidade de 20 e 15 % base seca e secagem complementar a temperatura de 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % base seca.

- Estabelecer equações que represente os danos fisiológicos (germinação e vigor) das sementes quando submetidas às condições de secagem mencionadas no itens anteriores.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância da secagem

Sob o aspecto da produção de sementes, nos processos de pós-colheita, o teor de umidade é o fator decisivo entre a manutenção de sua qualidade e a sua perecibilidade.

HARRINGTON (1972) relata que o armazenamento das sementes não começa depois que se colocam estas sementes no armazém mas, ao contrário do que comumente se acredita, o início da armazenagem se dá no momento em que as sementes atingem a maturidade fisiológica.

Segundo CARVALHO e NAKAGAWA (1983), o estudo da maturação fisiológica das sementes é feito com o objetivo de se determinar o ponto ideal de colheita, visando a produção e a qualidade das sementes. No entanto, os autores relatam também que se a colheita for feita exatamente na maturidade fisiológica, esta colheita teria sérios problemas pois, naquele ponto, a planta se encontra com uma quantidade de folhas e ramos verdes com alta umidade que tenderia a obstruir os órgãos ativos da colheitadeira. Outro problema seria o teor de umidade das sementes (30-50%, base úmida) que acarretaria injúria mecânica às sementes, sendo esta injúria mais perigosa do que aquelas por quebraimento, por não ser visível e nem modificar sensivelmente as características físicas das sementes.

No Tabela 3.1 observa-se os percentuais de perdas de sementes em função do período entre a maturação e a colheita de milho. Se a colheita não pode ser feita para as sementes com teores entre 30-50%, base úmida (b.u.), quando estas atingem a maturação fisiológica, não deve também ser feita com teor de umidade abaixo de 25% b.u. , pois os percentuais de quebra das sementes aumentam de 1,5 para 14%, com a diminuição do teor de umidade das sementes.

TABELA 3.1 - Porcentagem de perdas em função do período entre a maturação e a colheita do milho

DIAS DEPOIS DA MATURAÇÃO	UMIDADE (%)	PERDAS (%)
6	25	1,5
10	23	2,0
20	20	3,0
25	18	5,0
30	17	7,0
34	16	9,0
40	15	12,0
50	15	14,0

Fonte: TOLEDO e MARCOS FILHO (1977)

Portanto, se a semente não pode ser colhida e debulhada no ponto de maturação fisiológico que, segundo VIEIRA (1988) é de 40% de umidade, base úmida (b.u.), para feijão,

esta, deve então sofrer uma pré-secagem na vagem até um teor de umidade ideal para a debulha, e a partir desta etapa o produto deve ser preparado para a armazenagem, uma vez que as sementes só vão ser comercializadas em períodos que variam de 1 a 12 meses. A secagem de feijão, desta maneira, deve ser feita do teor de umidade ideal para a debulha até um teor de umidade igual ou inferior a 12% b.u. (AZEVEDO e LAUDARES FILHO, 1982).

A tecnologia de secagem ainda utilizada pelos produtores de sementes são: a) **secagem natural** na planta ou terreiro e b) **secagem artificial** em secadores mecânicos utilizando ar aquecido.

2.2 Secagem natural

A secagem natural consiste em utilizar o sol como fonte de calor para promover a secagem, ou seja, utiliza-se o potencial de secagem do ar ambiente. Portanto, a mais elementar e secular forma de secar sementes é na própria planta, antes da colheita, ou depois da colheita em terreiros. A secagem em terreiros é feita espalhando-se as sementes em camadas que variam de 5 a 20 centímetros de espessura em pisos que podem ser de diferentes composições (tabuleiros, encerados, cimento, tijolos, etc.). Para melhorar este tipo de secagem, recomenda-se movimentar as sementes dentro do terreiro com bastante frequência. Este tipo de secagem pode variar de 15 a 45 dias (CAVALCANTI MATA *et alii*, 1980).

O elevado índice de infestação decorrente da aplicação desses métodos de secagem pode causar grandes danos ao produto durante o armazenamento, tais como queda de peso e perda de qualidade, principalmente devido ao ataque de insetos e a ação de bactérias e fungos os quais causam fermentação, modificações organolépticas e redução dos valores nutritivos e germinativo das sementes. Diante deste quadro, esses tipos de secagem não são recomendados por técnicos quando se exige alto padrão de qualidade das sementes.

Com a adoção da secagem natural, o produto está sujeito a tensões causadas pela secagem e reumedecimento, devido às variações de umidade do ambiente, que nem sempre garantem a secagem de um produto. As sementes, em contato com o ambiente onde a umidade oscila, irá absorver ou ceder certa quantidade de umidade quando a umidade relativa do ambiente é aumentada ou diminuída, até que seja atingido o equilíbrio higroscópico.

Diante desses aspectos, torna-se necessário o uso da secagem artificial. Esta não depende dos fatores climáticos para sua operação existindo, contudo, a necessidade de investigações crescentes quanto aos processos mais eficientes, tendo em vista a qualidade dos produto e as necessidades a que se destinam.

2.3 Secagem artificial

A secagem artificial com ar aquecido consiste em fazer com que o ar ambiente seja aquecido por meio de uma fonte de calor (fornalha) de modo a fazer com que o ar saia da condição de estado 1 e vá para uma condição de estado 2, como mostrado no gráfico da Figura 3.1, criando desta forma, capacidade de secagem. Como se pode observar no gráfico, o aquecimento serve para que o ar se expanda diminuindo a sua umidade relativa e criando capacidade para absorver água das sementes.

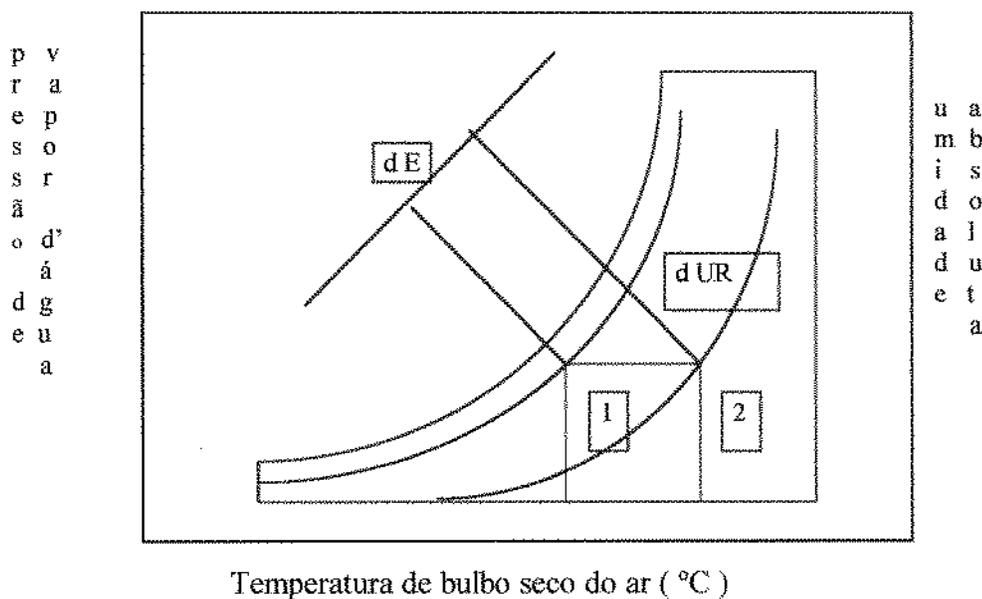


FIGURA 3.1 - Desenho esquemático do gráfico psicrométrico, mostrando o processo de aquecimento do ar ambiente.

Dentre os diversos processos de secagem e dos diferentes secadores existentes no mercado brasileiro, os mais usuais são os secadores de fluxo cruzado e o de camada estacionária, sendo que os de camada estacionária estão localizados na maioria das Unidades de Beneficiamento de Sementes (UBS) existentes no Brasil.

Neste tipo de secador, o comportamento da secagem é equivalente a secagem de múltiplas camadas finas e o sucesso da operação de secagem reside em fazer com que a frente de secagem chegue às últimas camadas do produto num tempo inferior ao tempo crítico de deterioração.

A secagem é função do gradiente de pressão de vapor entre a superfície da semente e o ar que a circunda. Assim, quanto mais úmida a superfície da semente e mais seco o ar com o qual está em contato, mais rápido é o movimento da umidade da superfície da semente para o ar. Segundo TOLEDO e MARCOS FILHO (1977), o emprego de ar aquecido também auxilia a secagem porque o aquecimento estimula a difusão de umidade do interior para a superfície da semente e provoca aumento da pressão de vapor, estimulando a evaporação. O emprego de ar dessecado é muito útil, principalmente quando a semente é submetida à secagem até atingir teores de umidade muito baixos. Portanto, para que o ar em contato com as sementes retire umidade das mesmas, deve ser aquecido ou apresentar baixa umidade relativa, caso contrário o processo de secagem não tem continuidade.

Para algumas espécies de sementes, quando a secagem é rápida existe um encolhimento do tegumento, provocando um endurecimento deste, tornando a casca impermeável à umidade. Como consequência deste fenômeno a secagem é interrompida. Outra possibilidade de ocorrência da secagem rápida é o trincamento do tegumento, causando a exposição da parte interior das sementes ao ambiente, permitindo a entrada de microorganismos patogênicos, ocasionando plântulas anormais ou mesmo a morte das sementes.

Um dos fatores que provocam uma secagem rápida das sementes é a temperatura excessivamente elevada atingida pelas sementes, devido ao descontrole da câmara de combustão na adição e diminuição do material comburente (lenha). Na realidade, esta é de difícil controle necessitando mão de obra experiente para seu manuseio. Alguns pesquisadores como

THOMPSON *et alii* (1968), MARTINS (1988) tem usado, como maneira de controlar a temperatura dos secadores, resistências elétricas para o aquecimento do ar. No entanto, seu custo é muito elevado quando comparado com a lenha. Desta forma, tem-se secadores com baixo controle de temperaturas e danos das sementes secas, principalmente no seu vigor, ou, secadores com temperaturas controladas e custo de secagem mais elevado.

Por outro lado, a secagem muito lenta pode permitir o desenvolvimento de microorganismos decorrente do longo tempo a que as sementes podem ficar submetidas a um alto teor de umidade, ocasionando uma rápida perda do vigor e germinação das sementes. Portanto, torna-se necessário encontrar condição intermediária de secagem para que não ocorra trinca-mento ou impermeabilidade do tegumento decorrente da secagem rápida nem desenvolvimento de microorganismos patógenos decorrentes da secagem lenta.

2.3.1 - Secagem a baixas temperaturas

Define-se secagem a baixa temperatura o método artificial de secagem em que se utiliza ar à temperatura ambiente ou ar levemente aquecido, de 1 a 10 °C acima da temperatura ambiente.

A secagem a baixas temperaturas, quando feita em camadas espessas, é um processo lento e pode demorar uma semana e, em determinados casos, até um mês. Essa lentidão é devida à pequena quantidade de ar que se utiliza por unidade de massa de produto a ser seca e à dependência do sistema da capacidade do ar para evaporar água, que é muito menor do que nos sistemas que empregam temperaturas elevadas. A capacidade do ar para evaporar a umidade do produto, também denominada de potencial de secagem, determina o teor de umidade final que as sementes atingirão no final do processo. Uma região que apresenta baixa umidade relativa média tem maior potencial de secagem que regiões de alta umidade relativa média, obtendo-se, portanto, nessas regiões menor teor de umidade final (QUEIROZ e PEREIRA, 1987).

Alguns produtores de sementes já têm optado pela secagem a baixas temperaturas, devido à qualidade final do produto. Neste tipo de secagem, devido à perda de umidade ser lenta e o produto não sofrer choques térmicos, reduz a ocorrência de tensões internas nas sementes e o seu resultado pode ser melhor do que os obtidos em secadores que utilizam temperaturas elevadas.

Uma das maiores limitações da secagem a baixas temperaturas reside no fato das sementes não poderem permanecer determinado tempo com um teor de umidade inicial alto, pois neste caso sua deterioração é acelerada e a qualidade do produto diminuída substancialmente. Assim, este procedimento requer muita perícia e bom senso do produtor de sementes. Devido a este fato, a secagem a baixas temperaturas tem sido mais empregada na secagem de grãos do que na de sementes.

SATHLER (1979) estudou o efeito das temperatura de 30, 35, 40 45 e 50 °C e das umidades relativas do ar de 40 e 50 % na germinação de sementes de feijão-preto, variedade Rico-23 para uma velocidade do ar de secagem de 91,4 m.min.⁻¹ e teor de umidade inicial de 30%, base úmida. Verificou-se, neste trabalho, que não houve efeito significativo da umidade relativa, para as temperaturas estudadas, sobre a germinação das sementes, tendo concluído ainda que a germinação é afetada pela temperatura e quanto maior a temperatura de secagem menor a germinação das sementes. O autor atribui esta diminuição da germinação ao fato de que a maior temperatura do ar causa maior desnaturação e reestruturação das moléculas protéicas das sementes.

2.3.2 - Secagem a altas temperaturas

A temperatura de secagem em determinados níveis afeta a fisiologia das sementes nas suas mais diversas formas, inclusive na sua capacidade germinativa e no vigor do crescimento dessas plântulas. Segundo POPINIGIS (1977), a secagem em sementes não deve ultrapassar, de uma maneira geral, 45 °C. Assim, a secagem de sementes acima deste valor é considerada secagem a alta temperatura. Sabe-se, no entanto, que cada tipo de semente tem tolerância variável ao fator temperatura.

De acordo com OLIVEIRA *et alii* (1988), danos causados as sementes por secagem inadequada devido à temperatura excessivamente alta podem, em alguns casos, serem inibidos na armazenagem pelo uso de temperaturas menores nas câmaras de conservação. No entanto, isto significa aumento de custos da armazenagem das sementes.

É preciso ter muita cautela quando se menciona que uma determinada temperatura é indevida para secagem, pois só este fator por si só pode não ser o fator determinante. DALPASQUALE (1981) realizando testes de secagem com sementes de soja, em secador de fluxo concorrente a uma temperatura do ar de secagem de 121 °C e fluxo de massa de 21,7 kg.min⁻¹.m⁻² obteve um índice de germinação final de 62 % e, em outro trabalho, usando 204 °C e fluxo de massa de 80 kg.min⁻¹.m⁻² obteve uma porcentagem de germinação final de 72%. Em ambos os casos o teor de umidade final foi de 13% b.u.. Se fossem analisadas apenas a temperatura de secagem e a porcentagem de germinação, os resultados estariam em contradição com o que é comumente aceito. Mas se fossem incluídos na análise o fluxo de massa e, conseqüentemente, o tempo de residência do produto no secador, seria possível perceber que as sementes estiveram sujeitas à temperatura mais elevada, por um período de tempo inferior àquele a 121°C, resultando, assim em um maior poder de germinação. Pode-se afirmar então que é possível secar sementes em altas temperaturas, desde que sejam adequadamente definidos os parâmetros de secagem e, de modo preferencial, a temperatura do ar de secagem e o fluxo do produto (DALPASQUALE *et alii* (1987).

MOKSHIN e SILCHENKO (1982), em trabalho com secagem de diversas variedades de feijão, estudaram a perda de germinação para os teores de umidade inicial de 17,5 a 30,5% b.u. e temperaturas do ar de secagem de 20 a 80 °C e concluíram que a germinação foi pouco afetada por temperaturas do ar de secagem até 60 °C, mas houve um decréscimo bastante acentuado quando se secou as sementes com as temperaturas de 70 e 80 °C.

BORÉM (1992) secou em camada fina sementes de milho híbrido AG-303 com teor de umidade inicial de 17,6 % b.u. e velocidade do ar de 10 m³.min⁻¹.m⁻² e determinou o efeito das temperaturas de 30, 40, 50 e 55 °C e umidades relativas do ar de secagem de 30, 40, 50 e 60 % sobre a germinação e o vigor das sementes, tendo concluído que a germinação das sementes de milho não foram afetadas imediatamente pela secagem às temperaturas e umidades relativas empregadas. O vigor das sementes, no entanto, foi afetado significativamente pela ação da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem. Permite-se concluir neste trabalho que a germinação decai com o aumento de temperatura, no entanto para a umidade relativa do ar, torna-se difícil concluir algo já que não se verifica uma tendência clara deste parâmetro.

AFONSO JÚNIOR (1996) estudou o efeito latente e imediato da secagem em camada fina de sementes de feijão variedade "ouro negro 1992" sobre a qualidade fisiológica das sementes, para quatro níveis de temperatura (35, 40, 45 e 50 °C), três níveis de teor de umidade (17,1; 25,5 e 37,3% b.u.) e fluxo de ar de aproximadamente 10 m³.min⁻¹.m⁻². Conclui-se neste

trabalho que a temperatura e o teor de umidade inicial afetam a germinação e o vigor das sementes de feijão imediatamente depois da secagem e a 180 dias depois da secagem. As sementes secas com o teor de umidade inicial de 17,1 % b.u. foram as que apresentaram menores perdas de germinação e vigor, imediatamente e depois de 180 da secagem (efeito latente), independentemente das temperaturas estudadas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta etapa do presente trabalho foi realizada no Laboratório de Processamento e Armazenagem de Produtos Vegetais do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem do Centro de Ciências e Tecnologia e no Laboratório de Operações Unitárias do Departamento de Engenharia Química - DEQ, ambos da Universidade Federal da Paraíba.

Para a realização desta etapa foram utilizadas sementes de feijão variedade "carioca" plantado no campo experimental situado no município de Lagoa Seca pertencente à Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária do Estado da Paraíba - EMEPA. Estas sementes foram do mesmo lote das plantadas para condução do Capítulo 2 só que plantadas e colhidas mais tardiamente.

O feijão foi colhido na vagem com um teor de umidade em torno de 46 % base seca (b.s.), levado ao Laboratório de Processamento e Armazenagem de Produtos Vegetais e debulhado neste local manualmente. Para condução dos testes de secagem em camada delgada, as sementes foram separadas em lotes de 300 gramas, sendo que, para cada teor de umidade inicial, as sementes foram secas com auxílio de um ventilador utilizando ar ambiente. As sementes que atingiam o teor de umidade desejado eram embaladas em saco de plástico e colocadas em câmaras BOD da FANEN controladas à temperatura de 5 °C até que fosse possível conduzir o teste de secagem.

3.1. Secagem em camada delgada por curtos períodos de tempo

Para as secagens das sementes de feijão, estas eram retiradas dos sacos de plásticos, que estavam em câmara fria a 5 °C, e colocadas no ambiente até que atingissem o equilíbrio térmico. Em seguida, antes de cada secagem, o teor de umidade das sementes de feijão era determinado em estufa marca FANEN modelo 330, com circulação de ar, segundo as Regras para análise de sementes (BRASIL, 1976) com modificações no binômio tempo temperatura. A temperatura utilizada foi de 130 °C durante um período de tempo de 4 horas.

Posteriormente, uma média de 300 gramas de sementes eram colocadas em um secador experimental localizado no Laboratório de Operações Unitárias do DEQ com o sistema pré-estabilizado para a temperatura e a velocidade do ar de 0,5 m.s⁻¹. O secador é o mesmo que foi descrito no Capítulo 2. As curvas de secagem foram obtidas com 2 repetições.

As secagens foram realizadas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C e teor de umidade inicial de 25, 35 e 45 % base seca, com a finalidade de se investigar até que ponto as altas temperaturas podem ser usadas no processo de secagem sem que a qualidade fisiológica das sementes seja afetada. Para tanto, esses testes de secagem foram conduzidos da forma descrita a seguir:

Inicialmente as sementes com teor de umidade inicial de 45 % b.s. foram secas à temperatura de 70 °C, até um teor de umidade de 40% b.s., sendo feita uma secagem complementar imediata à temperatura de 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % base seca. Foram feitas secagens com este procedimento às temperaturas de 70, 60, 50 e 45°C. Testes subsequentes foram realizados da mesma forma só que procedendo-se a secagem até os teores de umidade de 35, 30, 25, 20 e 15 % b.s. com secagem complementar imediata à temperatura de 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % base seca.

Para todas as temperaturas supracitadas, foram também conduzidos testes com o mesmo procedimento acima descrito para um teor de umidade inicial de 35 % b.s. e 25 % b.s.. Para o teor de umidade inicial de 35 % b.s. as secagens foram conduzidas até 30, 25, 20 e 15 % b.s. e para o teor de umidade inicial de 25 % b.s. até 20 e 15 % b.s. (Tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente).

Os Quadros 3.2, 3.3 e 3.4 mostram os testes de secagem que foram feitos para o teor de umidade inicial de 45, 35 e 25%, base seca, respectivamente.

TABELA 3.2 Testes de secagem conduzidos para identificar a partir de que ponto as altas temperaturas podem ser usadas no processo de secagem, sem que a qualidade fisiológica das sementes seja afetada - Teor de umidade Inicial das sementes de 45 % base seca

Temperatura	Secagem	Temperatura	Secagem complementar
70	45%b.s. até 40% b.s. 45%b.s. até 35% b.s. 45%b.s. até 30% b.s. 45%b.s. até 25% b.s. 45%b.s. até 20% b.s. 45%b.s. até 15% b.s.	40	40%b.s. até 13,5% b.s. 35%b.s. até 13,5% b.s. 30%b.s. até 13,5% b.s. 25%b.s. até 13,5% b.s. 20%b.s. até 13,5% b.s. 15%b.s. até 13,5% b.s.
60	45%b.s. até 40% b.s. 45%b.s. até 35% b.s. 45%b.s. até 30% b.s. 45%b.s. até 25% b.s. 45%b.s. até 20% b.s. 45%b.s. até 15% b.s.	40	40%b.s. até 13,5% b.s. 35%b.s. até 13,5% b.s. 30%b.s. até 13,5% b.s. 25%b.s. até 13,5% b.s. 20%b.s. até 13,5% b.s. 15%b.s. até 13,5% b.s.
50	45%b.s. até 40% b.s. 45%b.s. até 35% b.s. 45%b.s. até 30% b.s. 45%b.s. até 25% b.s. 45%b.s. até 20% b.s. 45%b.s. até 15% b.s.	40	40%b.s. até 13,5% b.s. 35%b.s. até 13,5% b.s. 30%b.s. até 13,5% b.s. 25%b.s. até 13,5% b.s. 20%b.s. até 13,5% b.s. 15%b.s. até 13,5% b.s.
45	45%b.s. até 40% b.s. 45%b.s. até 35% b.s. 45%b.s. até 30% b.s. 45%b.s. até 25% b.s. 45%b.s. até 20% b.s. 45%b.s. até 15% b.s.	40	40%b.s. até 13,5% b.s. 35%b.s. até 13,5% b.s. 30%b.s. até 13,5% b.s. 25%b.s. até 13,5% b.s. 20%b.s. até 13,5% b.s. 15%b.s. até 13,5% b.s.

TABELA 3.3 Testes de secagem conduzidos para identificar a partir de que ponto as altas temperaturas podem ser usadas no processo de secagem, sem que a qualidade fisiológica das sementes seja afetada - Teor de umidade Inicial das sementes de 35 % base seca

Temperatura	Secagem	Temperatura	Secagem complementar
70	35%b.s. até 30% b.s. 35%b.s. até 25% b.s. 35%b.s. até 20% b.s. 35%b.s. até 15% b.s.	40	30%b.s. até 13,5% b.s. 25%b.s. até 13,5% b.s. 20%b.s. até 13,5% b.s. 15%b.s. até 13,5% b.s.
60	35%b.s. até 30% b.s. 35%b.s. até 25% b.s. 35%b.s. até 20% b.s. 35%b.s. até 15% b.s.	40	30%b.s. até 13,5% b.s. 25%b.s. até 13,5% b.s. 20%b.s. até 13,5% b.s. 15%b.s. até 13,5% b.s.
50	35%b.s. até 30% b.s. 35%b.s. até 25% b.s. 35%b.s. até 20% b.s. 35%b.s. até 15% b.s.	40	30%b.s. até 13,5% b.s. 25%b.s. até 13,5% b.s. 20%b.s. até 13,5% b.s. 15%b.s. até 13,5% b.s.
45	35%b.s. até 30% b.s. 45%b.s. até 25% b.s. 35%b.s. até 20% b.s. 35%b.s. até 15% b.s.	40	30%b.s. até 13,5% b.s. 25%b.s. até 13,5% b.s. 20%b.s. até 13,5% b.s. 15%b.s. até 13,5% b.s.

TABELA 3.4 Testes de secagem conduzidos para identificar a partir de que ponto as altas temperaturas podem ser usadas no processo de secagem, sem que a qualidade fisiológica das sementes seja afetada - Teor de umidade Inicial das sementes de 25 % base seca.

Temperatura	Secagem	Temperatura	Secagem complementar
70	25%b.s. até 20% b.s. 25%b.s. até 15% b.s.	40	20%b.s. até 13,5% b.s. 15%b.s. até 13,5% b.s.
60	25%b.s. até 20% b.s. 25%b.s. até 15% b.s.	40	20%b.s. até 13,5% b.s. 15%b.s. até 13,5% b.s.
50	25%b.s. até 20% b.s. 25%b.s. até 15% b.s.	40	20%b.s. até 13,5% b.s. 15%b.s. até 13,5% b.s.
45	25%b.s. até 20% b.s. 25%b.s. até 15% b.s.	40	20%b.s. até 13,5% b.s. 15%b.s. até 13,5% b.s.

A diminuição do teor de umidade com o tempo para cada temperatura e teor de umidade inicial estudado foi determinada pela perda de peso, conhecendo-se o teor de umidade inicial. A balança utilizada para este acompanhamento foi uma balança Mettler PC 440, com precisão de 0,01 grama.

3.2 Análise da qualidade fisiológica

Antes e depois da secagem foram feitas análises de germinação e vigor das sementes do feijão “carioca”.

3.2.1 - Teste de Germinação

Para a determinação do percentual de germinação das sementes de feijão foram utilizadas bandejas de plástico de 40 cm de comprimento por 25 cm de largura e 8 cm de altura (Figura 3. 2), contendo como substrato 10 kg de areia, previamente passada em uma peneira de malha fina (No. 16 - ABNT), e esterilizada a 140 °C por 12 horas. A areia foi umedecida com 1000 ml de água destilada, sendo reposta uma quantidade de água variável de 2 em 2 dias à medida em que o substrato era ressecado pelo ar ambiente. Para cada determinação foram utilizadas 3 bandejas (repetições) contendo, cada uma, 100 sementes. A percentagem de germinação foi obtida pela contagem das plântulas sadias emersas até o nono dia.



FIGURA 3.2 - Bandeja de plástico utilizada para determinação da germinação e vigor das sementes de feijão.

3.2.2 - Teste de vigor

O teste de vigor foi realizado utilizando-se o teste indireto da primeira contagem da germinação, efetuado no quinto dia, seguindo-se a mesma metodologia anteriormente descrita.

3.3 - Análise estatística

Para determinação do ponto crítico em que as sementes começam a ser afetadas pela ação da temperatura e a influência do teor de umidade inicial neste processo de secagem, realizaram-se análises estatísticas dos dados de germinação e vigor, utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado, seguindo um esquema fatorial variável. Para a secagem das sementes de feijão feita com um teor de umidade inicial de 45 % b.s. o esquema fatorial foi 4 X 6

(4 temperaturas: 45, 50, 60 e 70 °C) X (6 processos de secagens; secagem de um teor de umidade inicial de 45%b.s. até 40, 35, 30, 25, 20 e 15% b.s. com secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.). Para a secagem das sementes de feijão feitas com um teor de umidade inicial de 35 % b.s. o esquema fatorial foi 4 X 4 (4 temperaturas: 45, 50, 60 e 70 °C) X (4 processos de secagem; secagem de um teor de umidade inicial de 35%b.s. até 30, 25, 20 e 15% b.s. com secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.) e para a secagem das sementes feita com um teor de umidade inicial de 25 % b.s. o esquema fatorial foi 4 X 2 (4 temperaturas: 45, 50, 60 e 70 °C) X (2 processos de secagem; secagem de um teor de umidade inicial de 25%b.s. até 20 e 15% b.s. com secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.).

As análises de variância foram feitas usando o programa computacional ASSISTAT 6.1 (SILVA, 1996) e a comparação entre médias foi pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade (GOMES, 1982).

Para efetivação da análise de variância, os resultados obtidos de germinação e vigor foram transformados em $\text{arc sen}(P/100)^{1/2}$, em que P é a percentagem de germinação ou vigor (SNEDECOR, 1966).

Com os dados obtidos experimentalmente determinou-se uma equação que correlaciona a qualidade fisiológica (germinação e vigor) com o tempo de residência das sementes submetidas a ação das diferentes temperaturas de secagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste capítulo são descritos a seguir. Procurou-se verificar até que teor de umidade as sementes de feijão podem ser secas a altas temperaturas sem que seja afetada na sua qualidade fisiológica.

4.1. Secagem em camada delgada por curtos períodos de tempo

Na Figura 3.3 estão representadas graficamente as curvas de secagem das sementes de feijão conduzidas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C, secas a partir de um teor de umidade inicial de 45 % base seca até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15 %, base seca. Atingido cada um desses teores de umidade a secagem complementar foi feita a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s. Nas Figuras 3.4 e 3.5 estão as curvas de secagem conduzidas às mesmas temperaturas só que para um teor de umidade inicial de 35% e 25 % b.s.. No caso do teor de umidade inicial de 35% b.s. os testes de secagem foram conduzidos até os teores de umidade de 30, 25, 20 e 15 % b.s. e para o teor de umidade inicial de 25 % b.s., até os teores de umidade de 20 e 15 % b.s.. Em ambos os casos depois de atingir cada teor de umidade a secagem complementar foi feita a 40 °C até o teor de umidade de 13,5% b.s.

Nessas figuras também não é possível mostrar o processo de secagem como um todo já que haveria cruzamento e ou superposição de curvas e estas figuras ficariam confusas, portanto, a Figura 3.6 ilustra apenas a condução de dois testes de secagem. Os dados experimentais das diversas secagens estão no Apêndice 3A.

Nestas figuras também não é possível observar com precisão o tempo em que as sementes ficaram no secador com determinada temperatura. Por isso, a Tabela 3.5 mostra, para cada condição de secagem, o tempo que o produto foi exposto às temperaturas consideradas

altas para secagem de sementes. A secagem à temperatura de 45 °C, nas tabelas e figuras, serve como testemunha já que esta é a temperatura mais recomendada para secagem de sementes, uma vez que até esta temperatura a qualidade das sementes não é afetada (POPINIGIS, 1988; TOLEDO e MARCOS FILHO, 1977).

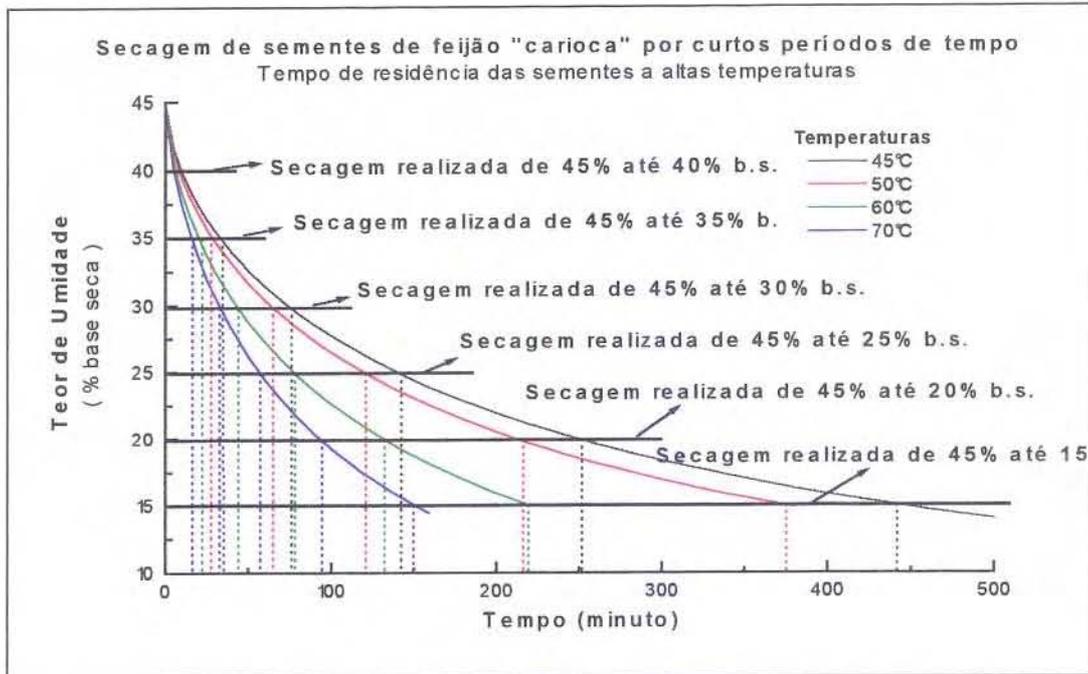


FIGURA 3.3 - Curvas de secagem de sementes de feijão às temperaturas de 45, 50 60 e 70 °C secas a partir do teor de umidade inicial de 45 % b.s. até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15% b.s.

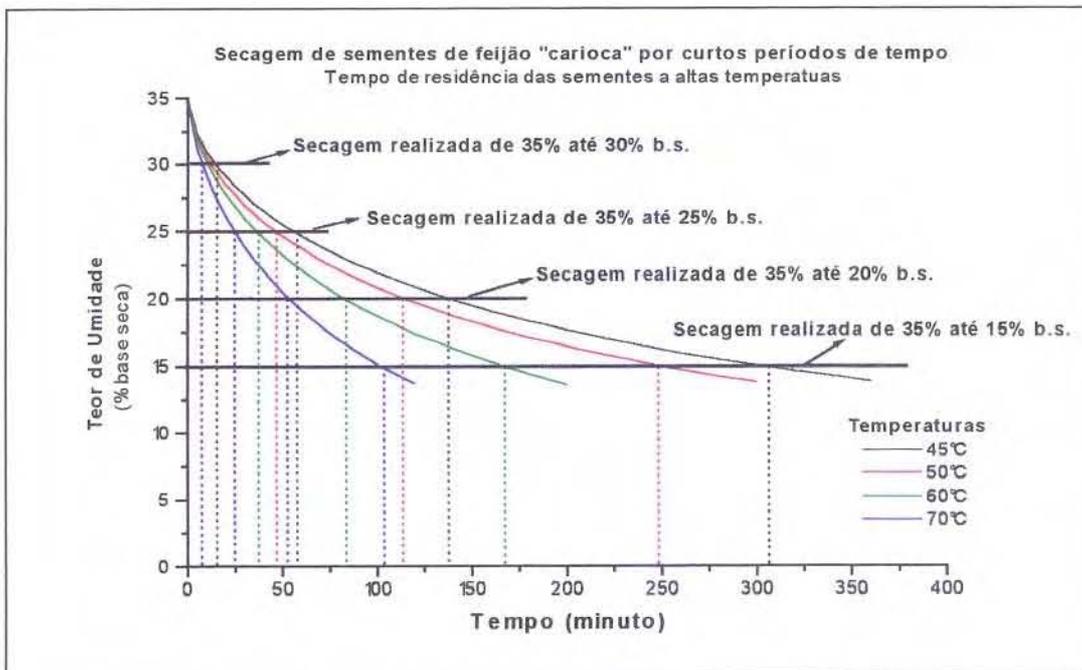


FIGURA 3.4 - Curvas de secagem de sementes de feijão às temperaturas de 45, 50 60 e 70 °C secas a partir do teor de umidade inicial de 35 % b.s. até os teores de umidade de 30, 25, 20 e 15 % b.s.

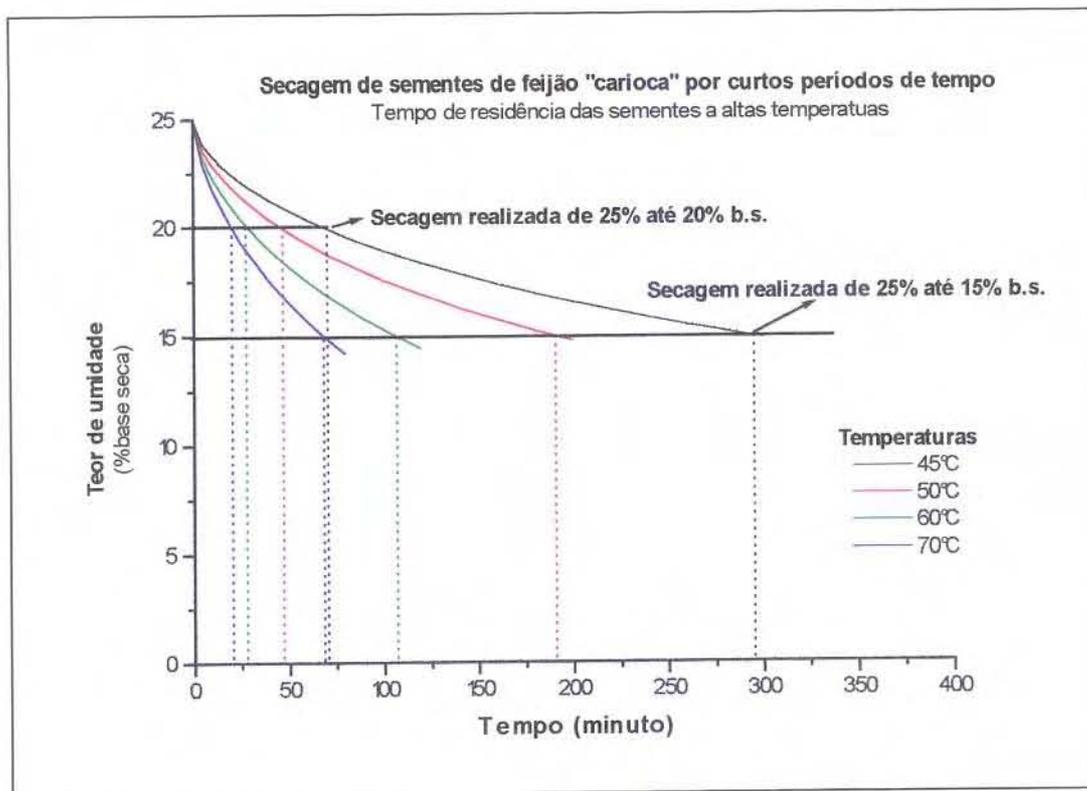


FIGURA 3.5 - Curvas de secagem de sementes de feijão às temperaturas de 45, 50 60 e 70 °C secas a partir do teor de umidade inicial de 25 % b.s. até os teores de umidade de 20 e 15 % b.s.

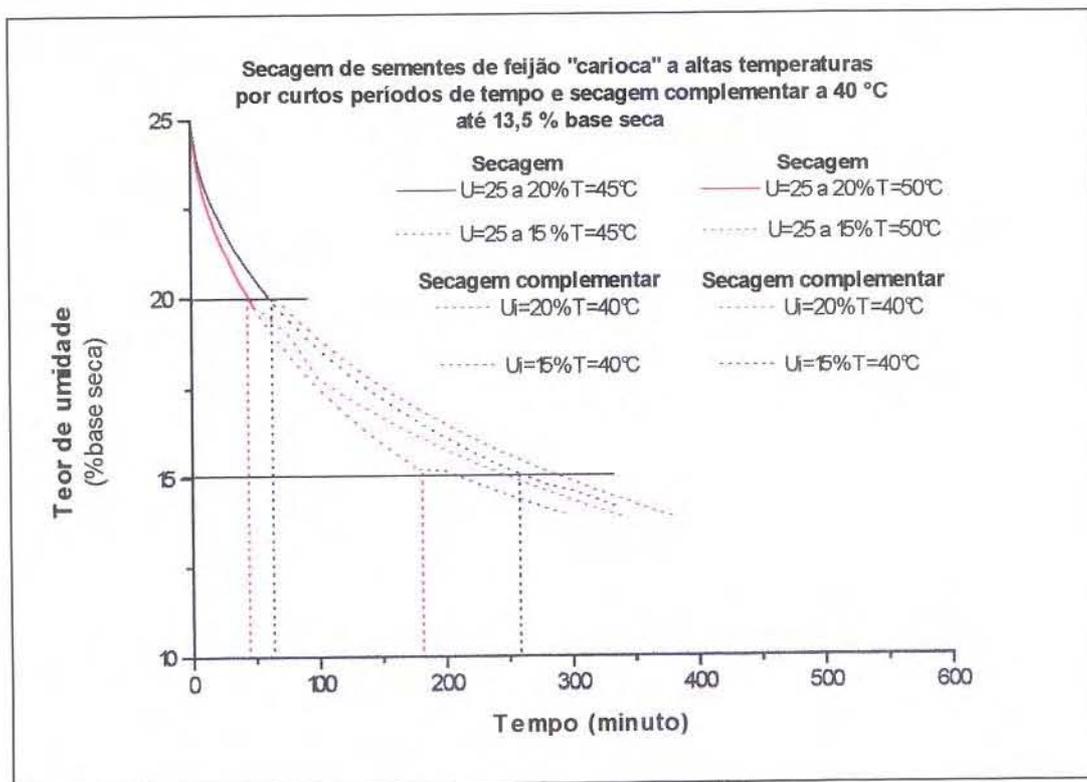


FIGURA 3.6 - Curvas de secagem de sementes de feijão à temperatura de 45 e 50 °C secas a partir do teor de umidade inicial de 25 % b.s. até os teores de umidade de 20 e 15% b.s., com secagem complementar a 40 °C até 13,5 % b.s.

TABELA 3.5 Tempo de residência das sementes no secador para identificar o ponto crítico onde a qualidade fisiológica das sementes é afetada pela secagem a altas temperaturas - Teor de umidade Inicial das sementes de 45, 35 e 25 % b.s.

Temperatura (°C)	Secagem	Temperatura (°C)	Secagem complementar	Tempo de residência no secador (min.)
70	45%b.s. até 40% b.s.	40	40%b.s. até 13,5% b.s.	5
	45%b.s. até 35% b.s.		35%b.s. até 13,5% b.s.	15
	45%b.s. até 30% b.s.		30%b.s. até 13,5% b.s.	30
	45%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	55
	45%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	95
	45%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	150
60	45%b.s. até 40% b.s.	40	40%b.s. até 13,5% b.s.	6
	45%b.s. até 35% b.s.		35%b.s. até 13,5% b.s.	20
	45%b.s. até 30% b.s.		30%b.s. até 13,5% b.s.	41
	45%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	78
	45%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	135
	45%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	220
50	45%b.s. até 40% b.s.	40	40%b.s. até 13,5% b.s.	9
	45%b.s. até 35% b.s.		35%b.s. até 13,5% b.s.	28
	45%b.s. até 30% b.s.		30%b.s. até 13,5% b.s.	65
	45%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	120
	45%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	210
	45%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	370
45	45%b.s. até 40% b.s.	40	40%b.s. até 13,5% b.s.	10
	45%b.s. até 35% b.s.		35%b.s. até 13,5% b.s.	32
	45%b.s. até 30% b.s.		30%b.s. até 13,5% b.s.	72
	45%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	140
	45%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	245
	45%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	440
70	35%b.s. até 30% b.s.	40	30%b.s. até 13,5% b.s.	7,5
	35%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	25
	35%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	54
	35%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	105
60	35%b.s. até 30% b.s.	40	30%b.s. até 13,5% b.s.	11
	35%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	37
	35%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	83
	35%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	170
50	35%b.s. até 30% b.s.	40	30%b.s. até 13,5% b.s.	13
	35%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	45
	35%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	40
	35%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	245
45	35%b.s. até 30% b.s.	40	30%b.s. até 13,5% b.s.	15
	35%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	55
	35%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	130
	35%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	300
70	25%b.s. até 20% b.s.	40	20%b.s. até 13,5% b.s.	20
	25%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	69
60	25%b.s. até 20% b.s.	40	20%b.s. até 13,5% b.s.	28
	25%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	108
50	25%b.s. até 20% b.s.	40	20%b.s. até 13,5% b.s.	43
	25%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	185
45	25%b.s. até 20% b.s.	40	20%b.s. até 13,5% b.s.	60
	25%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	260

4.2. Germinação das sementes em função das condições de secagem

Na Tabela 3.6 encontram-se os valores médios da germinação das sementes de feijão “carioca” secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 45 % b.s. até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15 % b.s. e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s. e na Tabela 3.7 está a análise de variância mostrando que existem diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade para os fatores temperatura e secagem das sementes secas a altas temperaturas, até determinado teor de umidade e a interação entre esses fatores.

TABELA 3.6 Valores médios da **germinação** de sementes de feijão “carioca”, secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 45% b.s. até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15% e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.

GERMINAÇÃO DAS SEMENTES DE FEIJÃO SUBMETIDAS A DETERMINADAS CONDIÇÕES DE SECAGEM							
Temperatura (°C)	Teor de Umidade final à temperatura especificada e secagem complementar a 40 °C até 13,5% base seca						Médias
	40%	35%	30%	25%	20%	15%	
45	95,33	96,00	97,00	95,00	95,67	93,67	95,44
50	96,00	97,00	96,00	92,00	90,00	86,00	92,83
60	96,00	95,33	97,00	88,00	92,00	86,00	92,39
70	97,00	96,00	84,00	76,00	74,33	70,00	82,89
Médias	96,08	96,08	93,50	87,75	88,00	83,92	90,89

TABELA 3.7 Análise de variância de **germinação** das sementes de feijão “carioca, secas às diferentes temperaturas e condições de secagem - Teor de umidade inicial de 45 % b.s.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Temperatura	3	2121,7395	707,2465	153,90 **
Umidade de secagem	5	2743,2395	548,6479	119,39 **
Temperatura x Umidade	15	1516,9688	101,1312	22,01 **
Resíduo	48	220,5835	4,5955	
Total	71	6602,5313		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Na Tabela 3.8 são mostrados os valores médios de germinação transformados em arco seno $\sqrt{P/100}$ para os fatores temperatura e secagem das sementes de feijão conduzidas até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15 % b.s. com secagem complementar a 40 °C

até o teor de umidade de 13,5 % b.s.. Observa-se nesta tabela, que a temperatura de secagem afeta significativamente a germinação, onde a temperatura de 45 °C difere significativamente das demais temperaturas. As temperaturas de secagem de 50 e 60 °C afetam igualmente a germinação das sementes de feijão e à temperatura de 70 °C a perda de germinação média se dá de 95,44% (74,18) para 82,89 % (58,18).

Da Tabela 3.8 é possível extrair que, de uma maneira genérica, a germinação das sementes de feijão não é afetada até quando a secagem é conduzida do teor de umidade inicial de 45% b.s. até a umidade de 35% b.s. para, a partir desta etapa, ser afetada pela ação da temperatura. A Tabela 3.9 mostra este fato mais detalhadamente por meio da interação entre os dois fatores. Nesta tabela, analisando-se na linha, verifica-se que à temperatura de 45 °C pode-se secar as sementes de um teor de umidade de 45 % b.s. até 20 % b.s. sem que a germinação seja alterada significativamente. Para as temperaturas de 50 e 60 °C, a secagem pode ser conduzida de 45 % b.s. até 30 % b.s. e para a temperatura de 70 °C de 45 % b.s. até 35 % b.s.

Analisando-se as colunas da Tabela 3.9, observa-se que a germinação não é afetada pela secagem quando esta é conduzida do teor de umidade de 45% b.s. até 35% b.s. para qualquer das temperaturas estudadas. Se a secagem for feita às temperaturas de 45, 50 ou 60 °C o processo de secagem pode ser conduzido do teor de umidade inicial de 45 % b.s. até 30 % b.s. que a germinação das sementes não será afetada significativamente.

TABELA 3.8 Valores médios da **germinação** de sementes de feijão para os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 45 % b.s.

VALORES MÉDIOS DE GERMINAÇÃO DAS SEMENTES DE FEIJÃO PARA OS FATORES TEMPERATURA E SECAGEM DAS SEMENTES ATÉ DETERMINADO TEOR DE UMIDADE COM SECAGEM COMPLEMENTAR A 40 °C			
TEMPERATURAS	Médias	Secagem a partir de 45 % até	Médias
45	72,9193 a	40%	74,1754 a
50	69,0097 b	35%	73,9861 a
60	68,3636 b	30%	70,8616 b
70	58,2248 c	25%	62,4989 c
		20%	63,0774 c
		15%	58,1768 d
	DMS = 1,9024		DMS = 2,5960

As médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Média Geral = 67,1294

Coefficiente de Variação- CV%= 3,1934

DMS - Desvio mínimo significativo

TABELA 3.9 Valores médios da **germinação** de sementes de feijão "carioca", para a interação entre os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 45 % b.s.¹

MÉDIAS DAS GERMINAÇÕES DE SEMENTES DE FEIJÃO PARA A INTERAÇÃO ENTRE OS FATORES TEMPERATURA E SECAGEM DAS SEMENTES ATÉ DETERMINADO TEOR DE UMIDADE COM SECAGEM COMPLEMENTAR A 40 °C							
Temperatura (°C)	Teor de Umidade final à temperatura especificada e secagem complementar a 40 °C até 14% base seca						Médias
	40%	35%	30%	25%	20%	15%	
45	72,60 AB a	73,82 AB a	76,54 A a	71,87 AB a	73,09 AB a	69,59 B a	72,92
50	73,74 A a	75,93 A a	73,82 A a	66,96 B b	64,24 BC b	59,37 C b	69,01
60	73,82 A a	72,45 A a	75,93 A a	61,71 BC c	66,96 B b	59,32 C b	68,36
70	76,54 A a	73,74 A a	57,15 B b	49,47 C d	48,02 CD c	44,43 D c	58,22
Médias	74,18	73,99	70,86	62,50	63,08	58,18	67,13
DMS/coluna = 4,66 (letras minúsculas)				DMS/linha = 5,19 (letras maiúsculas)			

¹ Para cada característica avaliada, as médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Estudando-se a Tabela 3.9 é possível verificar ainda que, mesmo a temperatura de secagem de 45 °C afeta a germinação das sementes e esta secagem, para que este fato não ocorra, deve ser feita do teor de umidade inicial de 45 % b.s. até 20% b.s. e secagem complementar a uma menor temperatura. Este fato vem confirmar os resultados obtidos por SATHLER (1979), que verificou que existia efeito da temperatura de secagem na germinação das sementes de feijão preto para as temperaturas de 30 a 50 °C.

Na Tabela 3.10 estão os valores médios da germinação das sementes de feijão secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C, a partir de um teor de umidade inicial de 35% b.s. até os teores de umidade de 30, 25, 20 e 15% b.s. e suplementar secagem a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.. Na Tabela 3.11 está a análise de variância dos fatores estudados e de sua interação. Observa-se que existe efeito significativo, ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F para o fator temperatura, fator secagem conduzida até determinado teor de umidade e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade final de 13,5 % b.s. e a interação desses fatores.

Analisando-se os fatores isoladamente na Tabela 3.12, constata-se que a secagem conduzida à temperatura de 45 °C é a temperatura que menos afeta a germinação das sementes, diferindo significativamente das demais temperaturas estudadas. A secagem das sementes feita às temperaturas de 50 e 60 °C afeta a germinação igualmente e, à temperatura de 70 °C a germinação das sementes é diminuída e difere significativamente das demais. Nesta tabela também constata-se que de uma maneira genérica a secagem pode ser conduzida de um teor de umidade inicial de 35 % b.s. até 20 % b.s. sem que a germinação seja afetada significativamente. No entanto, quando se analisa a Tabela 3.13, que é a interação entre os fatores verifica-se que para a temperatura de 45 °C as secagens conduzidas a partir do teor de umidade inicial de 35 % b.s. até o teor de 30 ou 25 ou 15 % b.s. não diferem significativamente entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey, existindo uma diferença quando a secagem foi conduzida do teor de umidade de 35 % até 20% b.s.. Embora este dado possa parecer um comportamento anormal, na realidade não é. O fato tem sido observado por diversos autores e

tem sido atribuído à quebra de dormência das sementes provocadas pela ação da temperatura por determinado tempo. Segundo CARVALHO e NAKAGAWA (1988), um dos métodos para superar dormência é a exposição das sementes a determinada temperatura por tempo determinado. Um tempo inferior não é suficiente para que ocorra a superação da dormência e com aplicação de tempo superior ao pré-estabelecido, a germinação das sementes é afetada, podendo até aumentar o índice de sementes dormentes (ALMEIDA e CAVALCANTI MATA, 1987/1990).

TABELA 3.10 Valores médios da **germinação** de sementes de feijão "carioca", secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 35% b.s. até os teores de umidade de 30, 25, 20 e 15% b.s. e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.

GERMINAÇÃO DAS SEMENTES DE FEIJÃO SUBMETIDAS A DETERMINADAS CONDIÇÕES DE SECAGEM					
Temperatura (°C)	Teor de Umidade final à temperatura especificada e secagem complementar a 40 °C até 13,5% base seca				
	30%	25%	20%	15%	Médias
45	95,00	94,67	96,67	95,00	95,33
50	94,67	95,00	95,00	92,00	94,17
60	96,67	96,00	93,00	90,33	94,00
70	93,67	92,00	91,67	84,00	90,33
Médias	95,00	94,42	94,08	90,33	93,46

TABELA 3.11 Análise de variância da **germinação** de sementes de feijão "carioca, secas às diferentes temperaturas e condições de secagem - Teor de umidade inicial de 35 % b.s. - Teor de umidade inicial de 35 % b.s.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Temperatura	3	371,7396	123,9132	51,98 **
Umidade de secagem	3	337,9063	112,6354	47,25 **
Temperatura x Umidade	9	218,3854	24,2650	10,18 **
Resíduo	32	76,2813	2,3838	
Total	47	1004,3125		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Na Tabela 3.13 observa-se que as secagens realizadas às temperatura de 50 e 60 °C podem ser conduzidas de 35 % b.s. até 20 % b.s. e de 35 % b.s. até 25 % b.s., respectivamente, sem que a germinação das sementes sejam afetadas. Com relação à temperatura de 70 °C, a secagem pode ser conduzida do teor de umidade de 35 % b.s. até 20 % b.s. sem que existam diferenças significativas entre as secagens. No entanto, analisando-se na coluna verifica-se que o fator temperatura difere das demais temperaturas para as secagens conduzidas do teor de

umidade inicial até 25 % e 20 % b.s., embora para este último teor de umidade a secagem à temperatura de 60 e 70 °C não difiram significativamente entre si.

TABELA 3.12 Valores médios de **germinação** de sementes de feijão para os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 35 % base seca

VALORES MÉDIOS DE GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE FEIJÃO PARA OS FATORES TEMPERATURA E SECAGEM DAS SEMENTES ATÉ DETERMINADO TEOR DE UMIDADE COM SECAGEM COMPLEMENTAR A 40 °C			
TEMPERATURAS (°C)	Médias	Secagem a partir de 35 % até	Médias
45	72,5491 a	30%	71,9495 a
50	70,4615 b	25%	70,9941 a
60	70,5043 b	20%	70,4819 a
70	65,0476 c	15%	65,1369 b
	DMS= 1,7059		DMS= 1,7059

As médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Média Geral = 69,6406

Coefficiente de Variação- CV%= 2,2170

DMS - Desvio mínimo significativo

TABELA 3.13 Valores médios da **germinação** de sementes de feijão “carioca”, para a interação entre os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 35 % base seca¹

MÉDIAS DAS GERMINAÇÕES DE SEMENTES DE FEIJÃO PARA A INTERAÇÃO ENTRE OS FATORES TEMPERATURA E SECAGEM DAS SEMENTES ATÉ DETERMINADO TEOR DE UMIDADE COM SECAGEM COMPLEMENTAR A 40 °C					
Temperatura (°C)	Teor de Umidade final à temperatura especificada e secagem complementar a 40 °C até 13,5% base seca				Médias
	30%	25%	20%	15%	
45	71,87 AB ab	71,33 B a	75,20 A a	71,80 AB a	72,55
50	71,22 A b	71,87 A a	71,80 A ab	66,96 B b	70,46
60	75,20 A a	73,74 A a	68,47 B bc	64,61 C b	70,50
70	69,51 A b	67,05 A b	66,45 A c	57,18 B c	65,05
Médias	72,35	70,15	70,48	65,14	67,13
DMS/coluna = 3,41 (letras minúsculas)			DMS/linha = 3,41 (letras maiúsculas)		

¹ Para cada característica avaliada, as médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Na Tabela 3.14 estão os valores médios da germinação de sementes de feijão “carioca” secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 25 % b.s. até os teores de umidade de 20 e 15 % b.s. e secagem complementar a 40 °C até o

teor de umidade de 13,5 % b.s. e na Tabela 3.15 encontra-se a análise de variância dos fatores onde se verifica que existem diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F, para os fatores temperatura e secagem das sementes secas à altas temperaturas até determinado teor de umidade e a interação desses fatores.

TABELA 3.14 Valores médios da **germinação** de sementes de feijão "carioca, secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 25% base seca até os teores de umidade de 20 e 15% e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % base seca.

GERMINAÇÃO DAS SEMENTES DE FEIJÃO SUBMETIDAS A DETERMINADAS CONDIÇÕES DE SECAGEM			
Temperatura (°C)	Teor de Umidade final à temperatura especificada e secagem complementar a 40 °C até 14% base seca		
	20%	15%	Medias
45	96,00	96,67	96,33
50	96,00	97,33	96,67
60	96,67	91,33	94,00
70	95,00	87,33	91,17
Medias	95,92	93,17	94,54

TABELA 3.15 Análise de variância da **germinação** de sementes de feijão "carioca, secas às diferentes temperaturas e condições de secagem - Teor de umidade inicial de 35 % base seca - Teor de umidade inicial de 25 % base seca

ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Temperatura	3	294,8255	98,2752	21,75 **
Umidade de secagem	1	98,4193	98,4193	21,79 **
Temperatura x Umidade	3	239,4869	79,8290	17,67 **
Resíduo	16	72,2839	4,5177	
Total	23	705,0156		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Na Tabela 3.16 verifica-se que, para o fator temperatura as secagens realizadas às temperaturas de 45 e 50 °C não diferem significativamente entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey. Aqui parece haver uma mudança de comportamento, pois nas Tabelas anteriores (3.8 e 3.12) as temperaturas que apresentavam a mesma diferença significativa estava entre as temperaturas de secagem de 50 e 60 °C, o que implica em dizer que durante o processo de secagem o teor de umidade inicial interfere na germinação das sementes. Fato semelhante também foi observado por AFONSO JÚNIOR (1996) que estudou a influência dos teores de umidade inicial de 37,3% , 25,5% e 17,1 % b.u. no processo de secagem de semen-

tes de feijão preto tendo concluído que as sementes com teor de umidade inicial de 17,1% base úmida foram as que apresentaram os melhores resultados de germinação, independentemente das temperaturas utilizadas.

Nesta tabela também verifica-se que, de uma maneira genérica, a secagem pode ser conduzida de um teor de umidade inicial de 25 % b.s. até 20 % b.s. sem que a germinação seja afetada significativamente. No entanto, se for conduzida até o teor de umidade de 15 % b.s. existirá uma perda significativa, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, de seu percentual de germinação.

Na Tabela 3.17, onde se analisa a interação entre os fatores, constata-se que para um teor de umidade inicial de 25 % b.s. a secagem pode ser realizada até o teor de umidade de 15 % b.s. às temperaturas de 45 e 50 °C, sem que a germinação seja afetada. Portanto, esta é outra constatação de que o teor de umidade inicial no processo de secagem é importante para definir a temperatura mais adequada a ser utilizada para que as sementes não sofram uma diminuição do seu poder germinativo.

TABELA 3.16 Valores médios de **germinação** de sementes de feijão para os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 25 % base seca.

MÉDIAS DOS FATORES TEMPERATURA E SECAGEM DAS SEMENTES ATÉ DETERMINADO TEOR DE UMIDADE COM SECAGEM COMPLEMENTAR A 40 °C			
TEMPERATURAS (°C)	Médias	Secagem a partir de 25 % até	Médias
45	74,4697 a	20%	73,7599 a
50	75,3093 a	15%	69,7098 b
60	70,6988 b		
70	66,4617 c		
	DMS= 3,5143		DMS= 1,8407

As médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Média Geral = 71,7349

Coefficiente de Variação- CV%= 2,9630

DMS - Desvio mínimo significativo

Assim pode-se concluir que, mesmo à temperatura de 45 °C, as sementes só podem ser secas de um teor de umidade inicial de 25% à 15 %, ou de 35% à 15%, ou ainda de, 45% à 20%, que a germinação dessas sementes não será afetada por essa temperatura de secagem.

Para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, consideradas elevadas, as secagens das sementes devem ser conduzidas, sem que haja perda significativa de germinação, de:

45 % até 30 % b.s.; ou de 35 % b.s. até 20 % b.s.; ou de 25 % b.s. até 15 % b.s. para 50 °C
 45 % até 30 % b.s.; ou de 35 % b.s. até 25 % b.s.; ou de 25 % b.s. até 20 % b.s. para 60 °C
 45 % até 35 % b.s.; ou de 35 % b.s. até 30 % b.s.; ou de 25 % b.s. até 20 % b.s. para 70 °C

A secagem complementar deve ser feita a temperaturas de 40 °C ou inferior até que atinjam o teor de umidade ideal para a armazenagem (13,5% b.s.).

TABELA 3.17 Valores médios da **germinação** de sementes de feijão “carioca”, para a interação entre os fatores temperaturas e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 25 % base seca¹

MÉDIAS DOS FATORES TEMPERATURA E SECAGEM DAS SEMENTES ATÉ DETERMINADO TEOR DE UMIDADE COM SECAGEM COMPLEMENTAR A 40 °C			
Temperatura (°C)	Teor de Umidade final à temperatura especificada e secagem complementar a 40 °C até 13,5% base seca		
	20%	15%	Médias
45	73,74 A a	75,20 A a	74,47
50	73,82 A a	76,79 A a	75,31
60	75,42 A a	65,98 B b	70,70
70	72,06 A a	60,87 B c	66,46
Médias	73,76	69,71	71,73
DMS/coluna = 4,97 (letras minúsculas)		DMS/linha = 3,68 (letras maiúsculas)	

¹ Para cada característica avaliada, as médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

4.3. Vigor das sementes em função das condições de secagem

Na Tabela 3.18 estão os valores médios do vigor das sementes de feijão “carioca” secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 45 % b.s. até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15 % b.s. e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s., e na Tabela 3.19 encontra-se a sua análise de variância onde verifica-se que existem diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F para os 2 fatores estudados e a sua interação.

TABELA 3.18 Valores médios do **vigor** de sementes de feijão “carioca, secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 45% b.s. até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15% e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.

VIGOR DAS SEMENTES DE FEIJÃO SUBMETIDAS A DETERMINADAS CONDIÇÕES DE SECAGEM							
Temperatura (°C)	Teor de Umidade final à temperatura especificada e secagem complementar a 40 °C até 13,5% base seca						Médias
	40%	35%	30%	25%	20%	15%	
45	92,00	92,00	92,33	92,67	89,67	87,67	91,06
50	90,00	91,00	90,33	89,67	86,67	79,67	87,89
60	90,00	89,67	87,33	80,33	79,33	75,00	83,61
70	90,67	90,00	81,00	71,00	60,33	52,00	74,17
Médias	90,67	90,67	87,75	83,42	79,00	73,58	84,18

TABELA 3.19 Análise de variância do vigor de sementes de feijão “carioca, secas às diferentes temperaturas e condições de secagem - Teor de umidade inicial de 45% b.s.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Temperatura	3	2622,0156	874,0052	721,11 **
Umidade de secagem	5	2699,3906	539,8781	445,43 **
Temperatura x Umidade	15	1333,9009	88,9267	73,37 **
Resíduo	48	58,1772	1,2120	
Total	71	6713,4844		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Os dados médios do vigor de sementes de feijão transformados em arco sen $\sqrt{P/100}$ (Tabela 3.19) foram analisados quanto aos fatores individuais temperaturas e secagem das sementes feitas do teor de umidade inicial de 45 % b.s. até os teores de umidade de 40, 35, 30, 25, 20 e 15 % b.s. e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s. Nessa tabela constata-se que existem diferenças significativas entre todas as temperaturas estudadas implicando em dizer que o vigor das sementes é afetado pelas temperaturas de secagem de 45 a 70 °C. A análise estatística, mostrada nesta tabela, também indica que a secagem, de uma maneira genérica, pode ser feita do teor de umidade inicial de 45 % b.s. até 35 % b.s. que o seu vigor não é afetado. A partir deste teor de umidade, se as sementes continuarem a ser secas às temperaturas de 45 a 70 °C, haverá perda significativa do seu vigor. Portanto, a condução restante da secagem deverá ser realizada com uma temperatura de 40 °C ou inferior.

TABELA 3.20 Valores médios do vigor de sementes de feijão para os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com suplementar secagem a 40 °C - Teor de umidade inicial de 45 % b.s.

VALORES MÉDIOS DO VIGOR DE SEMENTES DE FEIJÃO PARA OS FATORES TEMPERATURA E SECAGEM DAS SEMENTES ATÉ DETERMINADO TEOR DE UMIDADE COM SECAGEM COMPLEMENTAR A 40 °C			
TEMPERATURAS	Médias	Secagem a partir de 45 % até	Médias
45	65,7081 a	40%	65,1080 a
50	61,8335 b	35%	65,0858 a
60	57,2229 c	30%	61,7589 b
70	49,5007 d	25%	57,5917 c
		20%	53,3544 d
		15%	48,4991 e
	DMS = 0,9770		DMS = 1,3332

As médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Média Geral = 58,5663

Coefficiente de Variação- CV%= 1,8798

DMS - Desvio mínimo significativo

Na Tabela 3.21 está a análise da interação entre os dois fatores estudados para o vigor das sementes de feijão. Observa-se nesta tabela que para uma análise feita na linha as sementes podem ser secas às temperaturas de 45 e 50 °C, de um teor de umidade de 45 % b.s. até 25 %, b.s. sem que o seu vigor seja alterado significativamente. No entanto, para as temperaturas de 60 e 70 °C, a secagem só pode ser conduzida de 45 % b.s. até 35 % b.s. para que seu vigor não seja afetado.

Analisando-se os valores obtidos nas colunas da Tabela 3.21, constata-se que o vigor das sementes é afetado igualmente pela secagem, quando esta é conduzida a partir do teor de umidade de 45% b.s. até 35% b.s. para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C. As secagens feitas com todas as temperaturas estudadas afetam significativamente o vigor das sementes quando estas são secas a partir do teor de umidade inicial de 45 % b.s. até teores de umidade de 30 % b.s. ou abaixo.

TABELA 3.21 Valores médios do vigor de sementes de feijão “carioca”, para a interação entre os fatores temperaturas e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 45 % b.s.¹

MÉDIAS DO VIGOR DE SEMENTES DE FEIJÃO PARA A INTERAÇÃO ENTRE OS FATORES TEMPERATURA E SECAGEM DAS SEMENTES ATÉ DETERMINADO TEOR DE UMIDADE COM SECAGEM COMPLEMENTAR A 40 °C							
Temperatura (°C)	Teor de Umidade final à temperatura especificada e secagem complementar a 40 °C até 14% base seca						Médias
	40%	35%	30%	25%	20%	15%	
45	66,96 A a	66,93 A a	67,46 A a	67,93 A a	63,73 B a	61,25 C a	65,71
50	64,24 A b	65,53 A ab	64,61 A b	63,73 A b	60,08 B b	52,82 C b	61,83
60	64,18 A b	63,73 A b	60,87 B c	53,47 C c	52,50 C c	48,60 D c	57,22
70	65,06 A ab	64,16 A b	54,10 B d	45,24 C d	37,11 D d	31,34 E d	49,50
Médias	65,11	65,09	61,76	57,59	53,35	48,50	58,57
DMS/coluna = 2,39 (letras minúsculas)				DMS/linha = 2,67 (letras maiúsculas)			

¹ Para cada característica avaliada, as médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Da Tabela 3.21 é possível verificar que o vigor das sementes acompanham, de uma maneira geral, a tendência do que ocorreu com a germinação das sementes para estes processos de secagem e temperaturas utilizadas. Contudo apresenta uma severidade quanto aos valores a serem utilizados. Este fato é perfeitamente compreensível, uma vez que o teste de vigor pelo método da primeira contagem é também uma análise mais severa da germinação, já que o tempo de emergência das sementes a ser considerado é no quinto dia para vigor e nono para a germinação.

Na Tabela 3.22 encontram-se os valores médios do vigor das sementes de feijão, secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C, a partir de um teor de umidade inicial de 35% b.s. até os teores de umidade de 30, 25, 20 e 15% b.s. e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.. Na Tabela 3.23 está a análise de variância dos fatores estudados e de sua interação observando-se que existe efeito significativo, ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F, para o fator temperatura, fator secagem conduzida até determinado teor de umidade e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade final de 13,5 % b.s. e a interação desses fatores.

Analisando-se os fatores isoladamente na Tabela 3.24, verifica-se que existem diferenças significativas entre todas as temperatura estudadas e que a secagem conduzida à temperatura de 45 °C é que menos afeta o vigor das sementes. Nesta tabela também observa-se que, de uma maneira genérica, a secagem pode ser conduzida de um teor de umidade inicial de 35 % b.s. até 25 % b.s., sem que o vigor das sementes seja significativamente afetado. No entanto, quando se analisa a Tabela 3.25, que é a interação entre os fatores verifica-se que para a temperatura de 45 °C a secagem pode ser conduzida do teor de umidade inicial de 35 % b.s. até 15 % b.s. que o vigor das sementes não é afetado significativamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey, diferindo, no entanto, da secagem quando conduzida a partir do teor de umidade de 35 % até 20% b.s. para a temperatura de 50 °C, onde se observa que a esta temperatura a secagem só pode ser conduzida do teor de umidade de 35 % b.s. até o teor de umidade de 20 % b.s., para que o vigor das sementes não seja afetado. Para as temperaturas de 60 e 70 °C a secagem das sementes deve ser feita do teor de umidade inicial de 35 % b.s. até os teores de 25% e 30 % b.s., respectivamente.

TABELA 3.22 Valores médios do **vigor** de sementes de feijão “carioca”, secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 35% b.s. até os teores de umidade de 30, 25, 20 e 15% b.s. e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.

VIGOR DAS SEMENTES DE FEIJÃO SUBMETIDAS A DETERMINADAS CONDIÇÕES DE SECAGEM					
Temperatura (°C)	Teor de Umidade final à temperatura especificada e secagem complementar a 40 °C até 13,5% base seca				Médias
	30%	25%	20%	15%	
45	91,67	91,00	90,33	90,33	90,83
50	90,67	90,33	90,33	87,00	89,58
60	90,33	90,67	86,67	84,67	88,08
70	90,00	87,33	81,33	76,00	83,67
Médias	90,67	89,83	87,17	84,50	88,04

TABELA 3.23 Análise de variância do **vigor** de sementes de feijão “carioca, secas às diferentes temperaturas e condições de secagem - Teor de umidade inicial de 35 % b.s.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Temperatura	3	438,5417	146,1806	107,47 **
Umidade de secagem	3	358,0000	119,3333	87,73 **
Temperatura x Umidade	9	189,0417	21,0046	15,44 **
Resíduo	32	47,6563	1,4893	
Total	47	1029,1094		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 3.24 Valores médios do vigor de sementes de feijão para os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com suplementar secagem a 40 °C - Teor de umidade inicial de 35 % base seca.

VALORES MÉDIOS DE VIGOR DAS SEMENTES DE FEIJÃO PARA OS FATORES TEMPERATURA E SECAGEM DAS SEMENTES ATÉ DETERMINADO TEOR DE UMIDADE COM SECAGEM COMPLEMENTAR A 40 °C			
TEMPERATURAS (°C)	Médias	Secagem a partir de 35 % até	Médias
45	65,3125 a	30%	65,0818 a
50	63,6856 b	25%	64,0149 a
60	61,9107 c	20%	60,9378 b
70	57,2318 d	15%	58,1061 c
	DMS= 1,2886		DMS= 1,2886

As médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Média Geral = 62,0352

Coefficiente de Variação- CV%= 1,8800

DMS - Desvio mínimo significativo

TABELA 3.25 Valores médios do vigor de sementes de feijão "carioca", para a interação entre os fatores temperaturas e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 35 % base seca¹

MÉDIAS DO VIGOR DAS SEMENTES DE FEIJÃO PARA A INTERAÇÃO ENTRE OS FATORES TEMPERATURA E SECAGEM DAS SEMENTES ATÉ DETERMINADO TEOR DE UMIDADE COM SECAGEM COMPLEMENTAR A 40 °C					
Temperatura (°C)	Teor de Umidade final à temperatura especificada e secagem complementar a 40 °C até 13,5% base seca				Médias
	30%	25%	20%	15%	
45	66,51 A a	65,53 A a	64,61 A a	64,61 A a	65,31
50	65,06 A a	64,61 A a	64,61 A a	60,47 B b	63,69
60	64,61 A a	65,06 A a	60,10 B b	57,88 C c	61,91
70	64,16 A a	60,87 B b	54,43 C c	49,47 D d	57,23
Médias	65,08	64,01	60,94	58,11	62,04
DMS/coluna = 2,58 (letras minúsculas)			DMS/linha = 2,58 (letras maiúsculas)		

¹ Para cada característica avaliada, as médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Da Tabela 25 também observa-se que o teor de umidade inicial das sementes é importante para definir sua qualidade dentro do processo de secagem, pois verifica-se nesta tabela que pode-se secar sementes de feijão a temperatura de 45 °C, a partir do teor de umidade de 35 % b.s. até 15 % b.s. sem que o vigor das sementes seja afetado, contudo a análise da Tabela 3.21 mostra que se o teor de umidade inicial for de 45 % b.s., para esta mesma temperatura, a secagem só poderá ser realizada até o teor de umidade de 25 % b.s. para que não haja diminui-

ção do vigor das sementes. Este fato evidencia o relatado por CARVALHO e NAKAGAWA (1988) e CAVALCANTI MATA e OLIVEIRA (1989), que mencionam que o teor de umidade inicial é um dos fatores que devem ser levados em consideração no processo de secagem de sementes.

Na Tabela 3.26 estão os valores médios do vigor das sementes de feijão “carioca” secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 25 % b.s. até os teores de umidade de 20 e 15 % b.s. e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s. e na Tabela 3.27 encontra-se a análise de variância dos fatores onde se verifica que existem diferenças significativas, ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F, para os fatores temperatura e secagem das sementes secas a altas temperaturas até determinado teor de umidade e a interação desses fatores.

TABELA 3.26 Valores médios do vigor de sementes de feijão “carioca, secas às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C a partir de um teor de umidade inicial de 25% base seca até os teores de umidade de 20 e 15% e secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % base seca

VIGOR DE SEMENTES DE FEIJÃO SUBMETIDAS A DETERMINADAS CONDIÇÕES DE SECAGEM			
Temperatura (°C)	Teor de Umidade final à temperatura especificada e secagem complementar a 40 °C até 14% base seca		
	20%	15%	Medias
45	91,67	92,33	92,00
50	91,67	90,67	91,17
60	90,67	86,67	88,67
70	90,33	80,00	85,17
Medias	91,08	87,42	89,25

TABELA 3.27 Análise de variância do vigor de sementes de feijão “carioca, secas às diferentes temperaturas e condições de secagem - Teor de umidade inicial de 25 % base seca.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Temperatura	3	235,5495	78,5165	42,88 **
Umidade de secagem	1	106,7266	106,7266	58,29 **
Temperatura x Umidade	3	130,8568	43,6189	23,82 **
Resíduo	16	29,2969	1,8311	
Total	23	502,4297		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Na Tabela 3.28, verifica-se que para o fator temperatura, não existem diferenças significativas para as secagens realizadas às temperaturas de 45 e 50 °C. Verifica-se também que, de uma maneira genérica, a secagem pode ser conduzida de um teor de umidade inicial de 25 % b.s. até 20 % b.s. sem que a germinação seja afetada significativamente. No entanto, se for conduzida até o teor de umidade de 15 % b.s. existirá uma perda significativa, ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Ao se analisar a interação entre os fatores, Tabela 3.29, é possível dizer que às temperaturas de 45 e 50 °C as secagens podem ser feitas do teor de umidade inicial de 25 % b.s. até o teor de umidade de 15 % b.s., sem que o vigor das sementes possa ser afetado e para as temperaturas de 60 e 70 °C a condução da secagem só pode ser feita do teor de umidade inicial de 25 % b.s. até o teor de umidade de 15 % b.s..

Como já relatado anteriormente, o teor de umidade inicial no processo de secagem é importante para definir a temperatura mais adequada a ser utilizada, para que as sementes não sofram uma diminuição do seu vigor. Assim, de acordo com as Tabelas 3.18 a 3.29 pode-se afirmar que, mesmo à temperatura de 45 °C, que não é considerada uma temperatura alta de secagem, as sementes só podem ser secas de um teor de umidade inicial de 25% até 15 %, ou de 35% até 15%, ou ainda de, 45% até 25%, para que o vigor dessas sementes não sejam afetados pela ação da temperatura de secagem.

Para que não haja perda do vigor das sementes de feijão, às secagens as temperaturas de 50, 60 e 70 °C devem ser realizadas de:

45 % até 25 % b.s.; ou de 35 % b.s. até 20 % b.s.; ou de 25 % b.s. até 15 % b.s. para 50 °C
 45 % até 35 % b.s.; ou de 35 % b.s. até 25 % b.s.; ou de 25 % b.s. até 20 % b.s. para 60 °C
 45 % até 35 % b.s.; ou de 35 % b.s. até 30 % b.s.; ou de 25 % b.s. até 20 % b.s. para 70 °C

A secagem complementar deve ser feita à temperaturas de 40 °C ou inferior, até que atinjam o teor de umidade ideal para a armazenagem de 13,5% b.s..

TABELA 3.28 Valores médios do vigor de sementes de feijão para os fatores temperatura e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 25 % base seca.

VALORES MÉDIOS DE VIGOR DAS SEMENTES DE FEIJÃO PARA OS FATORES TEMPERATURA E SECAGEM DAS SEMENTES ATÉ DETERMINADO TEOR DE UMIDADE COM SECAGEM COMPLEMENTAR A 40 °C			
TEMPERATURAS (°C)	Médias	Secagem a partir de 25 % até	Médias
45	66,9675 a	20%	65,6554 a
50	65,7542 a	15%	61,4368 b
60	62,5801 b		
70	58,8827 c		
	DMS= 2,2373		DMS= 1,1719

As médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Média Geral = 63,5461

Coefficiente de Variação- CV%= 2,129

DMS - Desvio mínimo significativo

TABELA 3.29 Valores médios do vigor de sementes de feijão “carioca”, para a interação entre os fatores temperaturas e secagem das sementes até determinado teor de umidade com secagem complementar a 40 °C - Teor de umidade inicial de 25 % base seca¹

MÉDIAS DO VIGOR DAS SEMENTES DE FEIJÃO PARA A INTERAÇÃO ENTRE OS FATORES TEMPERATURA E SECAGEM DAS SEMENTES ATÉ DETERMINADO TEOR DE UMIDADE COM SECAGEM COMPLEMENTAR A 40 °C					
Temperatura (°C)	Teor de Umidade final à temperatura especificada e secagem complementar a 40 °C até 13,5% base seca				
	20%		15%		Médias
45	66,51	A a	67,43	A a	66,97
50	66,45	A a	65,06	A a	65,75
60	65,06	A a	60,10	B b	62,58
70	64,61	A a	53,16	B c	58,88
Médias	65,66		61,44		63,55
DMS/coluna = 3,16 (letras minúsculas)			DMS/linha = 2,34 (letras maiúsculas)		

¹ Para cada característica avaliada, as médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

4.4. Germinação e vigor em função do tempo de residência

Os resultados da germinação e vigor das sementes de feijão, quando submetidas aos diferentes processos de secagem e o tempo de residência dessas sementes no secador a altas temperaturas, são mostrados na Tabela. 3.30.

A Figura 3.7 contém uma representação gráfica do tempo de residência das sementes submetidas a secagem à altas temperaturas a partir do teor de umidade inicial de 45% b.s. até os teores de 40, 35, 30, 25, 20 e 15 %. No mesmo gráfico está o tempo de residência das sementes secas a altas temperaturas a partir do teor de umidade inicial de 35 % b.s. até os teores de umidades de 30, 25, 20 e 15 % b.s. e também a secagem a partir do teor de umidade inicial de 25 % b.s. até 20 e 15 % b.s..

Para que fosse possível estabelecer uma correlação da germinação e vigor das sementes com os fatores temperaturas, processo de secagem, teor de umidade inicial e tempo de residência, necessitou-se estabelecer primeiramente uma relação entre o tempo de residência com a temperatura e o processo de secagem.

Como a secagem das sementes de feijão foram conduzidas de um determinado teor de umidade inicial (45, 35 e 25 % b.s.) até um teor de umidade específico (variável de acordo com o teor de umidade inicial) a altas temperaturas, procurou-se diferenciar os processos de secagem, estabelecendo-se uma equação que pudesse representar este processo. Desta forma, estabeleceu-se um fator denominado “fator de umidade” que é dado pela seguinte equação:

$$FU = \frac{U_i - U_{fa}}{U_i} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

em que

FU = Fator de umidade, adimensional

U_i = Teor de umidade inicial no processo de secagem, % b.s.

U_{fa} = Teor de umidade final do processo de secagem a altas temperaturas, % b.s.

A correlação do tempo de residência com a temperatura de secagem e o fator de umidade está representada na Figura 3.8 em forma de superfície de resposta, com um coeficiente de determinação de 93,61% .

Com a determinação do tempo de residência estabeleceu-se uma correlação entre a germinação, tempo de residência e fator de secagem.

O fator de secagem (FS) foi definido à semelhança do fator de umidade, necessário para diferenciar os processos de secagem a determinadas temperaturas. Assim, a equação estabelecida para este fim foi:

$$FS = \left(\frac{U_i - U_{fa}}{U_i} \right) \cdot T \tag{Eq. 3.2}$$

Na Figura 3.9 e 3.10 está uma representação gráfica da variação do percentual de germinação e do vigor, respectivamente, das sementes de feijão em função do fator de secagem e do tempo de residência dessas sementes expostas à secagem a altas temperaturas. A equação que representa esta correlação é uma equação polinomial de segundo grau, sendo encontrado um coeficiente de determinação de 80,0 % para a germinação e 90,0 % para o vigor, que não são coeficientes altos. No entanto, aceitável se for considerado o número de variáveis e o comportamento dessas variáveis.

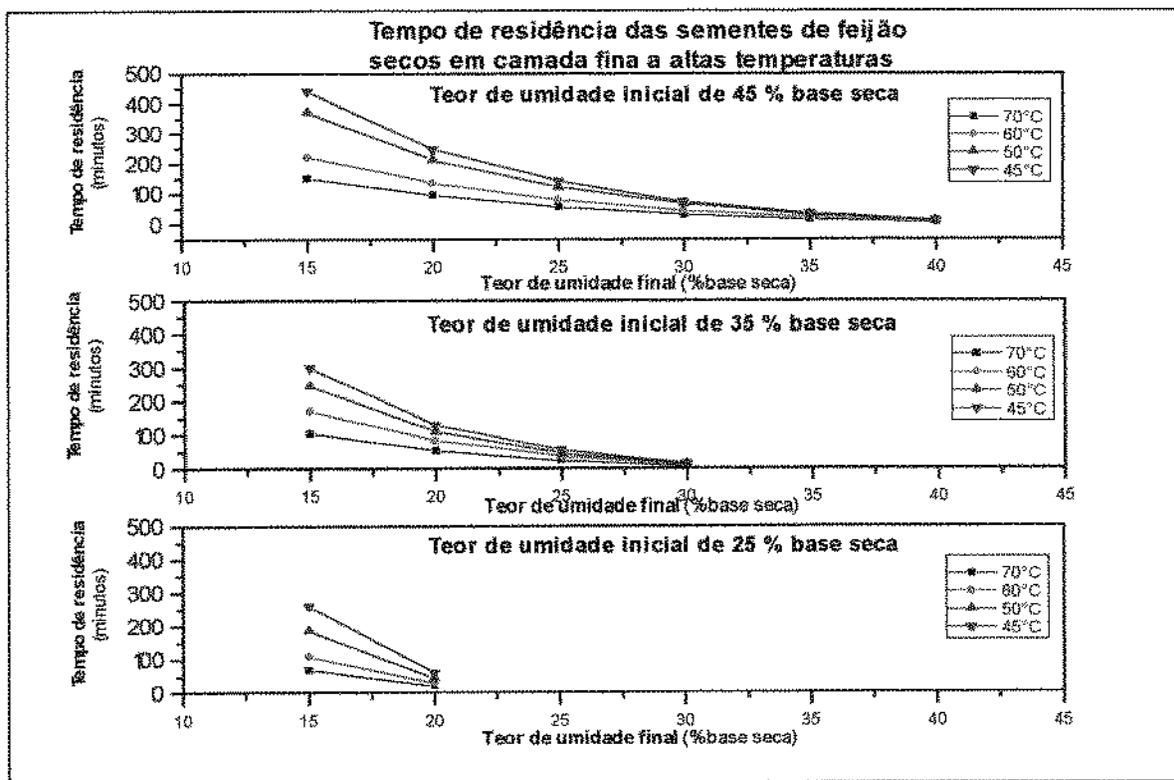


FIGURA 3.7 - Tempo de residência das sementes de feijão secas em camada fina a altas temperaturas por curtos períodos de tempo e secagem complementar a 40 °C até 13,5 % b.s.

TABELA 3.30 Germinação das sementes de feijão "carioca" em função do tempo de residência das sementes no secador e das condições de secagem.

Condições de secagem				Tempo de residência no secador (min.)	germinação	vigor
Temperatura (°C)	Secagem	Temperatura (°C)	Secagem complementar			
70	45%b.s. até 40% b.s.	40	40%b.s. até 13,5% b.s.	5	97,00	90,67
	45%b.s. até 35% b.s.		35%b.s. até 13,5% b.s.	15	96,00	90,00
	45%b.s. até 30% b.s.		30%b.s. até 13,5% b.s.	30	84,00	81,00
	45%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	55	76,00	71,00
	45%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	95	74,33	60,33
	45%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	150	70,00	52,00
60	45%b.s. até 40% b.s.	40	40%b.s. até 13,5% b.s.	6	96,00	90,00
	45%b.s. até 35% b.s.		35%b.s. até 13,5% b.s.	20	95,33	89,67
	45%b.s. até 30% b.s.		30%b.s. até 13,5% b.s.	41	97,00	87,33
	45%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	78	88,00	80,33
	45%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	135	92,00	79,33
	45%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	220	86,00	75,00
50	45%b.s. até 40% b.s.	40	40%b.s. até 13,5% b.s.	9	96,00	90,00
	45%b.s. até 35% b.s.		35%b.s. até 13,5% b.s.	28	97,00	91,00
	45%b.s. até 30% b.s.		30%b.s. até 13,5% b.s.	65	96,00	90,33
	45%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	120	92,00	89,67
	45%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	210	90,00	86,67
	45%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	370	86,00	79,67
45	45%b.s. até 40% b.s.	40	40%b.s. até 13,5% b.s.	10	95,33	92,00
	45%b.s. até 35% b.s.		35%b.s. até 13,5% b.s.	32	96,00	92,00
	45%b.s. até 30% b.s.		30%b.s. até 13,5% b.s.	72	97,00	92,33
	45%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	140	95,00	92,67
	45%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	245	95,67	89,67
	45%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	440	93,67	87,67
70	35%b.s. até 30% b.s.	40	30%b.s. até 13,5% b.s.	7,5	93,67	90,00
	35%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	25	92,00	87,33
	35%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	54	91,67	81,33
	35%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	105	84,00	76,00
60	35%b.s. até 30% b.s.	40	30%b.s. até 13,5% b.s.	11	96,67	90,33
	35%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	37	96,00	90,67
	35%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	83	93,00	86,67
	35%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	170	90,33	84,67
50	35%b.s. até 30% b.s.	40	30%b.s. até 13,5% b.s.	13	94,67	90,67
	35%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	45	95,00	90,33
	35%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	40	95,00	90,33
	35%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	245	92,00	87,00
45	35%b.s. até 30% b.s.	40	30%b.s. até 13,5% b.s.	15	95,00	91,67
	35%b.s. até 25% b.s.		25%b.s. até 13,5% b.s.	55	94,67	91,00
	35%b.s. até 20% b.s.		20%b.s. até 13,5% b.s.	130	96,67	90,33
	35%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	300	95,00	90,33
70	25%b.s. até 20% b.s.	40	20%b.s. até 13,5% b.s.	20	95,00	90,33
	25%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	69	87,33	80,00
60	25%b.s. até 20% b.s.	40	20%b.s. até 13,5% b.s.	28	96,67	90,67
	25%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	108	91,33	86,67
50	25%b.s. até 20% b.s.	40	20%b.s. até 13,5% b.s.	43	96,00	91,67
	25%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	185	97,33	90,67
45	25%b.s. até 20% b.s.	40	20%b.s. até 13,5% b.s.	60	96,00	91,67
	25%b.s. até 15% b.s.		15%b.s. até 13,5% b.s.	260	96,67	92,33

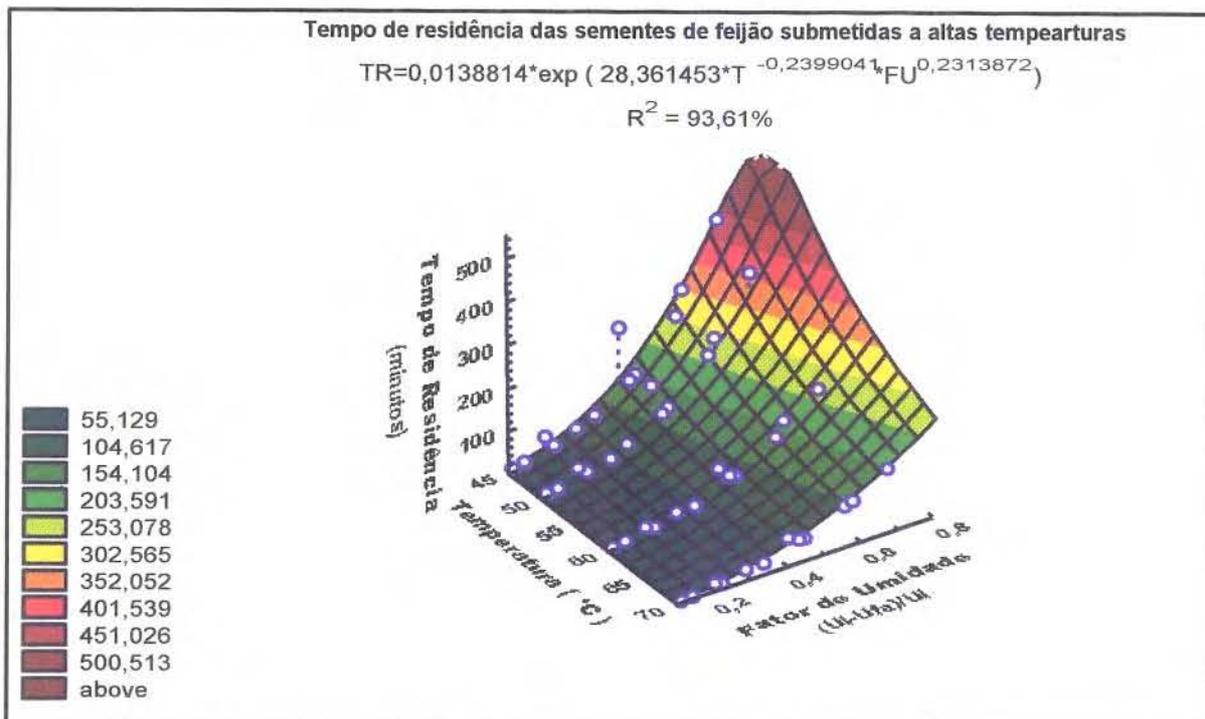


FIGURA 3.8 - Tempo de residência das sementes de feijão, secas a altas temperaturas em camada fina, por curtos períodos de tempo, correlacionada com a temperatura de secagem e o fator de umidade.

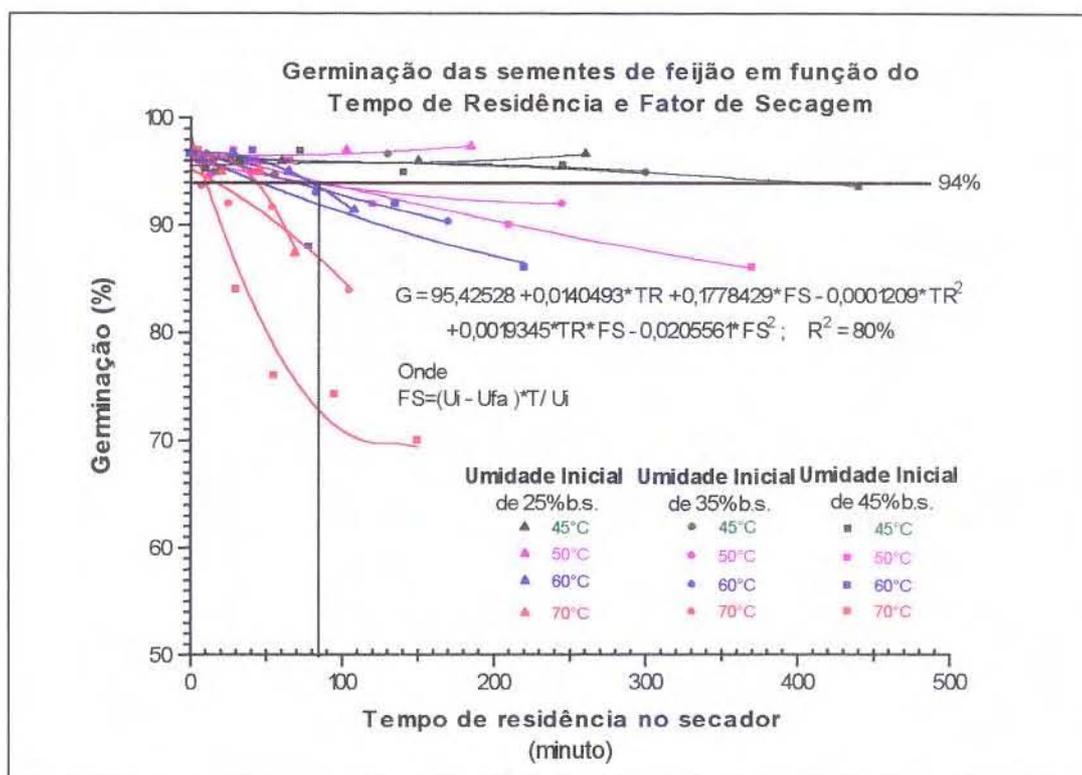


FIGURA 3.9 - Germinação das sementes de feijão, secas a altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada fina, correlacionada com o tempo de residência e o fator de secagem.

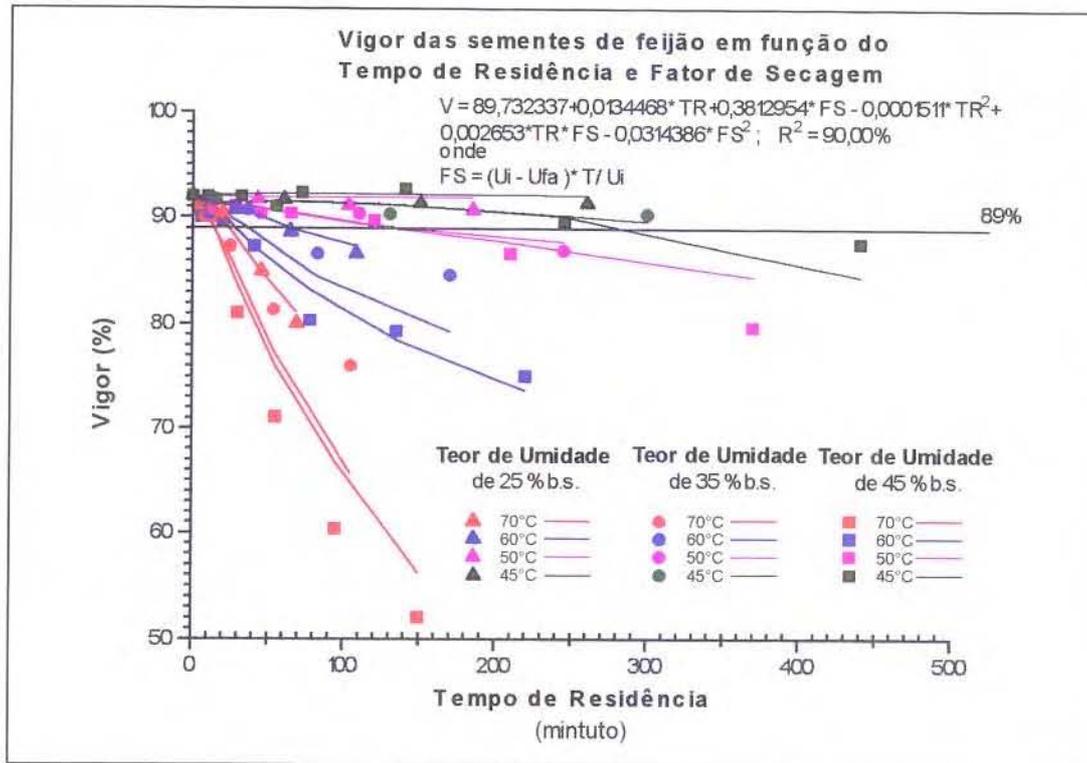


FIGURA 3.10 - Vigor das sementes de feijão, secas a altas temperaturas por curtos períodos de tempo em camada fina, correlacionada com o tempo de residência e o fator de secagem.

A germinação das sementes sempre é um parâmetro difícil de se correlacionar matematicamente por se tratar de um produto biológico e por ser extremamente sensível à ação de muitos fatores. Entre esses fatores está a quebra de dormência das sementes que pode estar envolvida no processo de secagem e os modelos dificilmente permitem prevê-la. Contudo, nas Figuras 3.9 e 3.10, é possível observar através da linha de 94 % para germinação e 89 % para o vigor, quais são as condições em que as sementes não são afetadas pela ação da temperatura. Assim, pode-se concluir que os tempos de residência onde as sementes estão acima do valor de 94% para germinação e 89% para vigor, são os tempos em que as sementes podem ser secas a altas temperaturas, sem que sejam afetadas pela ação da temperatura. Os valores anteriormente mencionados foram baseados nas diferenças mínimas significativas médias determinadas nos quadros de análise estatística.

Para dar uma conotação prática aos dados obtidos, foram extraídos das Figuras 3.9 e 3.10 os tempos que as sementes podem ser secas a altas temperaturas, sem que sejam afetadas na sua qualidade fisiológica e, na Tabela 3.31, encontram-se esses valores. Verifica-se nesta tabela, que se o teor de umidade inicial não for superior a 25 % b.s., pode-se secar as sementes de feijão às temperaturas de 45 °C e 50 °C, que sua germinação e vigor não serão afetados. Para a temperatura de 45 °C, o teor de umidade inicial pode ser também de 35 % b.s. No entanto, se for utilizado o teor de umidade inicial de 45 % b.s. a secagem não poderá ser conduzida até o final sem que as sementes sejam afetadas na sua qualidade fisiológica. O tempo máximo a ser utilizado para que as sementes não sejam afetadas pela ação da temperatura de 45 °C é de 410 minutos para a germinação e 280 minutos para o vigor, se for considerada a curva da equação genérica, e 360 minutos se for considerada a curva de regressão individual.

TABELA 3.31 Tempo de residência que as sementes de feijão podem ficar expostas a altas temperaturas, sem que a sua germinação e vigor sejam significativamente afetados, e correspondente teor de umidade inicial e final das sementes

Teor de umidade Inicial (°C)	Temperatura (°C)	germinação Inicial de 96 %	vigor inicial de 92%	Tempo de residência no secador sem que a germinação e vigor sejam significativamente afetados (minuto)		Teor de umidade Inicial e final correspondente ao tempo de residência (% b.s.)	
				germinação	vigor	germinação	vigor
25	45	94	89	TS	TS	TS	TS
	50	94	89	TS	TS	TS	TS
	60	94	89	80	70	25 - 16,3	25 - 17,0
	70	94	89	42	25	25 - 17,3	25 - 19,5
35	45	94	89	TS	TS	TS	TS
	50	94	89	80	60	35 - 21,5	35 - 23,5
	60	94	89	70	40	35 - 21,5	35 - 24,5
	70	94	89	15	15	35 - 27,5	35 - 27,5
45	45	94	89	410	280	45 - 15,7	45 - 19,0
	50	94	89	87	130	45 - 28,8	45 - 24,5
	60	94	89	45	30	45 - 30,0	45 - 32,5
	70	94	89	10	10	45 - 37,5	45 - 37,5

TS - Toda a secagem pode ser feita sem que a qualidade das sementes de feijão seja afetada

Portanto, a partir dos resultados deste trabalho é possível contradizer algumas regras já consagradas na literatura onde afirma-se que a temperatura de secagem de 45 °C não afeta a qualidade das sementes. Pode-se, enunciar, desta forma, que isto seja verdade desde que os teores de umidade inicial das sementes de feijão "carioca" sejam iguais ou inferiores a 35% b.s. e que se o teor de umidade inicial das sementes forem igual ou superior a 45 % b.s., a temperatura de 45 °C afetará a qualidade fisiológica das sementes, e para que isto não ocorra, o tempo máximo de secagem, a esta temperatura, deve ser de aproximadamente de 360 minutos ou 6 horas.

Pode-se afirmar também que a secagem pode ser feita a temperaturas mais elevadas de 50, 60 e 70 °C, desde que sejam observados os tempos de residência em que as sementes podem ser secas a estas temperaturas. A secagem a 70 °C pode ser feita a partir do teor de umidade inicial de 25 % b.s. até 17,3 % b.s. que corresponde a 42 minutos de secagem, que a germinação das sementes não será afetada e por 25 minutos que o vigor das sementes não será afetado. Para o teor de umidade inicial de 35 % e 45% b.s., o tempo para que a qualidade fisiológica das sementes de feijão não sejam afetada é de 15 e 10 minutos, respectivamente. Embora este tempo de secagem pareça ser curto, é um tempo suficiente para reduzir o teor de umidade inicial das sementes de 35% b.s. para 27,5% b.s. e de 45% b.s. para o teor de 37,5% b.s., respectivamente, podendo ser importante nas inovações tecnológicas a serem adotadas na secagem de sementes, já que nesta etapa a redução da umidade das sementes se dá rapidamente e em tempo curto, podendo-se inibir a deterioração das sementes nos primeiros minutos.

Ao analisar-se a secagem das sementes de feijão à temperatura de 60 °C pode-se considerar que para o teor de umidade inicial de 25 % b.s. as sementes podem ser secas por 70 minutos que a qualidade fisiológica das sementes não será alterada e neste período de secagem o

teor de umidade é reduzido para 17 % b.s.. A partir deste período, a secagem deve ser feita a uma temperatura de 40 °C ou inferior, até o teor de umidade ideal para a armazenagem das sementes que é de 13,5 % b.s.. Para o teor de umidade inicial de 35% b.s. a secagem das sementes pode ser conduzida por 70 minutos à temperatura de 60 °C que a germinação não é afetada e por 40 minutos que o seu vigor não é afetado. A esta temperatura e teor de umidade inicial de 35% b.s. retira-se 15,5 pontos percentuais que corresponde a uma quantidade de água razoável permitindo às sementes uma maior estabilidade, já que a atividade de água no interior do produto é diminuída significativamente em menos de uma hora de secagem. As sementes de feijão com um teor de umidade inicial de 45 % b.s. podem ser secas por 30 minutos, correspondendo a uma perda de umidade de 12,5 pontos percentuais, inferiores aos mencionados anteriormente o que caracteriza a influência do teor de umidade inicial associado à temperatura. Contudo são dados bastante importantes para melhoria dos processos de secagem de sementes.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos neste estudo sobre secagem de sementes de feijão “carioca” a altas temperaturas por curtos períodos de tempo, e seus efeitos na qualidade fisiológica das sementes pode-se concluir que:

- A secagem das sementes de feijão pode ser realizada a altas temperaturas, desde que os tempos de residência no secador sejam obedecidos para cada temperatura e teor de umidade inicial.
- À temperatura de 45 °C e teor de umidade inicial das sementes de 35 e 25 % b.s., a secagem pode ser realizada até o teor de umidade final de armazenagem que as sementes não serão afetadas na sua qualidade fisiológica. Para o teor de umidade inicial de 45 % b.s., o tempo de residência no secador, para que a qualidade fisiológica das sementes não seja afetada, é de 360 minutos, o que corresponde a uma secagem até o teor de umidade de 17% b.s. O restante da secagem deve ser feito a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s.
- À temperatura de 50 °C e teor de umidade inicial das sementes de 25 % b.s. a secagem pode ser realizada até o teor de umidade final de armazenagem que as sementes não serão afetadas na sua qualidade fisiológica. Para os teores de umidade inicial de 45 e 35% b.s., os tempos de residência no secador, para que a qualidade fisiológica das sementes não seja afetada, são de 87 e 60 minutos o que corresponde a uma secagem de 45% até 21,5% b.s. e de 35% até o teor de umidade de 28,8% b.s., respectivamente.
- À temperatura de 60 °C a secagem das sementes pode ser realizada a partir dos teores de umidade inicial de 25, 35 e 45% b.s. até o teores de umidade final de 17, 24,5 e 32,5% b.s., respectivamente, que as sementes não serão afetadas na sua qualidade fisiológica. Estas secagens correspondem, respectivamente, a um tempo de residência no secador de 70, 40 e 30 minutos.
- À temperatura de 70 °C a secagem das sementes pode ser realizada a partir dos teores de umidade inicial de 25, 35 e 45% b.s. até o teores de umidade final de 19,5, 27,5 e 37,5% b.s., respectivamente, que as sementes não serão afetadas na sua qualidade fisiológica. Estas secagens correspondem, respectivamente, a um tempo de residência no secador de 25, 15 e 10 minutos.

- As equações que representam os danos fisiológicos (germinação e vigor) causados às sementes de feijão “carioca” quando secas em camada fina às temperaturas de 45, 50, 60 e 70 °C, partindo-se dos teores de umidade inicial de 45, 35 e 25 % base seca, até os teores de umidade final de 40, 35, 30, 25, 20 e 15 % base seca; 30, 25, 20 e 15%, base seca; 20 e 15% base seca, respectivamente, com secagem complementar a 40 °C até 13,5 %, base seca, são dadas por:

$$G = 95,42528 + 0,0140493.(TR) + 0,1778429.(FS) + 0,0019345.(TR).(FS) \\ - 0,0001209.(TR)^2 - 0,0205561.(FS)^2$$

$$V = 89,732337 + 0,0134468.(TR) + 0,3812954.(FS) + 0,002653.(TR).(FS) \\ - 0,0001511.(TR)^2 - 0,0314386.(FS)^2$$

Capítulo 4

*Simulação e secagem de sementes de feijão em secador
de leito fixo*

1. INTRODUÇÃO

A secagem além de representar um custo em torno de 12% da energia total gasta nos sistemas de beneficiamento pós-colheita, é um processo de fundamental importância, pois prepara o produto para a armazenagem. Este processo exerce uma forte influência na manutenção da qualidade do produto durante o período de conservação, pois o baixo teor de umidade diminui a atividade físico-química deste produto e inibe as atividades microbianas associadas. (CAVALCANTI MATA *et alii*, 1995).

O aumento de eficiência na operação de colheita tem estimulado práticas de secamento mais rápidas. Isto conduz à adoção de temperaturas de secagem e vazões de ar mais elevadas e camadas mais espessas de sementes e grãos. Estas mudanças trazem consigo a necessidade de desenvolvimento de expressões que melhor descrevam o processo de secagem (VAN REST e ISAACS, 1968).

No Capítulo 1 deste trabalho foram determinadas as propriedades físicas das sementes de feijão necessárias para a simulação do processo de secagem. No Capítulo 2 foi estudada a secagem das sementes em camada delgada, levando-se em consideração a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, além do teor de umidade inicial das sementes, caracterizando assim, as curvas que definem a secagem das sementes de feijão e as equações que melhor caracterizam esse fenômeno de transferência de calor e massa. No Capítulo 3 foi estudado, para algumas dessas curvas, o efeito das temperaturas, consideradas altas, e do teor de umidade inicial na secagem das sementes, onde procurou-se identificar até que ponto as sementes poderiam ser secas a altas temperaturas sem que fossem afetadas na sua qualidade fisiológica.

Como o processo de secagem em nível comercial não é feito em camada delgada, mas sim em camada espessa, neste Capítulo, ênfase será dada à secagem das sementes de feijão em camada espessa e a sua simulação, levando-se em consideração o estudado nos Capítulos anteriores.

A secagem de sementes em camada espessa mais utilizada no Brasil é feita em secadores de leito fixo e esta secagem pode ser considerada como uma secagem sucessiva de camadas delgadas. Neste caso, as condições do ar de secagem que saem da primeira camada são as condições de entrada da segunda camada, e assim sucessivamente. Portanto, na secagem em camada espessa existe a formação de um gradiente de temperatura (energia) e umidade (massa).

No processo de secagem, quando as sementes estão sendo secas a determinada temperatura, isto não significa que estas estão sendo secas a esta mesma temperatura ao longo do secador, pois, em cada camada, parte da energia proveniente do ar de secagem é adquirida pelas sementes e outra parte é utilizada para evaporar a água das sementes. Assim, neste processo de secagem em camada espessa, com o decorrer do tempo a temperatura das sementes vai se aproximando da temperatura do ar de secagem, principalmente nas camadas inferiores do secador, necessitando avaliar, nas camadas, qual foi o tempo que essas sementes ficaram expostas a determinada temperatura considerada elevada. Isto é possível de ser feito estratificando a camada do secador em múltiplas camadas e correlacionado, para cada camada, o tempo em que essas sementes ficaram no secador a determinada temperatura, com a previsão de perda de germinação e vigor determinada no Capítulo 3. Desta forma, é possível prever a per-

da da qualidade fisiológica das sementes quando secas a altas temperaturas em camada espessa e determinar o tempo em que essas sementes podem ser secas a altas temperaturas sem que a qualidade fisiológica seja afetada.

Para tornar possível o que foi anteriormente descrito, a simulação pode ser uma ferramenta poderosa, pois muitos gastos com a experimentação podem ser poupados. Assim, fazendo-se alguns testes experimentais para validação de um modelo é possível, numa etapa posterior, realizar diversas simulações de modo a prever, na secagem em camada espessa, quais são as melhores condições de operação deste secador.

1.1. Considerações sobre a simulação de secagem

A secagem é um processo que precisa ser previsto, dimensionado e planejado. Neste contexto deve ser útil para qualquer engenheiro projetista, pesquisador ou administrador a utilização de um programa computacional que permita simular este processo de secagem de modo a prever, sob as condições próprias de uma região, o melhor tipo de secador e as condições específicas de secagem, além do tempo necessário para este fim (BROOKER *et alii*, 1992).

A simulação é um processo de condução de experimentos em um modelo de sistema, em vez de experimentação direta com o próprio sistema. Basicamente, um modelo matemático deve ser de fácil manipulação, representativo na faixa total de aplicações que ele possa ter, e de complexidade suficiente, para que possa representar precisamente o processo em estudo.

Na década de 70, era comum utilizar um computador IBM de grande porte para resolver problemas complicados que exigissem operações matemáticas complexas ou grande volumes de operações simples, só que a utilização desses computadores praticamente estava restrita às Universidades e ou aos Institutos de Pesquisa (CAVALCANTI MATA, 1996).

Com a evolução da informática na década de 80 e a migração de grande parte da tecnologia dos grandes computadores para os computadores pessoais, atualmente é possível executar um grande volume de operações nos chamados microcomputadores pessoais e até mesmo em microcomputadores portáteis como os denominados “note books”.

Desta forma, só no final da década de 80 e início da de 90 foi possível desenvolver programas computacionais que pudessem estar ao alcance de qualquer engenheiro projetista ou estudante universitário. Assim, a partir deste período, a simulação de processos mediante programas específicos foram tomando cada vez mais vulto, de modo que atualmente se constitui numa das maiores fontes econômicas de um país.

Normalmente os programas desenvolvidos para simular a secagem de grãos e sementes têm utilizado parâmetros genéricos, no entanto é necessário levar em consideração que equações impróprias só podem estimar grosseiramente o que acontece com um produto. NASCIMENTO *et alii* (1991) verificaram este fato ao comparar a simulação de secagem de milho feita com o modelo de Thompson, utilizando as equações descritas por QUEIROZ *et alii* (1982), com a simulação de secagem do milho irrigado variedade maia anão. Os pesquisadores concluíram que os parâmetros utilizados apresentam diferenças significativas entre os dados experimentais e os simulados.

Embora a simulação de secagem de grãos e sementes tenha sido estudada para vários produtos pouco se conhece sobre a simulação de secagem com feijão pois, além de sua produção ser de menor volume no mundo ele representa um interesse quase que nacional.

De acordo com SILVA (1995) o Modelo de Thompson (THOMPSON, 1967) é o modelo de mais fácil manuseio e execução, e uma análise comparativa com o Modelo de Michigan, revelou-se que estes modelos apresentam a mesma margem de erros. Este fato, constatado por diversos pesquisadores, tem levado ao seu uso preferencial, no entanto em alguns casos este modelo tem sido aperfeiçoado como é o caso do Modelo proposto por MOREY *et alii* (1976).

Segundo QUEIROZ (1984), o Modelo de Thompson é um modelo semi-teórico utilizado com sucesso para secagem de milho capaz de prever a influência das condições do ar de secagem, da espessura da camada e do teor de umidade inicial do produto.

É necessário também mencionar que muitos trabalhos de pesquisas ainda deverão ser necessários para que exista no Brasil um banco de dados confiáveis que possam expressar as diferentes equações dos diferentes produtos nacionais, principalmente por que existe no país uma das maiores diversidades de produtos do mundo, sem considerar que novas variedades sempre estão em desenvolvimento, de modo a atender as expectativas nutricionais do ser humano e animal.

Portanto diante desses fatos o presente capítulo teve como objetivos específicos:

- Conduzir testes experimentais de secagem de sementes de feijão “carioca” às temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, com teor de umidade inicial de 45, 35 e 25 %, base seca, e velocidade do ar de secagem de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$, em secador de camada estacionária de 0,70 m de altura.
- Desenvolver um programa computacional para realizar a simulação de secagem de sementes de feijão, em secadores de camada estacionária usando o Modelo de Thompson, utilizando as equações específicas de umidade de equilíbrio higroscópico, calor latente de vaporização, calor específico e equação de camada delgada, obtidas nos Capítulos 1 e 2 deste trabalho, além de comparar os resultados experimentais com dados simulados, para testar, desta forma, o Modelo para a faixa estudada.
- Com o secador sub-dividido em 4 camadas, determinar a germinação e vigor das sementes por camada e correlacionar estes valores com as equações de camada fina obtidas no Capítulo 3.
- Com o modelo testado, determinar por meio de simulação, o tempo necessário que as sementes podem ser secas em camada espessa a altas temperaturas, sem que ocorra perda da sua qualidade fisiológica, para 3 condições de secagem e compará-las com os dados experimentais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentre os modelos encontrados na literaturas para secagem de produtos agrícolas os que mais se destacam são os modelos de Hukill, Thompson, Morey e de Michigan. Muitos são os trabalhos envolvendo esses modelos, no entanto, só a partir da década de 80, com a consagração desses modelos, é que estes têm sido empregados para simular outros produtos diferentes do milho, como soja, sorgo e trigo.

O secador mais utilizado no país em nível de fazenda ou para secagem de sementes tem sido o secador de camada estacionária, também chamado de leito fixo. Desta forma o modelos descritos a seguir são para esse tipo de secador.

2.1. Modelo de Hukill

Segundo MANTOVANI (1976), Hukill em 1947, desenvolveu uma expressão analítica para a umidade dos grãos, relacionada com a altura total da camada de grãos e com o tempo de secagem, desprezando o calor sensível dos grãos e admitindo que a temperatura do ar de secagem decresce, exponencialmente, à medida que o ar vai passando pela massa de grãos.

O autor considerou, no balanço de calor, que o calor para vaporização da umidade do grão é igual ao calor sensível perdido na passagem do ar através dos grãos.

Para isso considerou uma camada fina (δx) de grãos de uma altura (x) no silo. Durante um pequeno intervalo de tempo (δt), o teor de umidade (U) decresce rapidamente (δU). A quantidade de calor necessário para diminuir o teor de umidade é dado pelo produto da quantidade de água evaporada e a de calor de vaporização. Isto pode ser expresso por:

$$Q = D_m \cdot S \cdot \delta x \left(\frac{\partial U}{100} \cdot h_{fg} \right) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde,

Q = calor de vaporização, J

D_m = massa específica das sementes, kg de matéria seca $\cdot m^{-3}$

S = área, m^2

x = distância do ponto de entrada do ar até o grão, m

U = teor de umidade do produto, % base seca

h_{fg} = calor latente de vaporização da água do produto, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

Durante o mesmo intervalo de tempo, a movimentação do ar através da camada delgada provoca uma pequena diminuição da temperatura (δT). A perda de calor associado a esta diminuição de temperatura é dado pelo produto da massa de ar passando através da camada delgada, durante o intervalo de tempo (δt), o calor específico do ar, e a queda de temperatura. Isto pode ser dado pela seguinte equação:

$$Q' = G_m \cdot S \cdot \partial t \cdot C_p \cdot \partial T \quad (\text{Eq. 4.2})$$

em que

- Q' = calor sensível, J
 G_m = fluxo de massa do ar, kg de ar seco. h^{-1}
 t = tempo, h.
 T = temperatura, K
 C_p = calor específico do produto, $kcal.kg^{-1} \cdot K^{-1}$

Como foi considerado o calor de vaporização igual ao calor sensível do ar ($Q = Q'$), tem-se:

$$D_m \cdot S \cdot \partial x \cdot (\partial U) \cdot h_{fg} = G_m \cdot S \cdot \partial t \cdot C_p \cdot \partial T \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Além do calor sensível do grão, a condução e pequenas radiações de calor são desprezadas, com isso tem-se:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{G_m \cdot C_p}{D_m \cdot h_{fg}} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Esta expressão pode ser escrita como

$$\frac{\partial U}{\partial t} = P \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

onde x é a espessura da camada de secagem e P é uma constante, estabelecida para uma dada condição de secagem, definida por:

$$P = \frac{G_m \cdot C_p}{D_m \cdot h_{fg}} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

A Equação 4.5 mostra que a taxa de secagem é proporcional a diferença entre as temperatura do ar imediatamente acima e abaixo de uma camada fina de espessura (∂x), considerando desprezível as trocas de calor nas paredes do silo e a variação do calor sensível dos grãos.

A relação entre o teor de umidade dos grãos e o tempo durante os processos de secagem em camada fina, ou seja, processos onde cada parte da massa das sementes está em contato com o ar nas condições iniciais, é a seguinte:

$$U - U_e = (U_i - U_e) \cdot \exp(-K \cdot t) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

em que

- U_e = teor de umidade de equilíbrio, % base seca
 K = coeficiente que depende do produto
 U_i = teor de umidade inicial do grão ou semente
 U = teor de umidade do grão no tempo (t) e altura (x)

A relação entre a temperatura do ar de secagem e a profundidade das sementes (espessura da camada) é a seguinte:

$$T_x - T_g = (T_o - T_g) \cdot \exp(-R_r \cdot x) \quad (\text{Eq. 4.8})$$

em que

T_g = Temperatura do grão, °C

R_r = Coeficiente que depende do produto.

T_x = Temperatura do ar a uma distância (x) da entrada do aro grão, °C

T_o = Temperatura do ar de secagem na entrada do secador, °C

Assumindo as condições já citadas, pode-se derivar a expressão para o teor de umidade do grão com o tempo, em alguma parte do silo, na qual as condições iniciais do ar são constantes como também a velocidade através da massa de grãos. Hukill encontrou uma expressão para a umidade (U) em função do tempo (t) e da profundidade (x), além de uma expressão em função dos mesmos parâmetros para a temperatura do ar. As seguir são descritas as condições de contorno e as expressões obtidas por HUKILL (1974).

condição 1:

$$t = 0, U = U_i \quad (\text{Eq. 4.9})$$

condição 2 :

$$t \rightarrow \infty, U = U_e$$

condição 3:

$$x = 0, T = T_o \quad (\text{Eq. 4.10})$$

condição 4:

$$x \rightarrow \infty, T = T_g$$

Para alguns valores de t e x, utilizando-se a Equação 4.5 tem-se:

$$U = (U_i - U_e) \cdot \frac{e^{cx}}{e^{cx} + e^{k \cdot t} + 1} + U_e \quad (\text{Eq. 4.11})$$

$$T = (T_o - T_g) \cdot \frac{e^{k \cdot t}}{e^{cx} + e^{k \cdot t} + 1} + T_g \quad (\text{Eq. 4.12})$$

em que

$$c = \frac{K \cdot (U_i - U_e)}{P \cdot (T_o - T_g)} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Para simplificar a equação da umidade, o autor definiu o teor de umidade, temperatura, tempo e profundidade como parâmetros adimensionais.

Adimensionalizando o teor de umidade dos grãos (razão de umidade) tem-se:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (\text{Eq.4.14})$$

onde $RU = 1$ antes da secagem ($t = 0$) e $RU = 0$ ($t \rightarrow \infty$) para o equilíbrio higroscópico.

O tempo pode ser expresso em termos de períodos de meia resposta. O período H , em horas, é o tempo necessário para que os grãos tenham uma razão de umidade de 0,5. Conseqüentemente $e^{-KH} = 0,5$ ou $e^{KH} = 2$, e tem-se o tempo, em período de meia resposta (adimensional de tempo):

$$Y = \frac{t}{H} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Segundo QUEIROZ *et alii* (1982), o tempo de meia-resposta (H) pode ser determinado por meio de regressão linear, BROOKER *et alii* (1974), estabeleceram a seguinte equação para milho:

$$H = \exp (2,413 - 0,016 \cdot \%U_{bu} + 0,003 \cdot T - 0,001 \cdot \%U_{bu} \cdot T) \quad (\text{Eq. 4.16})$$

A umidade equivalente a um fator profundidade (adimensional de profundidade) e pode ser definido como a profundidade da camada de grãos na qual, o calor necessário para evaporação da umidade inicial ($RU_0 = 1$) até a umidade final ($RU_f = 0$), é igual ao calor sensível fornecido pelo ar por unidade de tempo. Assim, o adimensional de profundidade é dado por:

$$D = \frac{x \cdot D_m \cdot h_{fg} \cdot (U_i - U_e)}{G_a \cdot C_p \cdot H \cdot (T_o - T_e)} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

em que

G_a = fluxo de ar, kg de ar seco. $m^{-2} \cdot h^{-1}$

Substituindo as equações 4.14, 4.15, 4.16 e 4.18 na equação 4.12 obtém-se a equação geral proposta por Hukill para descrever a secagem de uma massa de grãos:

$$RU = \frac{2^D}{2^D - 2^Y - 1} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

2.2. Modelo de Thompson

O modelo de Thompson foi proposto por este autor e seus colaboradores em 1967. Este modelo prevê a influência das condições do ar de secagem, dos fluxos de ar e de grãos, da espessura da camada e do teor de umidade inicial do produto no processo de secagem, considerando vários pequenos processos. Segundo QUEIROZ *et alii* (1982) os autores utilizaram o procedimento de dividir o processo contínuo de secagem em vários pequenos processos, simulando-os mediante cálculos consecutivos das trocas que ocorrem durante pequenos incrementos de tempo. A Figura 4, mostra esquematicamente um desses processos. Durante um intervalo de tempo Δt uma quantidade de umidade ΔU é evaporada e transportada pelo ar, que aumenta sua razão de umidade W para $W + \Delta W$. Durante a secagem, a temperatura do ar diminui de um valor ΔT proporcional ao aumento de temperatura do grão, $\Delta\theta$, e ao resfriamento evaporativo, que acompanha a remoção de umidade.

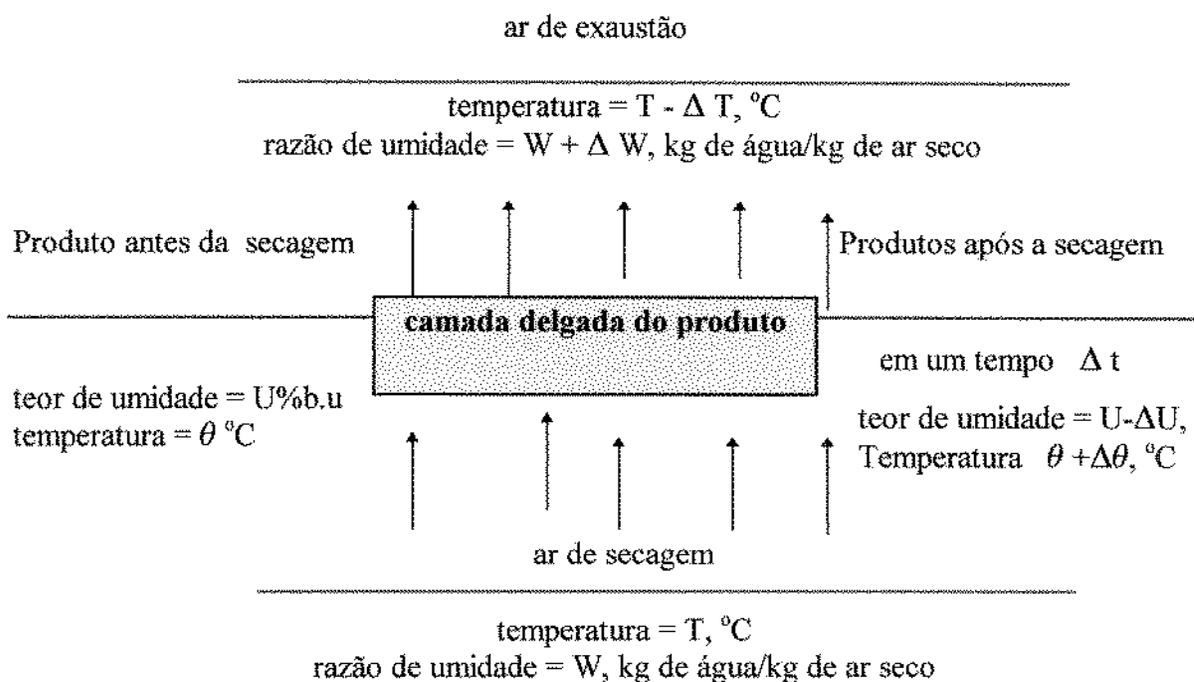


FIGURA 4.1 - Representação esquemática da secagem de uma camada delgada.

No modelo de THOMPSON *et alii* (1968) foram feitas as seguintes suposições:

1. A secagem de uma camada delgada é representada pela equação.

$$t_1 = A \cdot \ln (RU) + B \cdot [\ln (RU)]^2 \tag{Eq. 4.19}$$

em que

- t_1 = tempo, horas
- A, B = constantes que dependem do produto
- RU = razão de umidade $(U - U_e/U_i - U_e)$
- U = teor de umidade, % base seca
- U_e = teor de umidade de equilíbrio, % base seca
- U_i = teor de umidade inicial, % base seca

2. A temperatura do grão é igual à temperatura do ar que o envolve.
3. O teor de umidade de equilíbrio do produto, para determinada condição do ar de secagem, é representado por:

$$U_e = \left[\frac{-\ln(1-UR)}{K.(T_e + C)} \right]^{\frac{1}{N}} \quad (\text{Eq. 4.20})$$

em que

- UR = umidade relativa do ar, decimal
- K, C e N = são constantes que dependem do produto
- T_e = temperatura de equilíbrio, °C

4. O calor latente de vaporização da água no produto é dado por:

$$h_{fg} = (2502,2 - 2,39.T) . (1,0 + E. \exp(F.U)) \quad (\text{Eq. 4.21})$$

em que

- E, F = são constantes que dependem do produto
- h_{fg} = calor latente de vaporização, kJ. kg⁻¹

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

O calor específico do produto convertido em kcal. kg⁻¹ de ar seco é dado pela seguinte expressão:

$$C_p = (M + N.U_{b.s}) . R_c \quad (\text{Eq. 4.22})$$

em que

- U_{b.s} = teor de umidade do produto, % base seca
- M, N = são constantes que dependem do produto
- C_p = calor específico do produto, kcal.kg⁻¹.°C⁻¹
- R_c = razão produto/ ar, kg de matéria seca. kg⁻¹ de ar seco

em que

$$R_c = \rho_p \cdot \frac{L}{N} \cdot \frac{V_{esp}}{G_{ar} \cdot \Delta t \cdot 60} \quad (\text{Eq. 4.23})$$

- L = altura total da camada de sementes, m.
- N = número de camadas em que o secador está sendo dividido
- G_{ar} = fluxo de ar de secagem, m³.min⁻¹.m⁻².
- V_{esp} = volume específico do ar, m³.kg⁻¹ ar seco
- Δt = incremento de tempo, h.
- ρ_p = massa específica do produto, kg.m⁻³

Temperatura do ar de secagem

A temperatura de equilíbrio entre o ar de secagem e o produto foi calculada por meio da equação de balanço de calor. Devido ao calor sensível do ar ser usado para evaporar a umidade dos grãos ou sementes, esta temperatura é menor do que a temperatura do ar aquecido entrando na camada. THOMPSON (1967) determinou a seguinte expressão utilizando o balanço de calor:

$$T_e = \frac{(0,24 + 0,45 \cdot W_o)T_o + C_p \cdot \theta_o}{(0,24 + 0,45 \cdot W_o + C_p)} \quad (\text{Eq. 4.24})$$

em que

- W_o = razão de umidade do ar antes da secagem, kg de água. kg⁻¹ de ar seco
- T_o = temperatura do ar antes da secagem, °C
- θ_o = temperatura do grão antes da secagem, °C
- T_e = temperatura de equilíbrio entre o produto e o ar, °C

Umidade removida

Para determinar a quantidade de umidade removida de cada camada é necessário conhecer o teor de umidade inicial do produto e a temperatura do ar na saída. O teor de umidade de equilíbrio do produto (U_e) é calculado pela Equação 4.21, usando a temperatura de equilíbrio da Equação 4.24, e a umidade relativa do ar é calculada por meio da temperatura de equilíbrio e da razão de umidade do ar W_o , que está entrando na camada de grãos.

A quantidade de água perdida pelo produto no intervalo de tempo Δt é calculada pela equação de camada delgada 4.20. da seguinte maneira:

Determina-se o tempo equivalente ($t + \Delta t$) dado pela equação:

$$t_{eq} = A \cdot \ln(RU) + B \cdot \ln(RU)^2 + \Delta t \quad (\text{Eq. 4.25})$$

Aplica-se este tempo equivalente (t_{eq}) na raiz da equação obtendo-se o teor de umidade final depois do ar ter passado pela camada delgada.

$$U_f = \text{EXP} \left(\frac{-A - \sqrt{A^2 + 4 \cdot t_{eq} \cdot B}}{2B} \right) \cdot (U_i - U_e) + U_e \quad (\text{Eq. 4.26})$$

As condições finais do ar após o intervalo de tempo Δt é calculado da seguinte forma:

$$\Delta W = \frac{(U_i - U_f)}{100} \cdot R_c \quad (\text{Eq. 4.27})$$

$$W_f = W_o - \Delta W \quad (\text{Eq. 4.28})$$

em que

W_f = razão de umidade final do ar depois de ter passado por uma camada de secagem, kcal.kg⁻¹ de ar seco

ΔW = variação entre a razão de umidade inicial e final, kcal.kg⁻¹ de ar seco.

Temperatura final do ar e do grão

Depois da umidade ser removida, a temperatura final do ar e do grão pode ser determinada mais corretamente levando em consideração o calor de vaporização da água no grão:

$$T_f = \frac{(0,24 + 0,45 \cdot W_o)T_e - \Delta W(587,9 + \Delta h_{fg} - C_w \cdot \theta_e) + C_{pm} \cdot \theta_e}{(0,24 + 0,45 \cdot W_f + C_{pm})} \quad (\text{Eq. 4.29})$$

Nesta equação assume-se que $\theta_e = T_e$ que é obtida pela equação 4.24.

em que

Δh_{fg} = variação do calor latente de vaporização da água no produto, kcal.kg⁻¹.

C_w = calor específico da água, kcal.kg⁻¹.°C⁻¹

Ponto de estado consistente do ar de secagem

Depois de cada balanço de calor, é necessário determinar se a temperatura e a razão de umidade do ar estão consistentes com a umidade relativa determinada matematicamente, ou seja, se esta é inferior ou igual a 100%. Se o ponto de estado for inexistente, é necessário outro balanço de calor para simular a condensação da água do ar no grão.

Do ponto de estado inexistente (representado por H_o , G_o e T_o), um balanço de calor foi escrito entre as condições inicial e final por acréscimo do período de secagem.

$$\begin{aligned} [0,24 \cdot T_o + W_o \cdot (1060,8 + 0,45 t_o) + C_p \cdot \theta_o + (W_f - W_o) \cdot (C_w \theta_o)] = & \quad (\text{Eq. 4.30}) \\ [0,24 \cdot T_f + W_f \cdot (1060,8 + 0,45 T_f) + C_p \cdot T_f] \end{aligned}$$

Essa Equação tem duas incógnitas: a temperatura final do ar (T_f) e a razão de umidade do ar de exaustão (W_f). Usando interpolação da umidade relativa versus a relação de temperatura, esta converge para uma umidade relativa de 100%. Apenas em 3 ou 4 tentativas, onde obtém-se uma umidade relativa entre 99% a 100%. Thompson assumiu que a água removida pelo ar é condensada no produto e a umidade final (U_f), é determinada por:

$$U_f = U_i - \left[\frac{(W_f - W_o) \cdot 100}{R_c} \right] \quad (\text{Eq. 4.31})$$

2.3. Modelo de Morey

O modelo de MOREY *et alii* (1976) consiste na realidade no aprimoramento do Modelo de Thompson. Os autores trabalharam com secagem de milho a baixas temperaturas e verificaram que a equação proposta por Thompson para secagem em camada delgada não representava tão bem seus dados experimentais, pois a secagem do produto nas camadas inferior-

res não acontecia tão rapidamente quanto o previsto no modelo de Thompson, uma vez que o produto não entrava em equilíbrio com o ar como admite o modelo. Desta forma, para corrigir os fatos evidenciados, MOREY *et alii* (1976), acrescentaram ao modelo a equação de camada delgada proposta por Sabbah para temperaturas entre 0 e 21 °C, que é:

$$RU = \text{EXP}[-K \cdot t^{0,664}] \quad (\text{Eq. 4.32})$$

em que

$$K = \text{EXP}(-x \cdot t^y) \quad (\text{Eq. 4.33})$$

$$x = [6,0142 + 1,453 \cdot 10^{-4} \cdot (\text{UR})^2]^{0,5} - (1,8 \cdot T_0 + 32) \cdot [3,353 \cdot 10^{-4} + 3,0 \cdot 10^{-8} \cdot (\text{UR})^2]^{0,5} \quad (\text{Eq. 4.34})$$

$$y = 0,12264 - 1,461 \cdot 10^{-3} \cdot \text{UR} + 4,14 \cdot 10^{-5} \cdot \text{UR} \cdot T_0 - 1,044 \cdot 10^{-4} \cdot T_0 \quad (\text{Eq. 4.35})$$

em que

T_0 = temperatura do milho, °C

UR = umidade relativa do ar, %

t = tempo, h

Neste modelo é previsto também o reumedecimento do produto nas camadas superiores, que é comum ocorrer em secagem a baixas temperaturas já que o ar de secagem chega saturado temporariamente nas camadas superiores nos secadores de leito fixo. Portanto, neste modelo, MOREY *et alii* (1976) mostraram que o fenômeno de histerese deveria ser considerado, pois o valor de umidade no reumedecimento é sempre inferior ao previsto pelo modelo de Thompson.

Desta forma, incluiu-se a seguinte equação de adsorção de umidade para milho:

$$\text{URE}_u = 100 \cdot \left\{ 1 - \text{EXP}[-0,518 \cdot (\theta + 45,6) \cdot U^{1,72}] \right\} \quad (\text{Eq. 4.36})$$

em que

URE_u = Umidade relativa de equilíbrio para o produto no reumedecimento, em %

Embora o fenômeno de histerese seja difícil de quantificar, a equação anterior prevê, no reumedecimento, que o produto terá um teor de umidade de equilíbrio inferior ao atingido durante a secagem, para as mesmas condições de temperaturas e umidade relativa.

No modelo proposto por Morey, quando as condições do ar, temperatura e umidade relativa indicam situação de secagem, usa-se a equação de dessorção para determinar o valor de umidade relativa de equilíbrio. Quando as condições indicam reumedecimento, determina-se o valor de URE_u . Existe, portanto, uma faixa de umidade do produto entre as isotermas de adsorção e dessorção. Quando o ponto de estado do ar indicar um teor de umidade dentro dessa faixa, aceita-se que não haverá nem secagem, nem reumedecimento. Apesar disso, o balanço de energia é realizado, para determinar a temperatura final do produto e do ar (QUEIROZ *et alii*, S/D).

Devido a lentidão com que se processa a secagem a baixas temperaturas, o modelo de Morey também prevê a deterioração do produto e conseqüentemente perda de matéria seca do produto. Isto acontece porque nas camadas superiores do secador, o produto demora a iniciar a sua secagem, sendo que, neste tempo, o produto sofre uma deterioração que pode ser expressa pela seguinte equação:

$$PMS = 0,00883. [\text{EXP}(0,006.t) - 1] + 0,00102.t \quad (\text{Eq. 4.37})$$

em que

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

t = tempo de exposição do produto, nas condições supracitadas, h

O modelo MOREY *et alii* (1976) é considerado um dos melhores modelos para secagem a baixas temperaturas pois conjuntamente com o modelo de Thompson pode ser resolvido com pouco tempo de processamento de computador. (QUEIROZ *et alii*, S/D), menciona que experiências realizadas para validação deste modelo mostram que os desvios entre os resultados experimentais e os simulados são de mesma ordem dos erros experimentais.

2.4. Modelo de Michigan

Este modelo é baseado nas leis de transferência de calor e massa, sendo necessário para resolver este sistemas um computador pessoal com co-processador matemático.

Neste modelo são assumidas as seguintes pressuposições:

1. o gradiente de temperatura dentro das sementes, individualmente, é desprezível;
2. a transferência de calor por condução entre sementes é desprezível;
3. o escoamento é em bloco (tipo "plug-flow");
4. as paredes do silo são adiabáticas, com capacidades caloríficas desprezíveis;
5. as capacidades caloríficas do ar e da semente são constantes em pequeno intervalo de tempo;
6. uma equação fidedigna de secagem em camada fina e de umidade de equilíbrio é conhecida;
7. a contração volumétrica das sementes é desprezível;
8. as variações de temperatura do ar com o tempo e a razão de umidade do ar com o tempo são desprezíveis.

No modelo de Michigan os balanços de massa e energia são escritos para um volume diferencial (S.dV), em uma posição arbitrária da camada de sementes, conforme mostra a Figura 4.2.

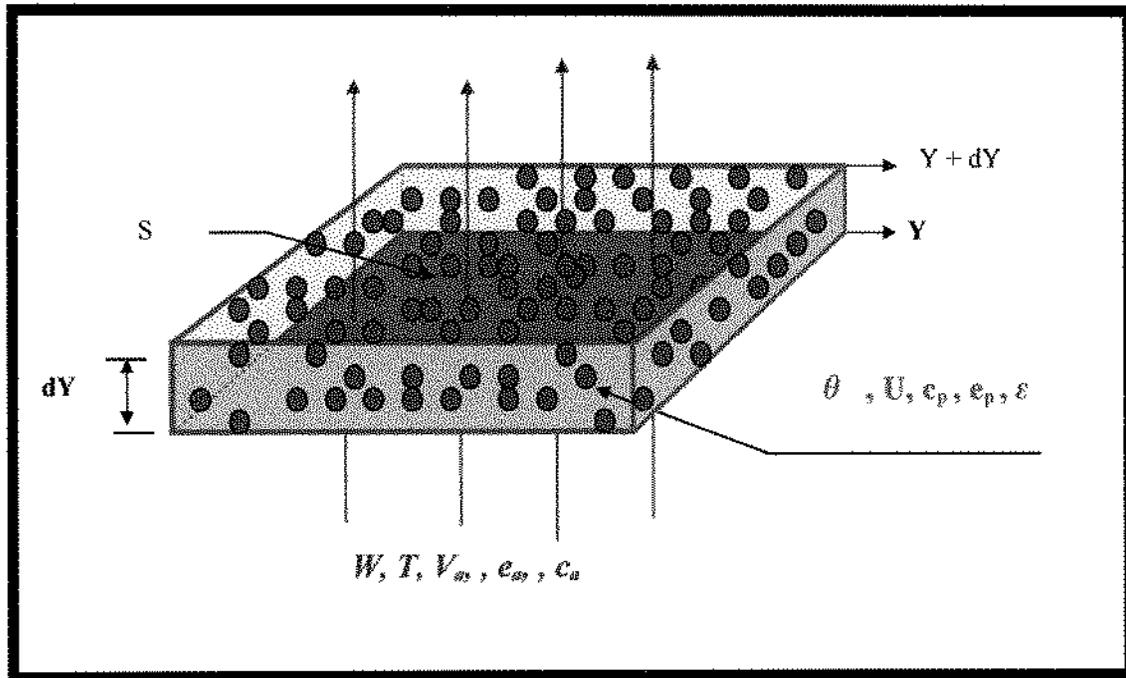


FIGURA 4.2 - Volume elementar de uma camada de sementes.

Balanco de energia do ar:

Energia transferida por convecção	=	Diferença entre as entalpias transferidas pelo ar para dentro e para fora do volume (Sdy)	+	Variação na entalpia do ar, em relação ao tempo, nos espaços intergranulares
-----------------------------------	---	---	---	--

A equação de balanço pode ser escrita como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{h \cdot a \cdot (T - \theta)}{\epsilon \cdot \rho_a \cdot (c_a + c_v \cdot W)} - \frac{V_a}{\epsilon} \cdot \frac{\partial T}{\partial Y} \tag{Eq. 4.38}$$

em que

- h = coeficiente de transferência de calor por convecção, $w.m^{-2}.K^{-1}$
- a = área específica, $m^2.m^{-3}$
- T = temperatura do ar, K
- θ = temperatura das sementes, K
- ϵ = porosidade da massa de sementes, decimal
- ρ = massa específica, $kg.m^{-3}$
- c = calor específico, $J.kg^{-1}.k^{-1}$
- w = razão de umidade do ar, adimensional
- V = velocidade, $m.s^{-1}$
- Y = profundidade de camada de sementes, m
- t = tempo, s

Os índices a, v, w e p indicam que as propriedades que contém estes índices se referem ao ar, vapor, água e produto, respectivamente.

Balço de energia das sementes:

$$\boxed{\text{Entalpia transferida, por convecção, do ar para os grãos}} = \boxed{\text{Entalpia utilizada para aquecer os grãos}} + \boxed{\text{Entalpia utilizada para evaporar a água dos grãos}}$$

A equação que expressa esta igualdade é dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{h \cdot a \cdot (T - \theta)}{\rho_p \cdot (c_p + c_w \cdot U)} - \frac{h_{fg} + c_v (T - \theta)}{\rho_p \cdot (c_p + c_w \cdot U)} Q_a \cdot \frac{\partial w}{\partial Y} \quad (\text{Eq. 4.39})$$

em que

U = teor de umidade do produto, decimal, b.s.

Q_m = fluxo de massa, kg.s⁻¹.m⁻²

h_{fg} = calor latente de vaporização da água do produto, J.kg⁻¹

Balço de massa do ar

$$\boxed{\text{Variação da quantidade de vapor d'água no ar, com relação à posição Y}} = \boxed{\text{Variação da quantidade de vapor d'água no ar dentro do volume (Sdy), no tempo dt,}} + \boxed{\text{Variação da umidade dos grãos no volume (Sdy) no tempo dt}}$$

A equação reorganizada é dada por:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \frac{1}{\epsilon \cdot \rho_a} \left[Q_a \cdot \frac{\partial w}{\partial y} + \rho_p \frac{\partial U}{\partial t} \right] \quad (\text{Eq. 4.40})$$

Balço de massa das sementes

O balanço de massa do produto é dado pela equação de secagem em camada delgada apropriada. A equação abaixo foi sugerida por THOMPSON *et alii* (1968).

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{(U - U_e)}{3600 \cdot \sqrt{A^2 + (1/900)}} \cdot B \cdot t \quad (\text{Eq. 4.41})$$

SINÍCIO (1983) sugeriu a seguinte equação para secagem a baixas temperaturas:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{3600} \cdot (a_0 + a_1 \cdot U_e) \cdot (a_2 + a_3 \cdot D + a_4 \cdot D^2) \left[a_5 (U - U_e) + a_6 (U - U_e)^2 \right] \quad (\text{Eq. 4.42})$$

em que

$$D = [(P_{vs} - P_v) \cdot 10^{-4}] / 9,80665, \text{ Pa}$$
$$a_0 = -0,0652372$$
$$a_1 = 4,37761$$
$$a_2 = 0,0420049$$
$$a_3 = 8,86804$$
$$a_4 = -168,160$$
$$a_5 = 0,148136$$
$$a_6 = -34,9943$$

As 4 equações diferencial acima formam o modelo de secagem em camada estacionária e constituem, portanto, o modelo de simulação para este tipo de secador.

2.5. Simulação de secagem em camada estacionária

QUEIROZ *et alii* (1981) implementaram o modelo de Thompson *et alii* para simular a secagem de milho. Os autores compararam os dados simulados com os obtidos experimentalmente por MANTOVANI (1976) que secou milho a uma espessura de 1,10 m e 1,30 m, temperaturas de 30 e 35 °C e vazões do ar de 10 e 12 m³ de ar.min.⁻¹. m⁻³ e concluíram que o modelo apresenta resultados aceitáveis para previsão do processo de secagem em secador de camada estacionária.

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. Foram estudadas a secagem às temperaturas de 50, 60 e 70 °C, fluxos de ar de 12 e 15 m³.min.⁻¹.m⁻² e tempos de inversão de fluxo de ar de 7, 9 e 12 horas. O autor concluiu que a inversão de sentido do fluxo de ar apresenta a vantagem sobre o sistema convencional apenas no aspecto de melhorar a homogeneidade do teor de umidade final da camada do produto, pouco alterando a eficiência de secagem, e que o modelo se comporta satisfatoriamente dentro dos parâmetros estudados.

CANEPPELE *et alii* (1993), desenvolveram também um programa para simulação de secagem de arroz em casca utilizando o modelo de Thompson, com a finalidade de prever a secagem em secador de camada estacionária por convecção natural. Os autores utilizaram temperaturas do ar de secagem de 40, 60 e 80 °C e espessura da camada de grãos de 5, 10 e 15 cm e uma distância do centro da fonte de aquecimento até a tela de 185 cm, concluindo que o programa computacional implementado pode ser utilizado na avaliação do processo de secagem de arroz em casca.

SINÍCIO *et alii* (1986) implementaram um programa para simulação de secagem de milho a baixas temperaturas, baseado no modelo de THOMPSON *et alii* (1968). Os autores determinaram uma equação de camada delgada para as condições de secagem com ar natural e ar aquecido de 5 e 10 °C e compararam os dados experimentais com os dados calculados, tendo encontrado erros relativos médios na ordem de 4,4; 3,8 e 3,0%, respectivamente. Os dados experimentais também foram comparados com os modelos de Michigan e MOREY *et alii* (1978), e os autores concluíram que os dados experimentais e os calculados pelos três modelos apresentam erros relativos e desvios absolutos médios, na mesma ordem de grandeza, podendo ambos os modelos simular indistintamente a secagem de milho a baixas temperaturas.

CAVALCANTI MATA (1993), também utilizou o modelo de Thompson *et alii* (1968) para simular a secagem de grãos de milho branco variedade BR-451, em secador de camada estacionária. O autor conduziu 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 $36 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, tendo concluído que os erros relativos entre os dados experimentais e os dados calculados são baixos o que permite validar o modelo para este produto. O bom desempenho do modelo é atribuído pelo autor, ao fato de se utilizar equações de umidade de equilíbrio higroscópico, calor latente de vaporização, calor específico e equação de camada delgada específica para produto milho branco.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta etapa do presente trabalho foi realizado no Laboratório de Processamento e Armazenagem de Produtos Vegetais do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

Para a realização desta pesquisa foram utilizadas sementes de feijão, variedade carioca, plantadas em 1992/1993 no município de Lagoa Seca - Estado da Paraíba, por produtores rurais, sendo este plantio supervisionado pelo autor para o cumprimento de todas as exigências técnicas que requer o plantio de sementes de alta qualidade.

O feijão foi colhido com um teor de umidade em torno de 35 % base úmida (b.u.). O feijão, ainda na vagem, foi levado ao Laboratório sendo seco em ambiente natural até que o produto atingisse um teor de umidade em torno de 45% base seca (b.s.), quando então, foi procedida a debulha manual. O material, assim obtido, foi subdividido em 3 lotes de 240 kg cada um para realização dos testes de secagem.

3.1. Secagem em camada espessa

Com a finalidade de validar os parâmetros encontrados das equações propostas para o Modelo de Thompson e, conseqüentemente, testar o Modelo para a faixa estudada, realizaram-se 12 testes de secagem em camada espessa em um secador experimental às temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C e teor de umidade inicial de 45, 35 e 25 %, base seca.

3.1.1. Secador Experimental

O secador experimental de camada estacionária (Figura 4.3) é constituído de uma câmara de secagem cilíndrica de 57 cm de diâmetro externo, 37 cm de diâmetro interno e altura de 70 cm. No espaço entre o diâmetro interno e externo do cilindro existe um isolante térmico constituído de lã de vidro para evitar perdas de calor pelas paredes laterais do secador durante o processo de secagem.

O secador tem um plenum de 10 cm situado na sua parte inferior por onde flui o ar para a câmara de secagem, sendo que, acima deste plenum está situada uma tela perfurada de malha de 2 por 2 mm onde as sementes são colocadas.

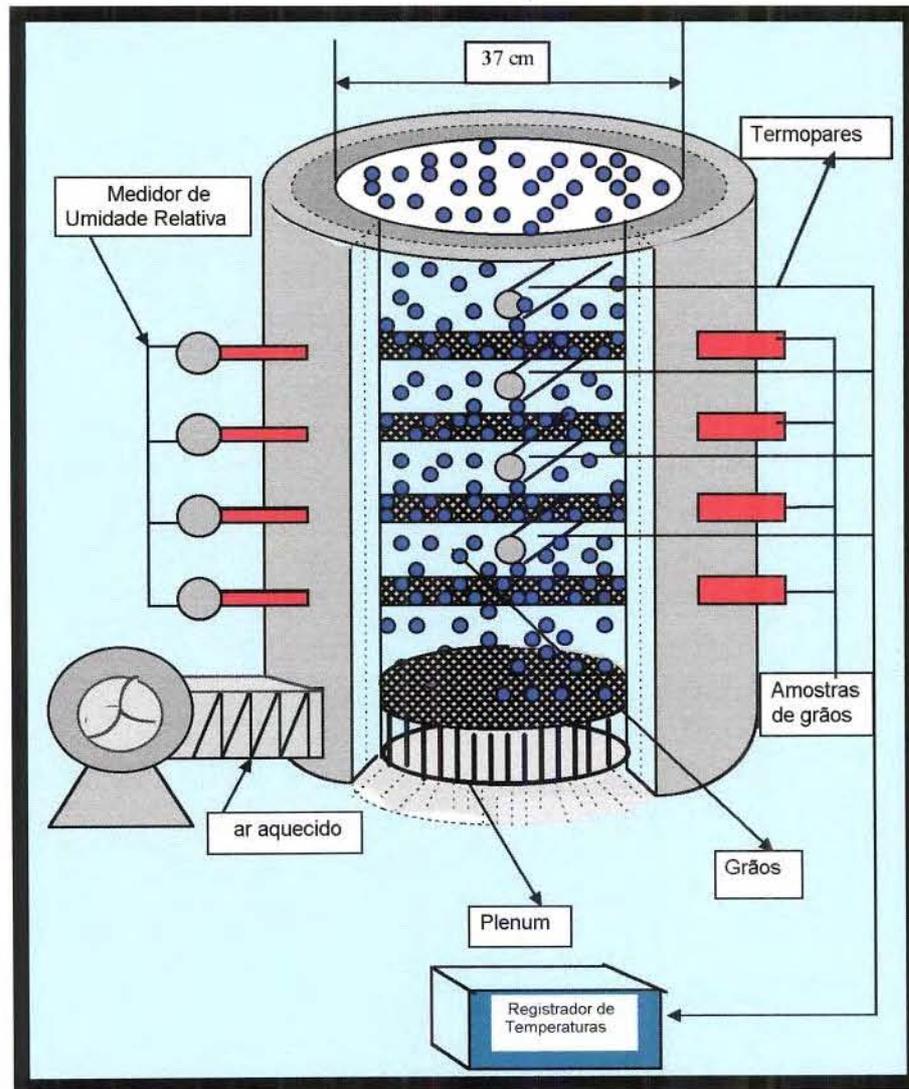


FIGURA 4.3 - Secador experimental em camada estacionária utilizado no experimento.

O secador experimental é composto de 4 seções por onde podem ser medidas as temperaturas e as umidades relativas do ar de secagem a cada 14 cm de altura. Ao plenum está acoplado externamente um duto de 25 cm de diâmetro por 2 m de comprimento, isolado termicamente também com lã de vidro onde existem 4 seções de resistências que fornecem temperaturas entre 40 a 90 °C. Na outra extremidade do duto está um ventilador centrífugo com um motor de 0,5 HP, que faz com que o ar aquecido seja insuflado na câmara de secagem, passando evidentemente pelas resistências de aquecimento e pelo plenum.

Na entrada do plenum e nas 4 seções de análise das camadas de secagem foram colocados termopares conectados a um registrador de temperatura de 10 canais do tipo Electro-Term MS- 800, com precisão de leitura de $\pm 0,5$ °C (Figura 4.4). As umidades relativas do ar de secagem intergranular em cada seção de análise foram obtidas com higrômetros Haenni tipo espada (Figura 4.5).

3.1.2. Condução dos testes de secagem em camada espessa

Para cada teste de secagem determinou-se inicialmente o teor de umidade do produto, utilizando-se uma estufa de circulação de ar tipo FANEN 330, à temperatura de 105 ± 1 °C por um período de tempo de 24 horas.

Logo depois da determinação do teor de umidade dos grãos de feijão, os testes experimentais de secagem foram conduzidos no secador supracitado de capacidade volumétrica de $0,07\text{m}^3$ e com aproximadamente 60 quilogramas de feijão (Figura 4.6). Depois que o secador foi carregado com o produto, o motor do ventilador era acionado, obtendo-se um fluxo uniforme de ar de aproximadamente $0,5\text{ m.s.}^{-1}$, medido durante todos os experimentos por meio de um velômetro ALNOR 6000 P. Os testes de secagem conduzidos foram: temperatura de secagem de 40, 50, 60, e $70\text{ }^\circ\text{C}$ e teor de umidade inicial das sementes de 45, 35 e 25 % b.s.

As temperaturas, umidades relativas e perda de peso das amostras de cada camada foram determinadas de 30 em 30 minutos (Figuras 4.7 e 4.8). A fim de realizar uma contra prova, foi determinado o teor de umidade das sementes após a secagem e os valores recalculados. Esses valores recalculados foram considerados, e o teor de umidade final foi a média desses dois valores.

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

Depois de terminada a secagem foram retiradas amostras das 4 camadas para determinação da germinação e do vigor das sementes. Os métodos de determinação da germinação e vigor das sementes de feijão já foram descritos em materiais e métodos do Capítulo 3.

A germinação e vigor final das sementes foram estimados pela média das 4 camadas. A germinação e o vigor médios e os obtidos por camadas foram comparados com os dados de perda da germinação e vigor das sementes em função do tempo de residência dessas sementes no secador, determinados no Capítulo 3.



FIGURA 4.4 - Aparelho de medição de temperatura de 10 canais Electro-Term MS-800.



FIGURA 4.5 - Higrômetros de espada para determinação da umidade relativa do ar de secagem nas 4 seções do secador de camada estacionária.



FIGURA 4.6 - Detalhes internos da câmara de secagem do secador de camada estacionária.

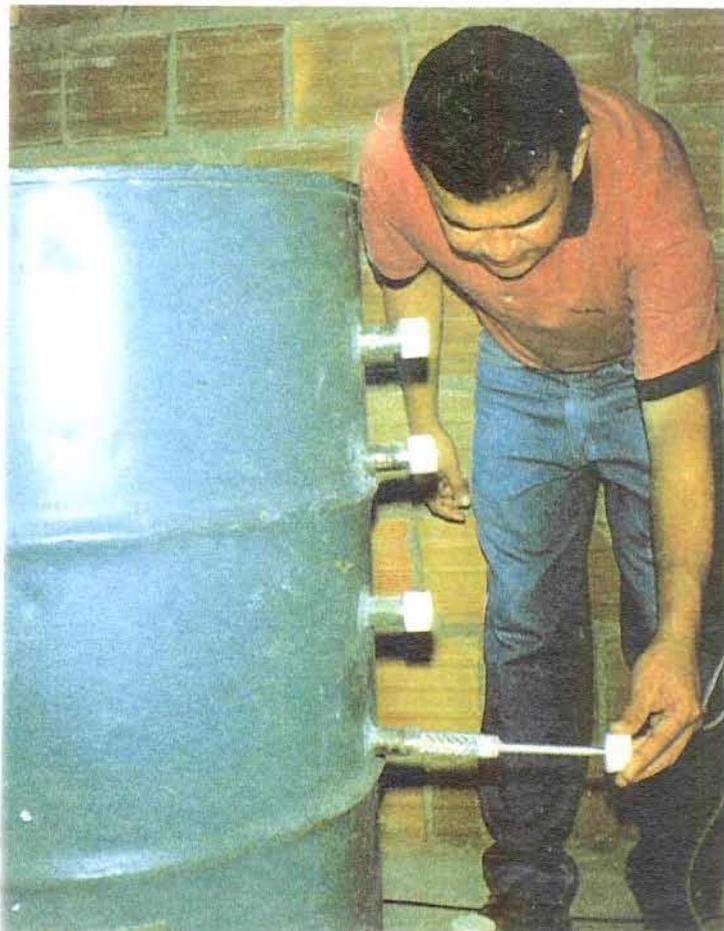


FIGURA 4.7 - Pontos de retirada das amostras de feijão no secador para acompanhamento da perda de peso.

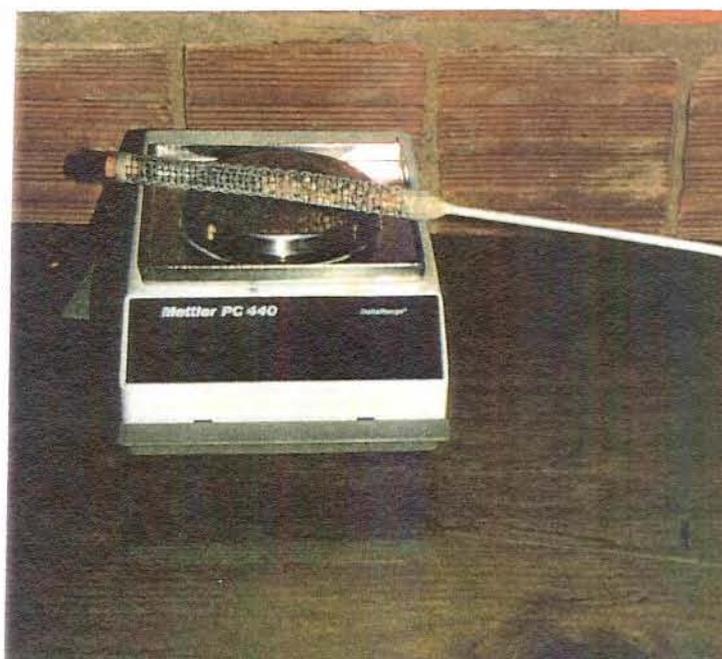


FIGURA 4.8 - Detalhe da balança utilizada para acompanhamento da perda de peso das sementes de feijão durante a secagem.

3.2. Simulação de Secagem em Camada Espessa.

Com auxílio de técnicos do NTA foi desenvolvido um programa em DBasic IV para a simulação de secagem de feijão “carioca” em camada espessa em secador de camada estacionária. O programa foi denominado SASG versão 5.0, sendo que os programas fontes estão no Apêndice 4A reportados por CAVALCANTI MATA (1996).

A simulação consistiu basicamente em empregar o Modelo de THOMPSON (1967) alterando-se as equações de isoterma de desorção, calor latente de vaporização, calor específico e das curvas de secagem em camada delgada, parâmetros estes obtidos especificamente nos Capítulos 1 e 2 e adaptados para o modelo.

Algumas equações tiveram que ser refeitas de modo a adequá-las às unidades especificadas no programa. Os dados utilizados foram:

Equilíbrio Higroscópico - U_e

$$U_e = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-0,003944.T^{0,29328515}} \right]^{0,58391229}$$

em que

- UR = umidade relativa, decimal
- T = temperatura, °C
- U_e = umidade de equilíbrio, % base seca

Calor Latente de Vaporização - hfg

$$hfg = (606 - 0,57.T).(1 + 0,24907578.exp(-0,06800859.U_e))$$

Calor Específico - c_p

$$c_p = 0,222350 + 0,00388.(U_{b,u})$$

em que

- $U_{b,u}$ = umidade base úmida

Equação de Camada Fina

$$t = A.\ln(RU) + B.(\ln(RU))^2$$

$$A = (-0,029378 + 0,0003577.T - 0,0000008099.T^2).(626,77183 - 22,94567.U_i + 0,2878647.(U_i)^2)$$

$$B = (0,064739 - 0,00162467.T + 0,000010514798.T^2).(814,12253 - 31,652274.U_i + 0,3850378.U_i^2)$$

em que

- t = tempo, h
- RU = razão de umidade, adimensional
- U_i = Teor de umidade inicial, % base seca

Para testar o Modelo de Thompson para secagem de feijão “carioca” em secador de camada estacionária, na faixa de temperaturas estudadas, os dados simulados do teor de umidade do feijão e a temperatura do ar de secagem foram comparados com os dados experimentais pelo teste de qui-quadrado ao nível de 5 % de probabilidade, determinando-se, desta forma, os desvios entre os resultados obtidos.

O programa é constituído de uma tela de abertura para escolha do produto a ser simulado (Figura 4.9). A tela seguinte (Figura 4.10) permite caso necessário a determinação das propriedades psicrométricas do ar ambiente e ar aquecido até 150 °C, para tanto pode-se utilizar a temperatura de bulbo seco (**Tb.s.**) e temperatura de bulbo molhado (**Tb.m.**) ou temperatura de bulbo seco (**Tb.s.**) e umidade relativa (**UR**) do ar. Nos dados de entrada podem ser calculados as propriedades psicrométricas do ar alterando-se a pressão atmosférica que já vem com 760 mm Hg. As equações utilizadas para esses cálculos foram descritas por WILHELM (1976) e QUEIROZ *et alii* (1982).

A utilização desta opção, na tela 2 (Figura 4.10), pode ser dispensada para uso na simulação de secagem em secadores de camada fixa, pois as propriedades psicrométricas necessárias à simulação de secagem já estão embutidas na opção “**secagem em camada fixa**”, como sub-rotinas.

A tela 3 na Figura 4.11, permite escolher o número de camadas de 3 a 10 a serem simuladas, sendo que de 3 a 5 os dados simulados permitem ser observados no monitor e de 6 a 10 só via impressora.

Os dados necessários a simulação de secagem do feijão “carioca” em secador de camada estacionária pelo Modelo de Thompson, são solicitados em duas fases, (Figura 4.12). Na primeira fase, tela 4a, são solicitados os dados psicrométricos e os cálculos necessários à secagem são feitos automaticamente. Na segunda fase, tela 4b, solicitam-se os dados referentes às condições do secador e do produto a ser seco.



FIGURA 4.9 - Tela de abertura para escolha do produto a ser simulado.

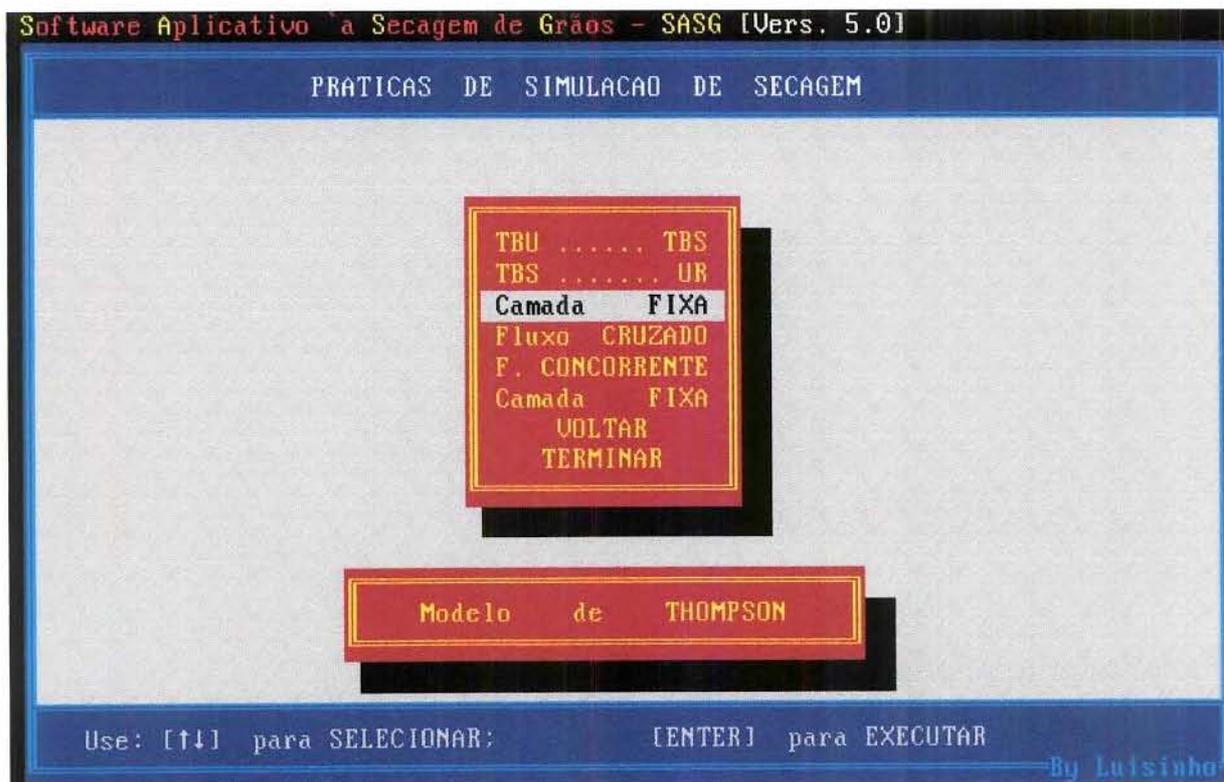


FIGURA 4.10 - Tela que permite selecionar as determinações das propriedades psicrométricas do ar ou os tipos de simulação de secagem.

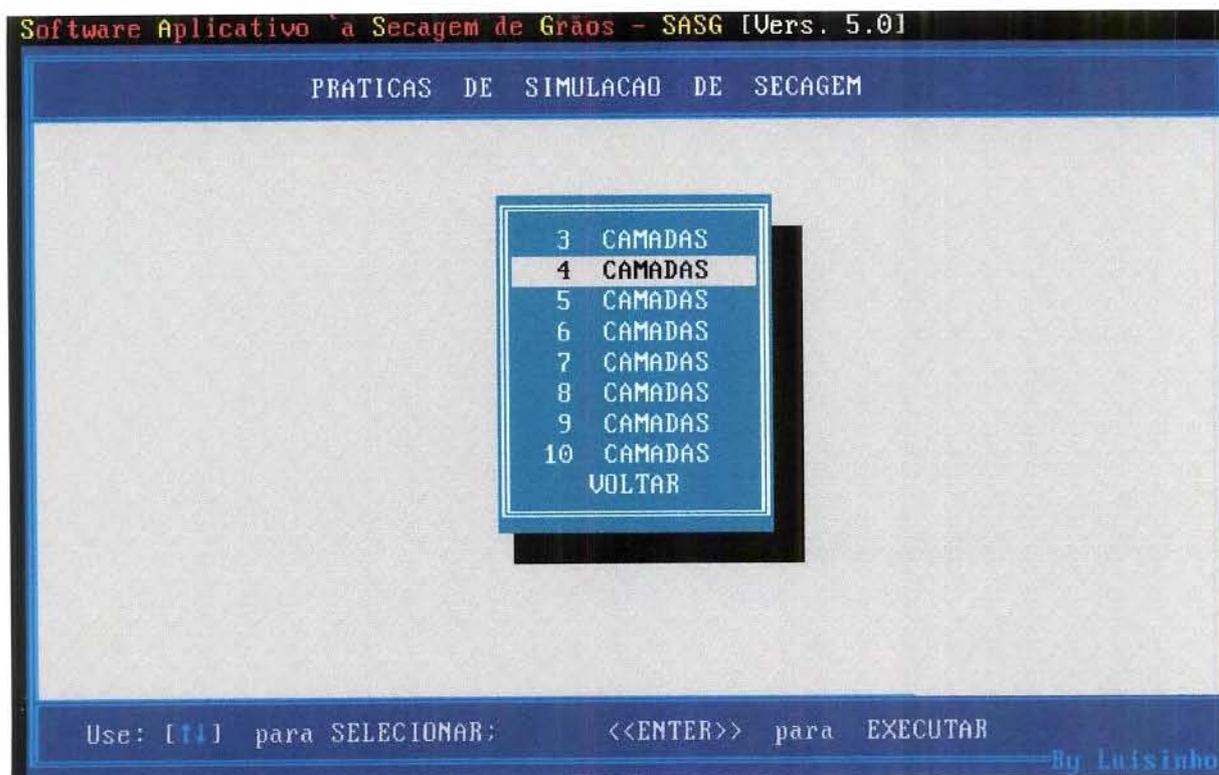
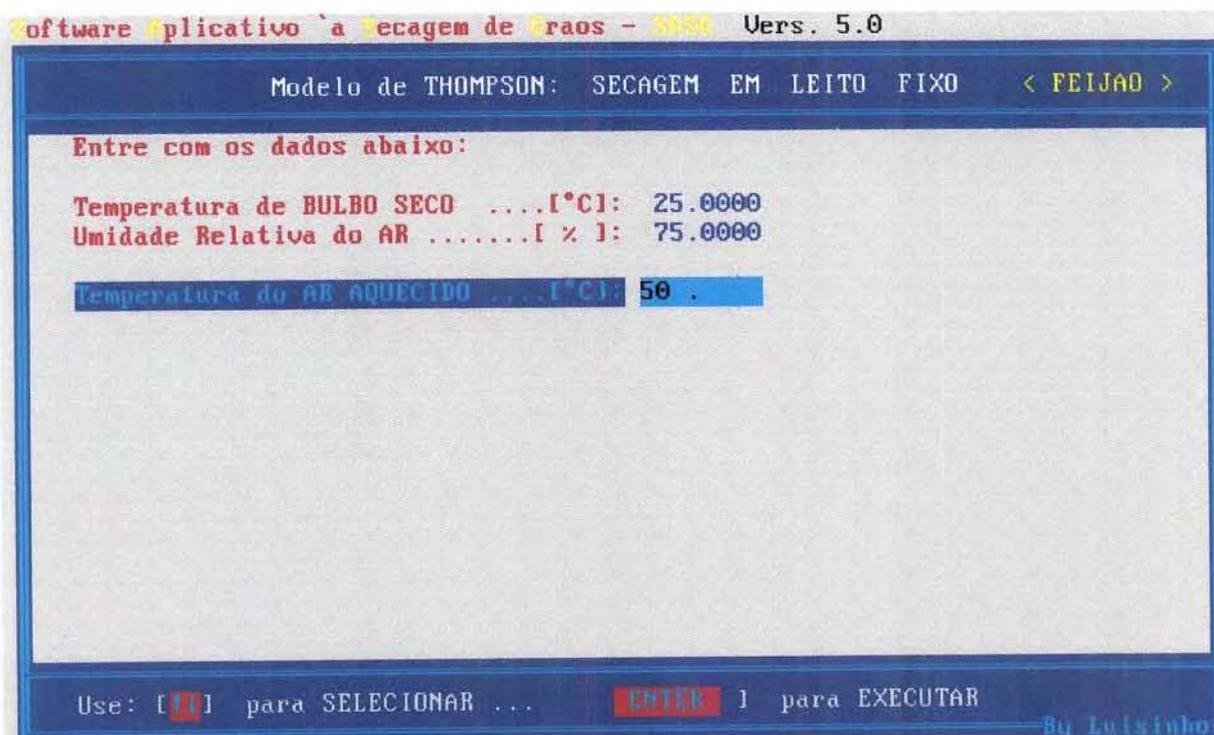
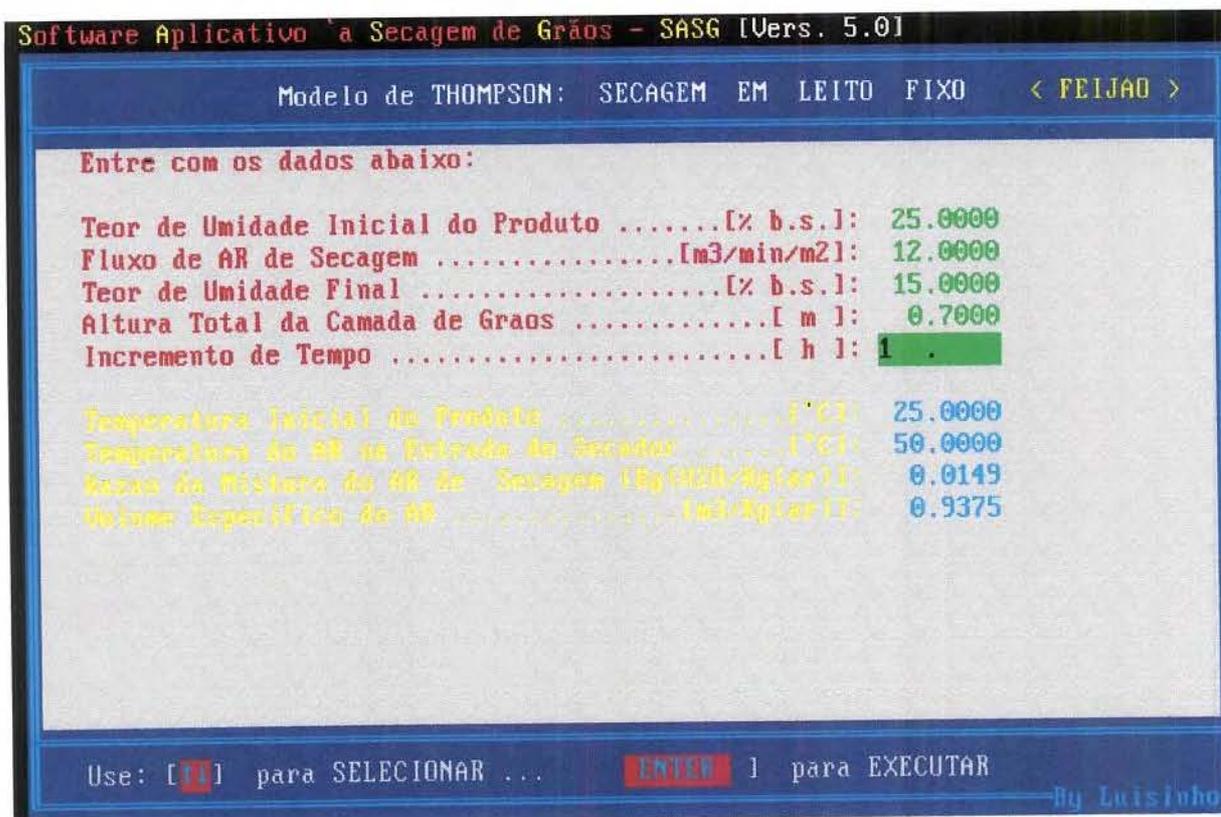


FIGURA 4.11 - Tela que permite escolher o número de camadas para simulação.



Tela 4a



Tela 4b

FIGURA 4.12 - Tela dos dados de entrada para a simulação de secagem de feijão em camada estacionária pelo modelo de Thompson.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de cada etapa deste capítulo, utilizando-se feijão variedade "carioca" são descritos a seguir

4.1. Simulação e secagem em camada espessa

Na Tabela 4.1, são apresentadas as condições de secagem usadas durante os experimentos e na simulação da secagem pelo programa SASG 5.0 .

Os dados experimentais e os simulados pelo Modelo de Thompson, com as modificações das equações próprias para o feijão (dessorção, calor latente de vaporização, calor específico e curvas de secagem em camada delgada), são apresentados nas Figuras 4.13 a 4.24 para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C e teores de umidade inicial de 45, 35 e 25 % base seca, respectivamente, sendo que esses valores estão nas Tabelas 1 a 12 do Apêndice 4B.

TABELA 4.1 - Condições de secagem dos experimentos realizados em um secador de camada estacionária

Parâmetros	Experimento											
	1 ^o .	2 ^o .	3 ^o .	4 ^o .	5 ^o .	6 ^o .	7 ^o .	8 ^o .	9 ^o .	10 ^o .	11 ^o .	12 ^o .
Temperatura do ar (°C)	27,0	27,0	27,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Umidade Relativa (%)	78,0	78,0	78,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0
Temperatura do ar de secagem (°C)	40,0	40,0	40,0	50,0	50,0	50,0	60,0	60,0	60,0	70,0	70,0	70,0
Teor de Umidade Inicial (% base seca)	45,0	35,0	25,0	45,0	35,0	25,0	45,0	35,0	25,0	45,0	35,0	25,0
Vazão do ar de secagem (m ³ .min. ⁻¹ .m ⁻²)	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0
Teor de umidade final (% base seca)	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
Altura da camada de sementes (m)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Intervalo de tempo de medição (h)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Observa-se nas Figuras 4.13 a 4.24 que os dados simulados acompanham, de modo geral, os dados experimentais para as 4 temperaturas estudadas, verificando-se algumas defasagens entre as curvas experimentais e as calculadas. No entanto, aplicando-se o teste de qui-quadrado não se observa diferenças significativas entre os dados experimentais e os simulados ao nível de 5 % de probabilidade, para todos os experimentos. Este fato indica que o Modelo de Thompson com as equações próprias de desorção, calor latente de vaporização, calor específico e das curvas de secagem para camada fina para o feijão variedade “carioca”, é válido para o intervalo de temperatura estudado, ou seja, de 40 a 70 °C e vazão de 36 m³/min.⁻¹.m². Cabe ressaltar também os limites da equação de camada delgada que é restrita ao intervalo de temperatura de 30 a 80 °C e teores de umidade inicial do produto de 45 a 25 % base seca.

Por meio dos dados simulados e experimentais observa-se que, para a temperatura de 40 °C e teores de umidade inicial das sementes de 45, 35 e 25 % base seca e ainda para as condições de secagem estabelecidas na Tabela 4.1, o tempo de secagem das sementes correspondem respectivamente a aproximadamente 17,5; 14,0 e 13,0 horas. Para a temperatura de 50 °C os tempos de secagem foram de 11,0; 6,5 e 5,5 horas, e para a temperatura de 60 °C esses tempos de secagem foram respectivamente de 9,0; 4,5 e 3,5 horas.

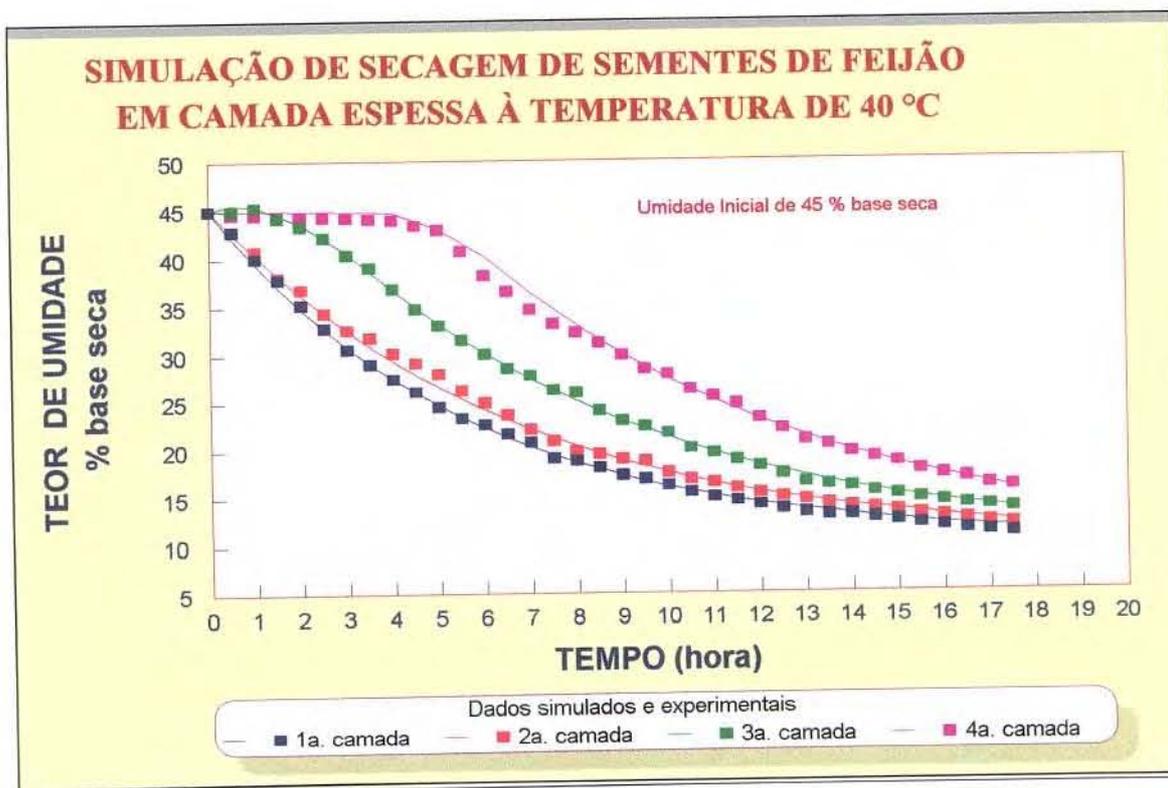


FIGURA 4.13 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.

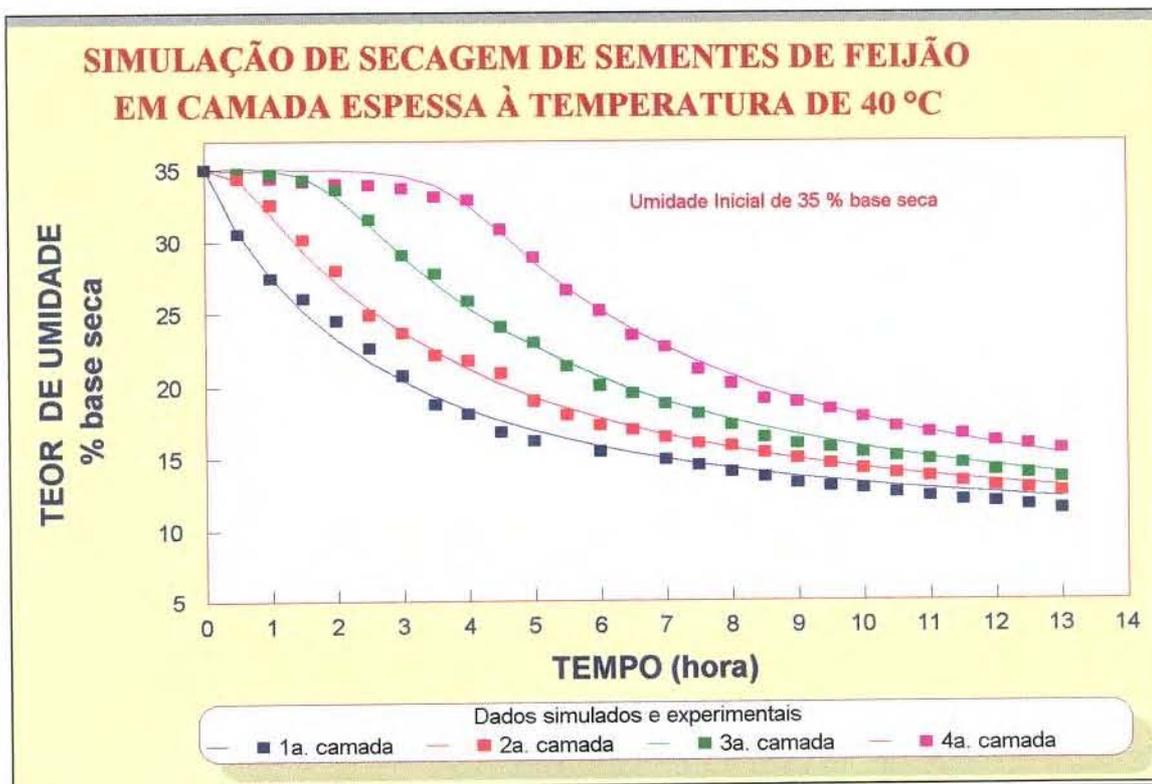


FIGURA 4.14 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa das sementes de feijão para a temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.

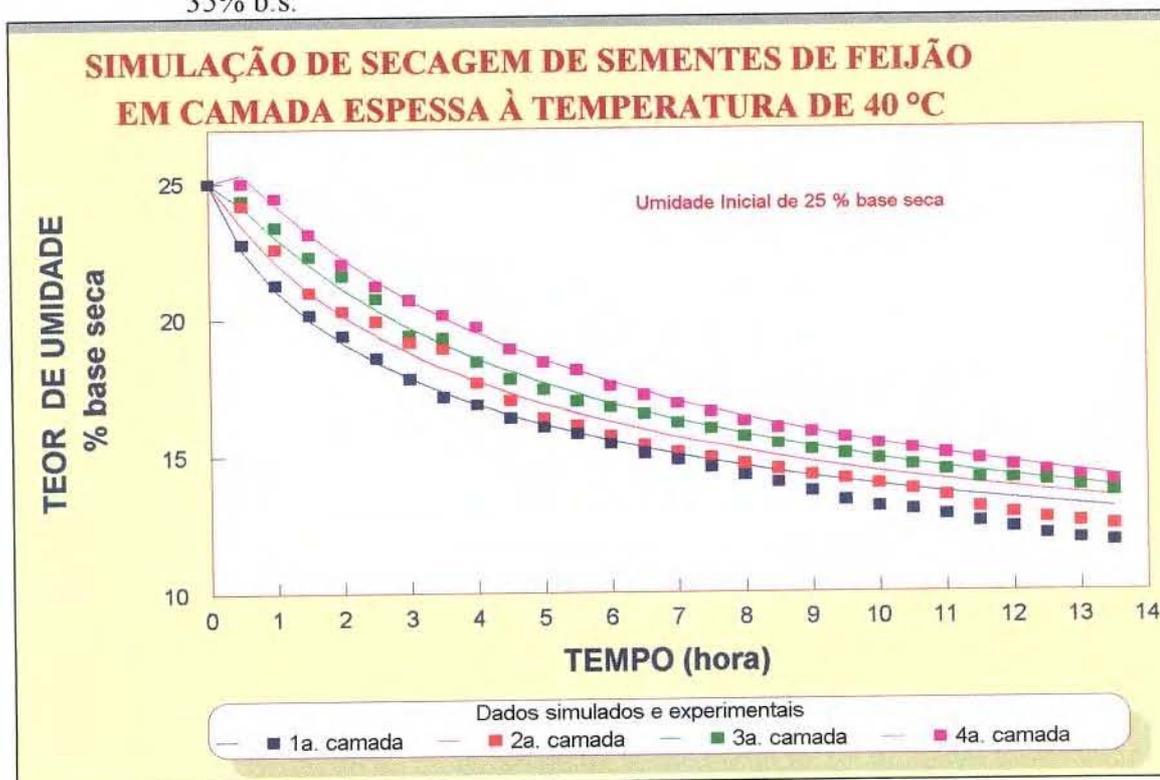


FIGURA 4.15 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 25% b.s.

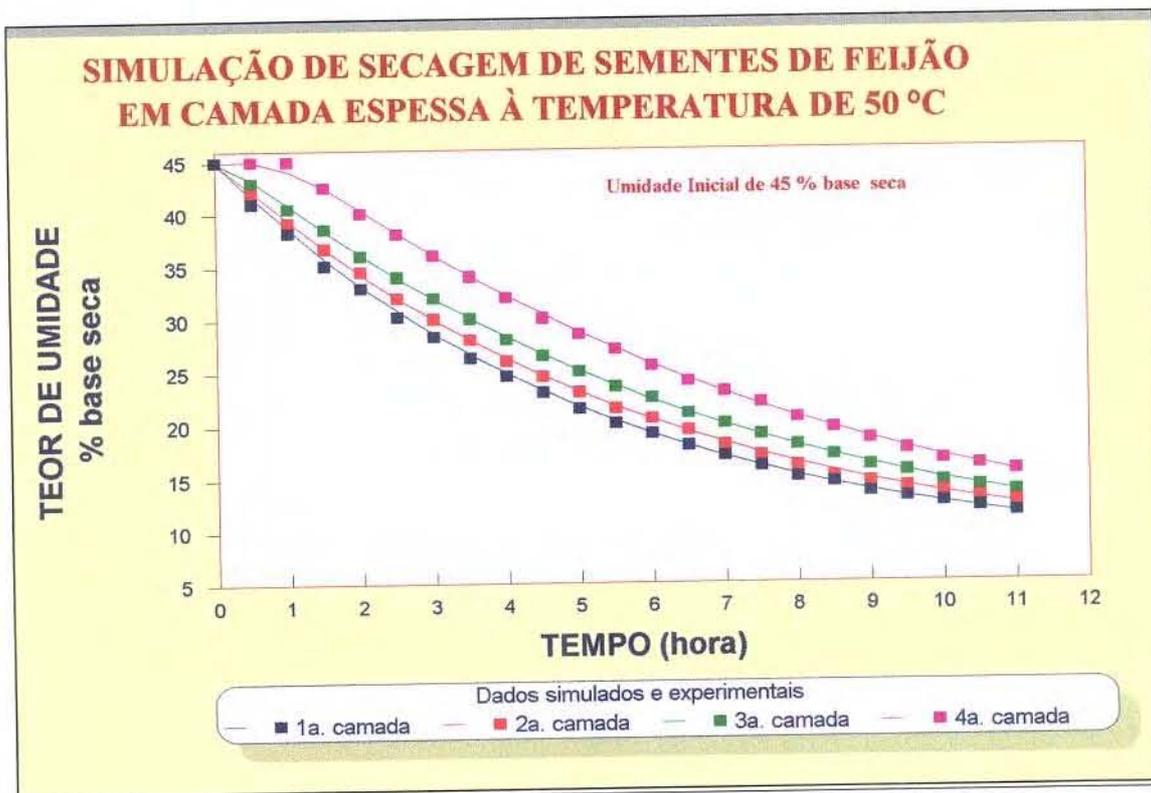


FIGURA 4.16 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 50 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.

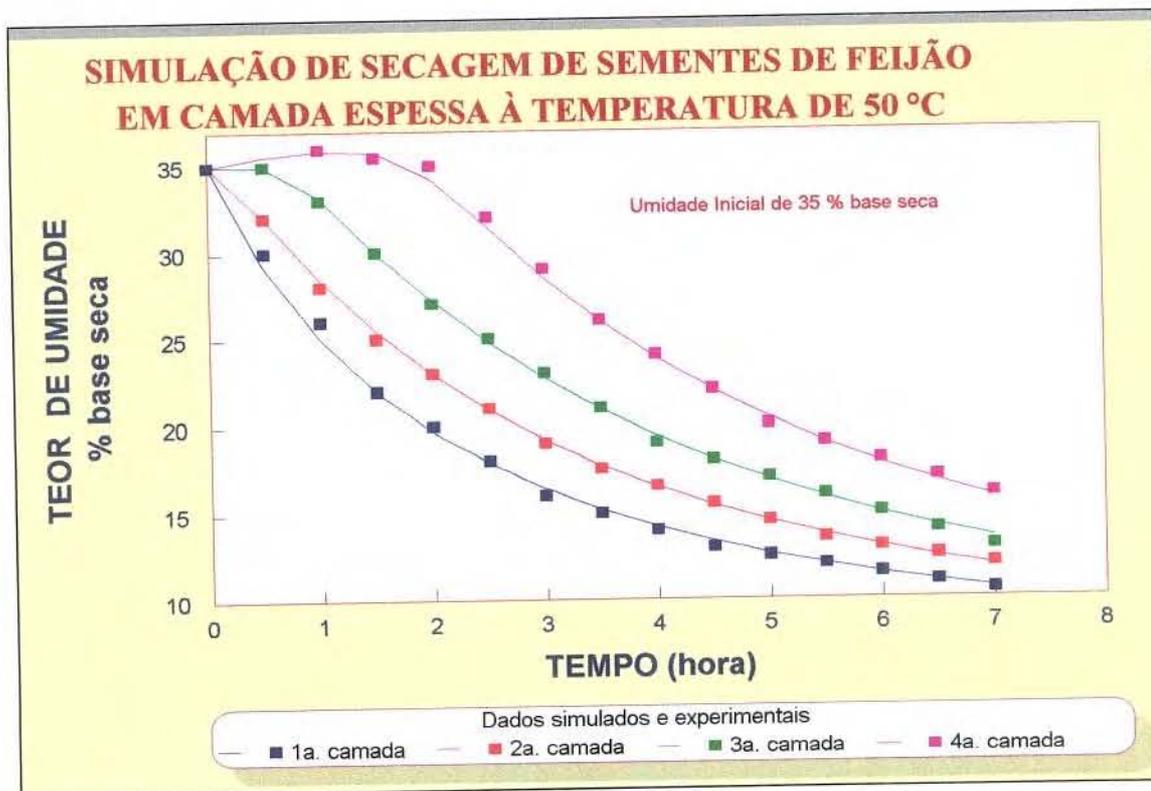


FIGURA 4.17 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 50 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.

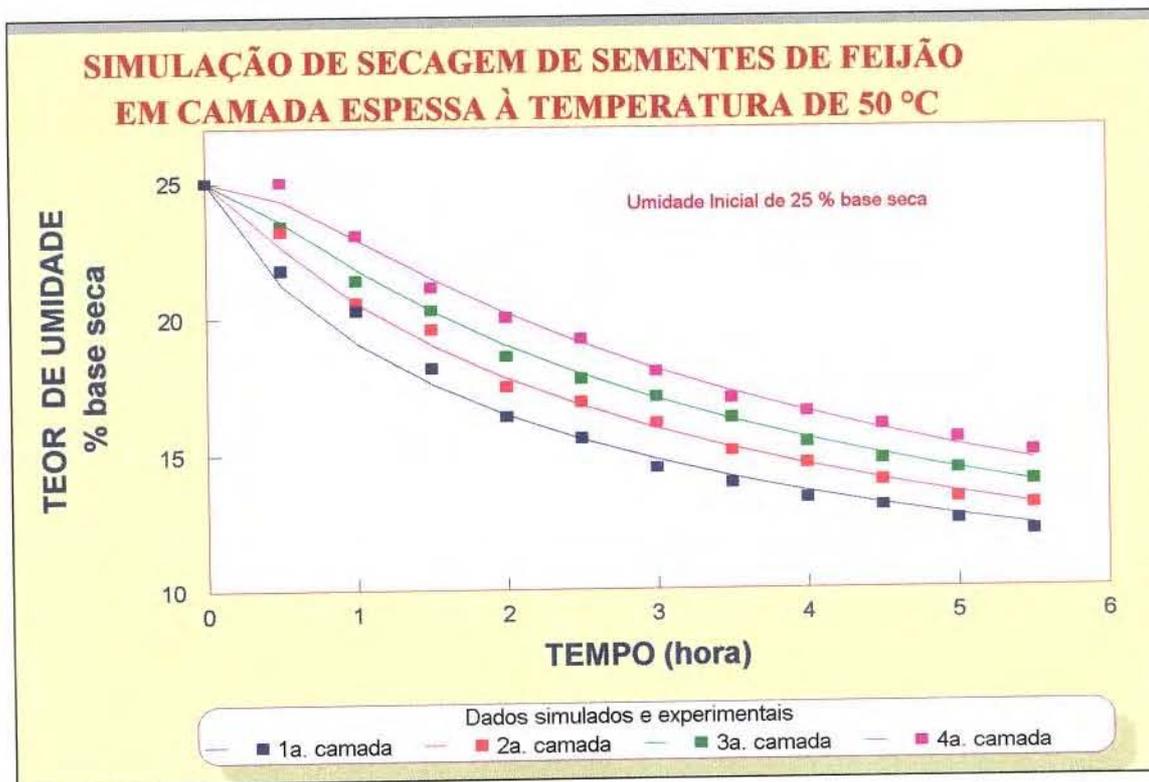


FIGURA 4.18 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 50 °C e teor de umidade inicial de 25% b.s.

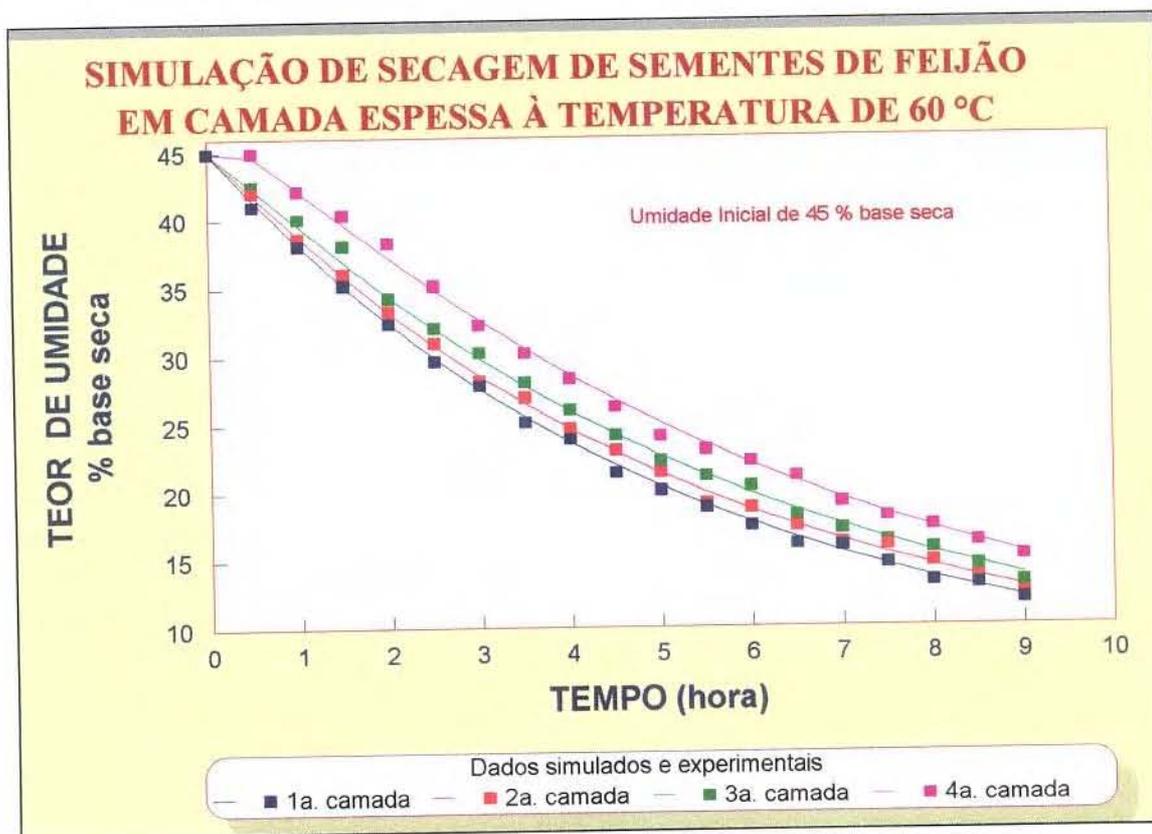


FIGURA 4.19 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 60 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.

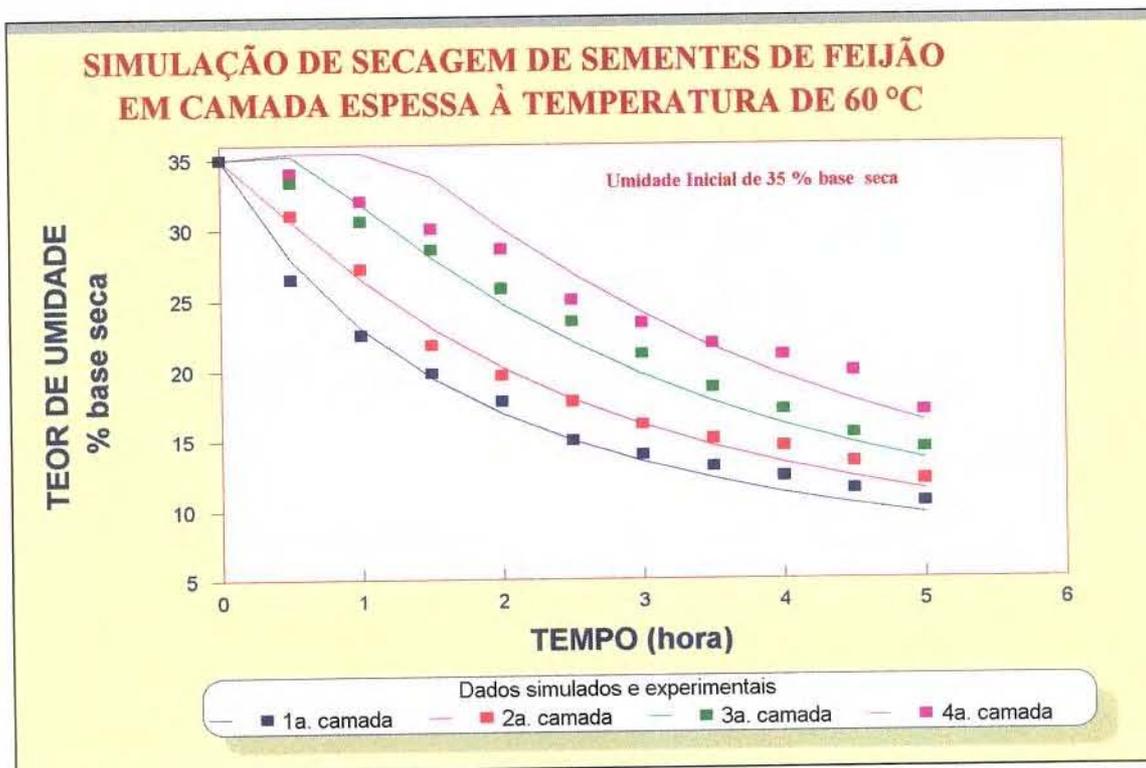


FIGURA 4.20 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 60 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.

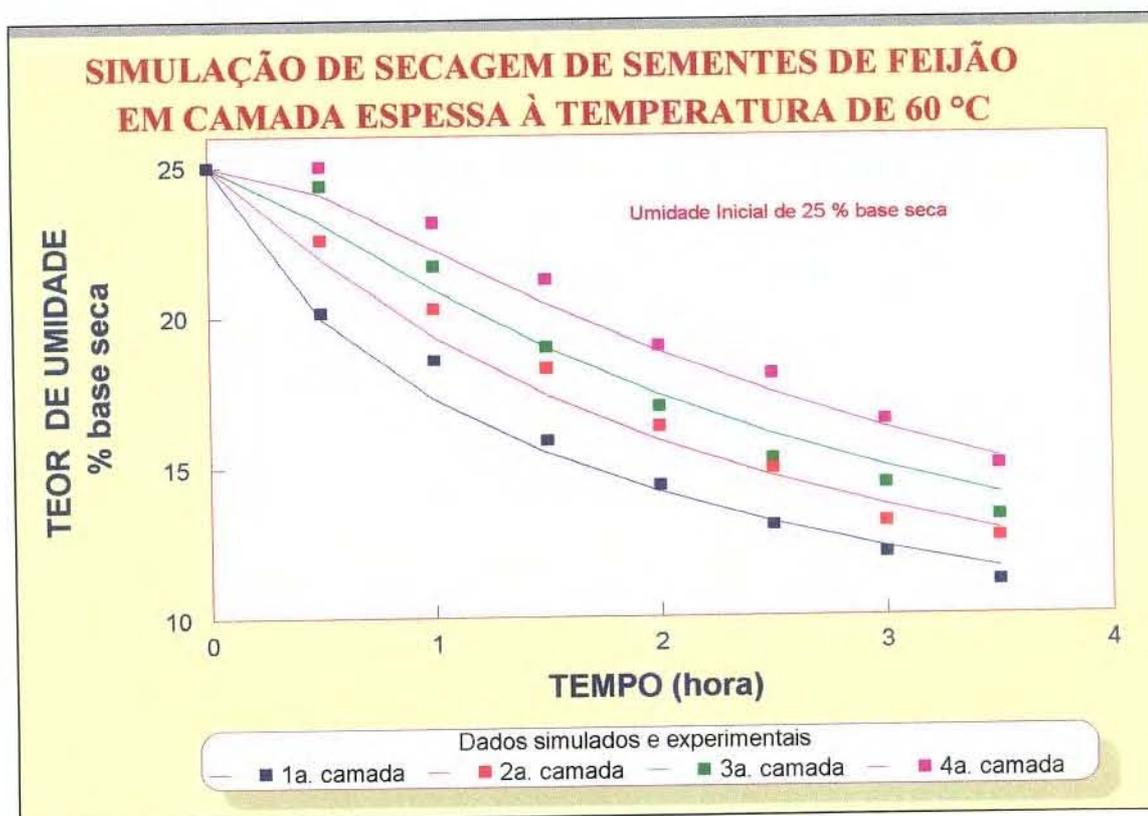


FIGURA 4.21 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 60 °C e teor de umidade inicial de 25% b.s.

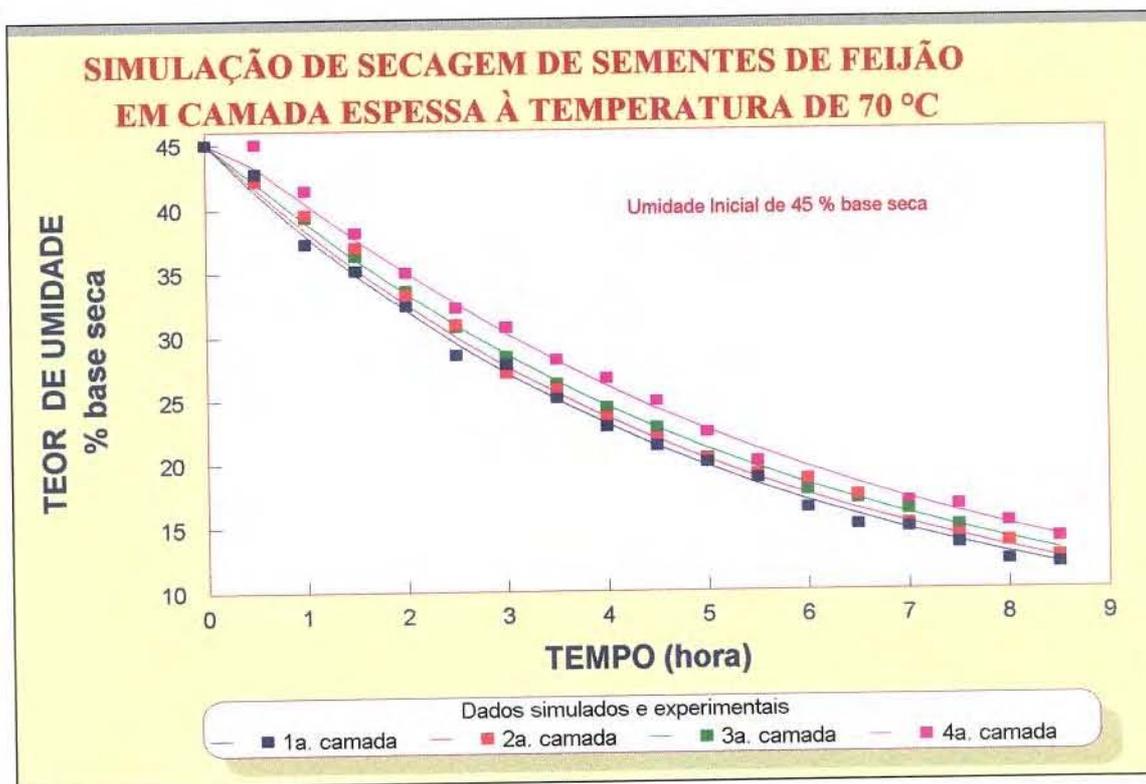


FIGURA 4.22 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 70 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.

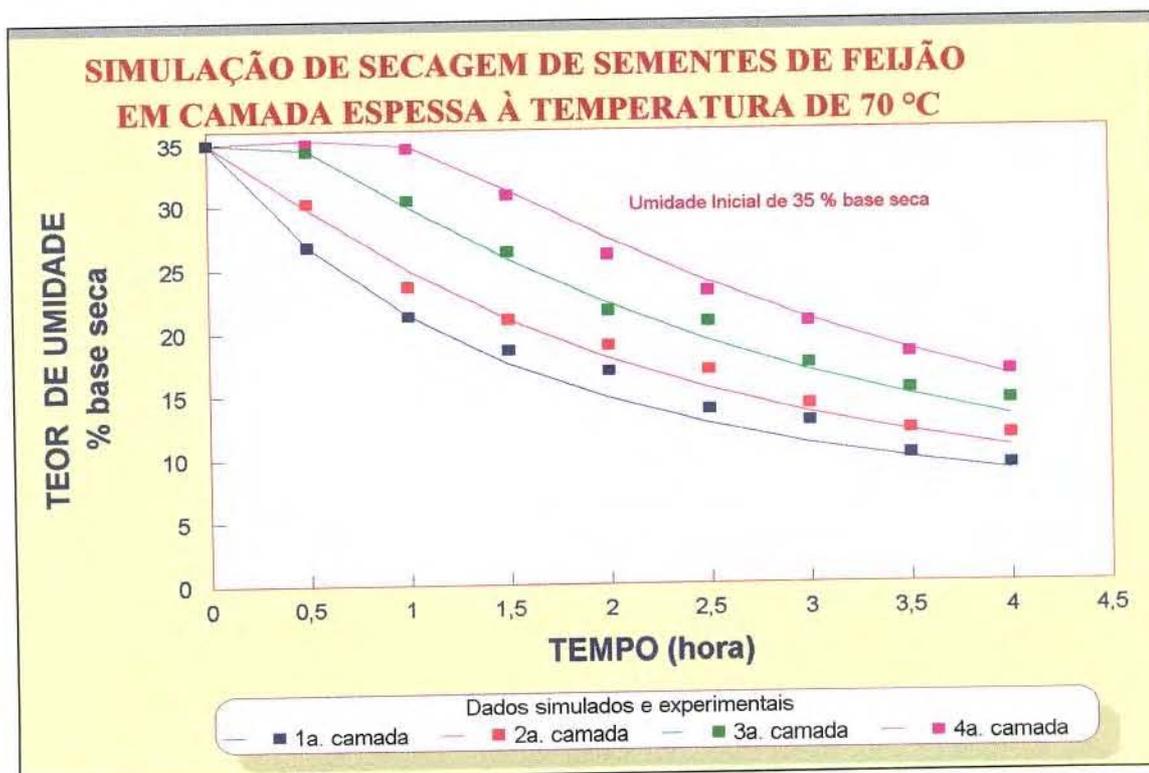


FIGURA 4.23 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 70 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.

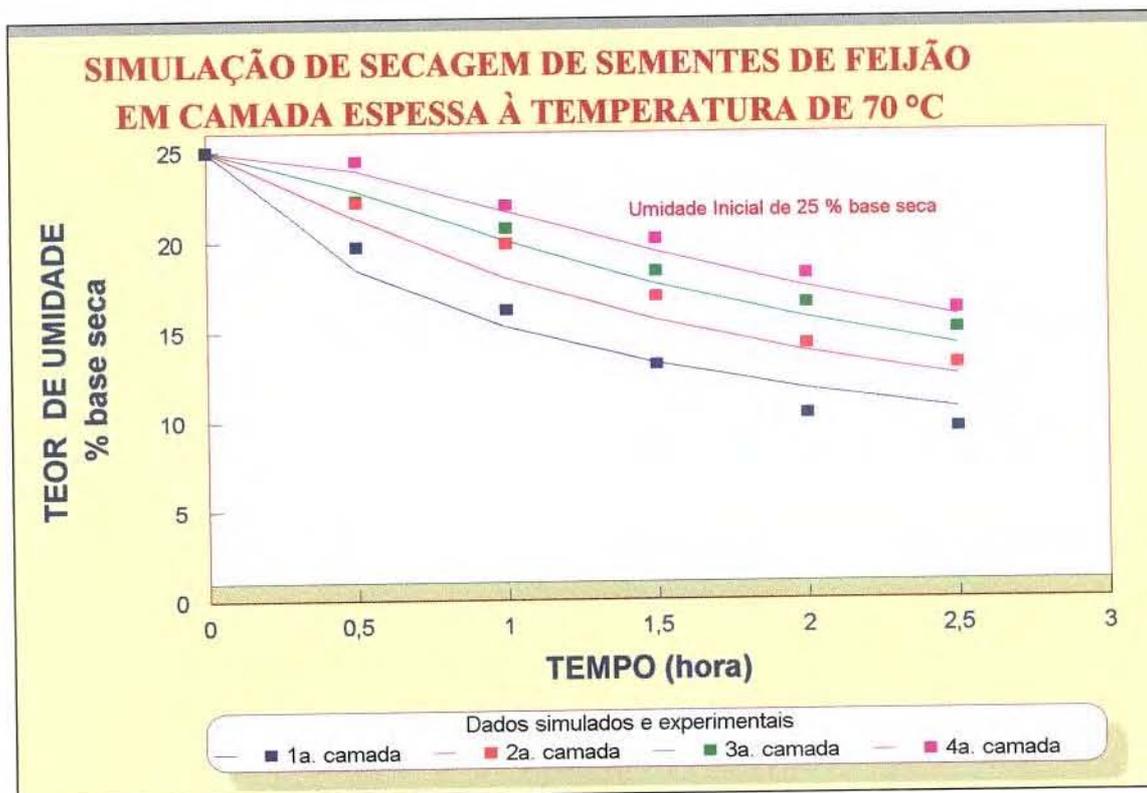


FIGURA 4.24 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 70 °C e teor de umidade inicial de 25% b.s.

Para a temperatura de 70 °C e teores de umidade inicial de 35 e 25 %, base seca, constata-se no final da secagem que, tanto para os dados experimentais como para os calculados, a camada superior no secador permanece com um teor de umidade próximo a 18,4 e 17,5%, base seca, que é crítico para a conservação do produto, podendo criar focos de deterioração durante a armazenagem do produto. Este fato mostra que, nem sempre para se secar o produto com maior rapidez, o aumento de temperatura é o procedimento eficaz e indicado. CAVALCANTI MATA (1992). Contudo, para um teor de umidade inicial de 45 %, base seca, este fato não se evidencia com esta magnitude, estando o teor de umidade das sementes na camada superior com aproximadamente 15 % b.s., que pode ser um valor aceitável para conservação, dependendo da temperatura e umidade relativa do local de armazenagem.

Esses resultados permite ressaltar a importância da simulação que proporciona a otimização da secagem de produtos e que projetos de secadores sejam elaborados com maior eficácia, fato este também apontado por diversos pesquisadores (THOMPSON, 1967; BAKKER-ARKEMA *et alii* 1974; BROOKER *et alii*, 1992 e MARTINS, 1988).

4.2. Temperaturas do ar de secagem para as condições experimentais e simuladas

Nas Tabelas 13 a 24 do Apêndice 4B estão os valores obtidos experimentalmente e os simulados das temperaturas do ar de secagem ao longo das camadas do secador.

Para todas as camadas desses experimento, não se verificam diferenças significativas, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de qui-quadrado, entre as temperaturas obtidas experimentalmente e as simuladas pelo Modelo de Thompson com as modificações das equações próprias para o feijão já especificadas nos itens anteriores.

As Figuras de 4.25 a 4.36 mostram os perfis dessas temperaturas em função do tempo, verificando-se que as curvas simuladas correspondem satisfatoriamente às experimentais, indicando que a equação de balanço de calor é eficaz para representar o processo, principalmente quando existe um bom isolamento térmico do secador. Os resultados satisfatórios confirmam as afirmações feitas por MANTOVANI (1976), QUEIROZ *et alii* (1981), SINÍCIO *et alii* (1986); GUIMARÃES *et alii* (1991); BERBERT (1991), 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, a utilização de equações próprias de cada produto e dentro do intervalo especificado e das condições de secagem nas quais essas equações foram desenvolvidas.

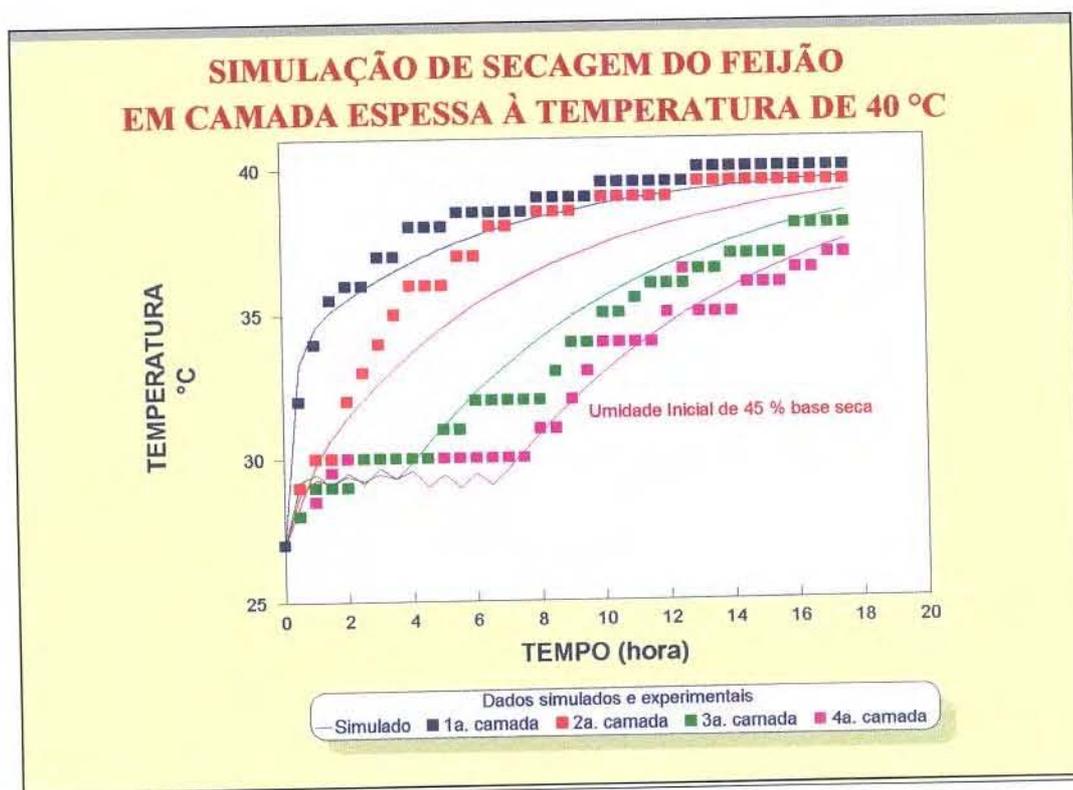


FIGURA 4.25 - Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.

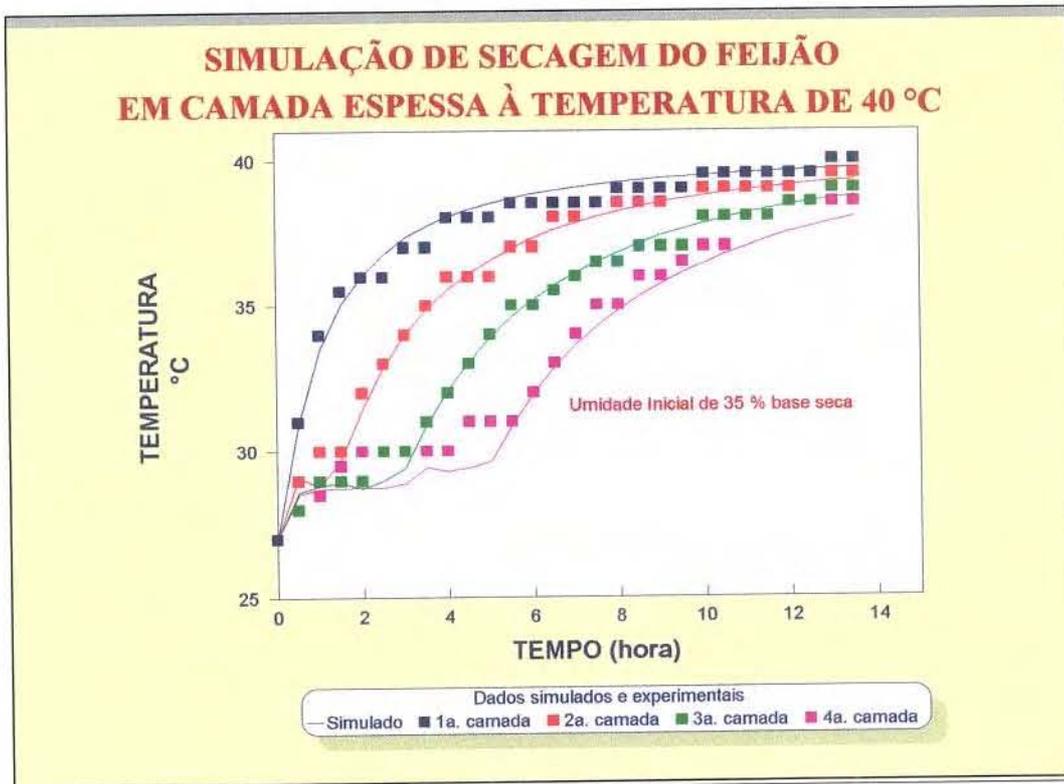


FIGURA 4.26 - Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.

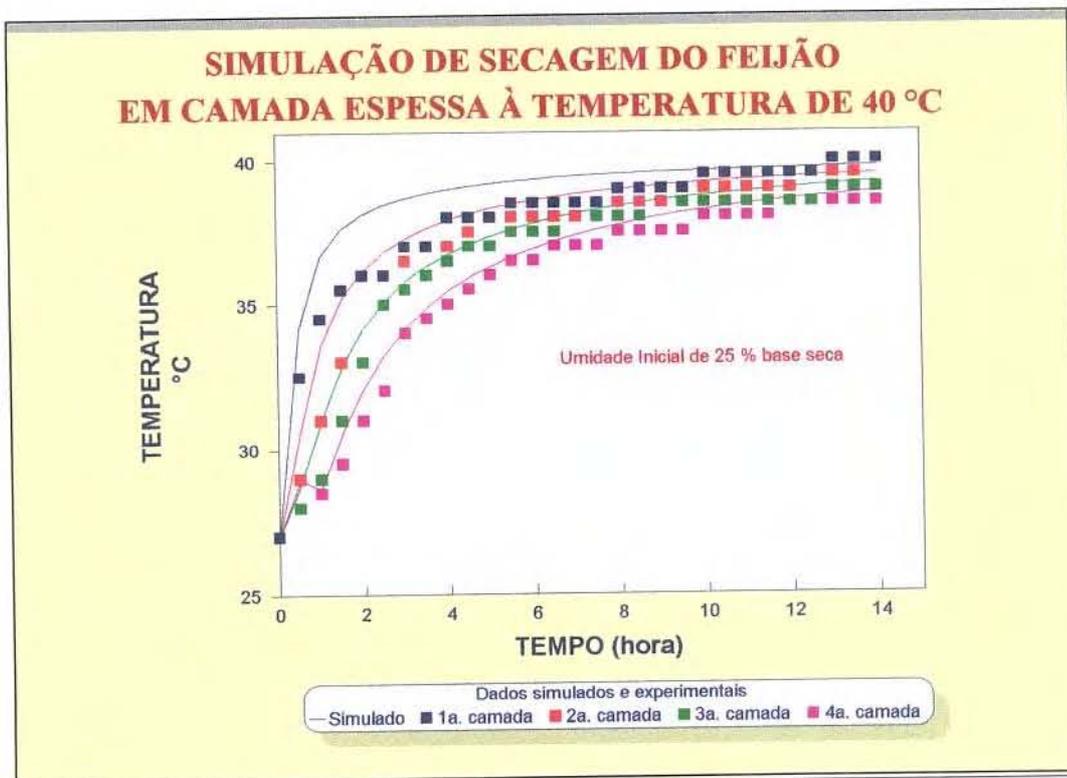


FIGURA 4.27 - Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 25% b.s.

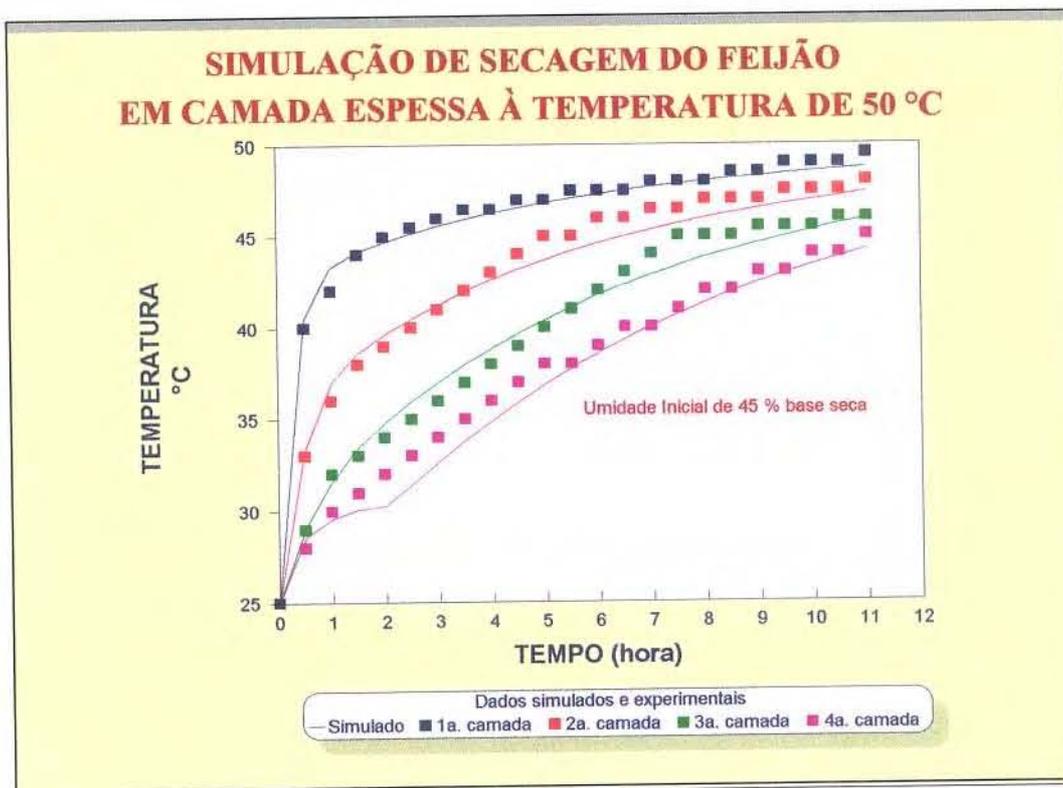


FIGURA 4.28 - Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 50 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.

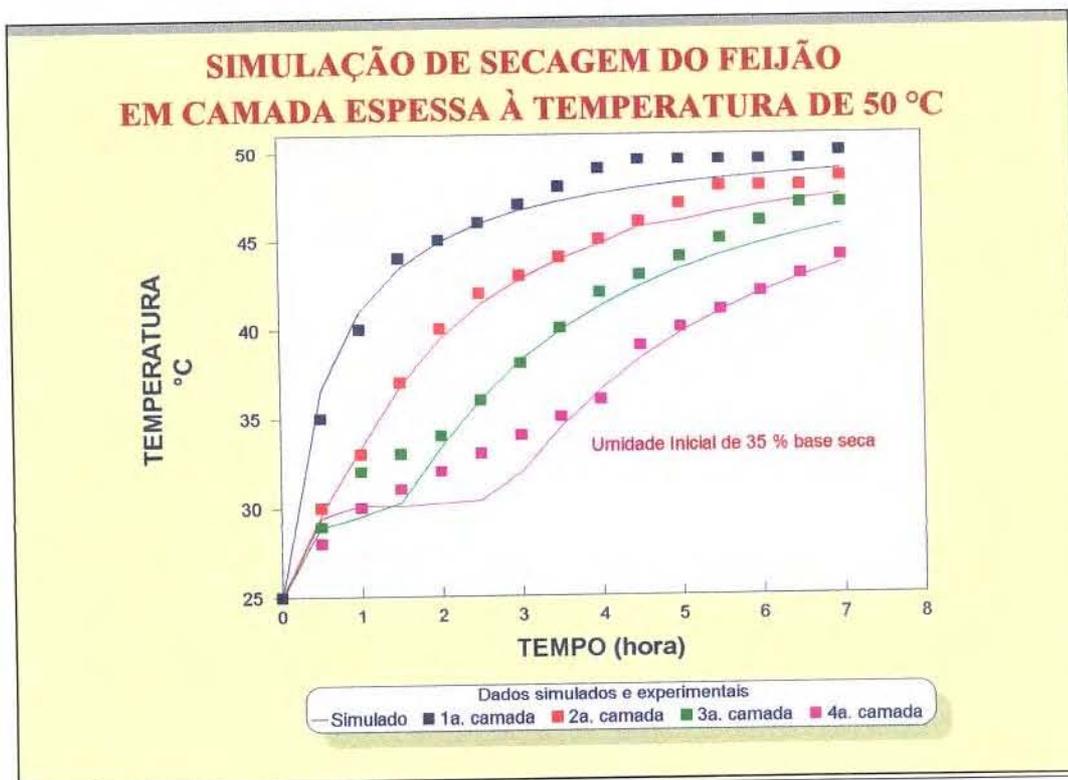


FIGURA 4.29 - Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 50 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.

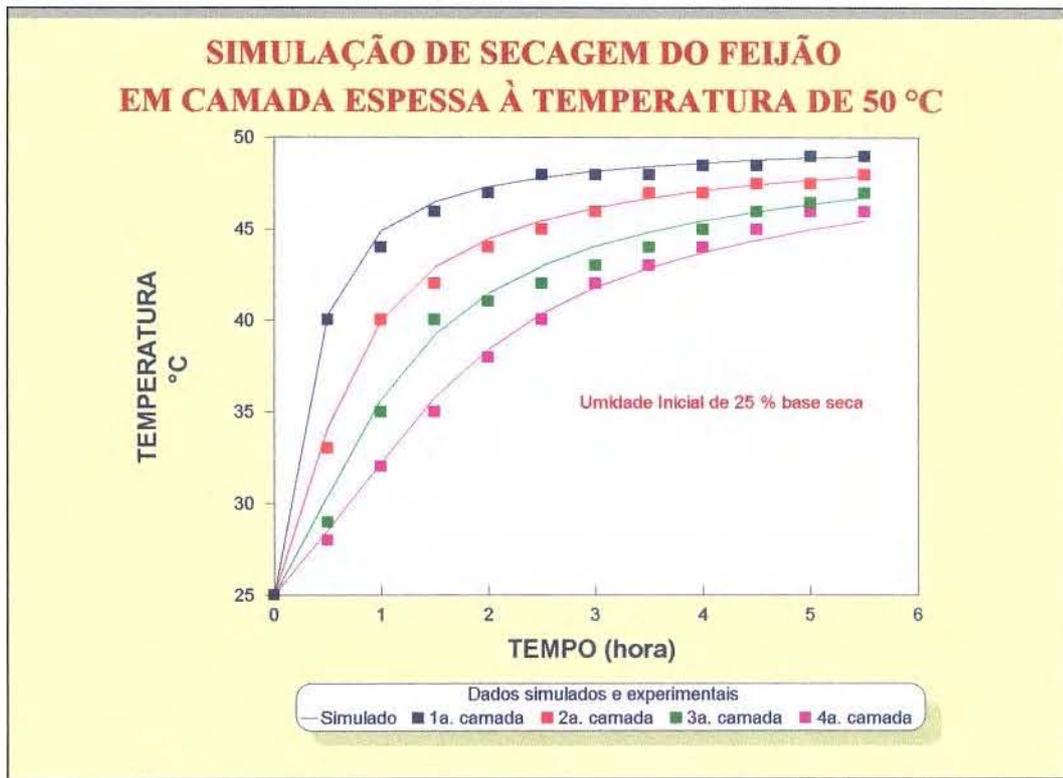


FIGURA 4.30 - Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 50 °C e teor de umidade inicial de 25% b.s.

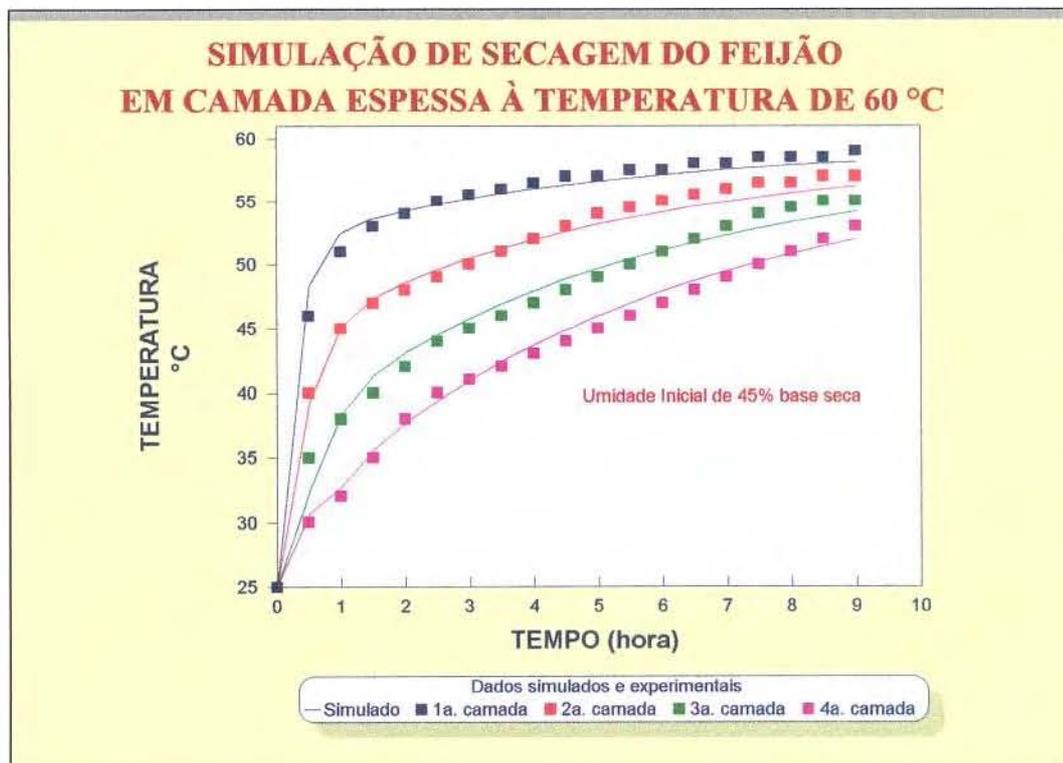


FIGURA 4.31 - Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 60 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.

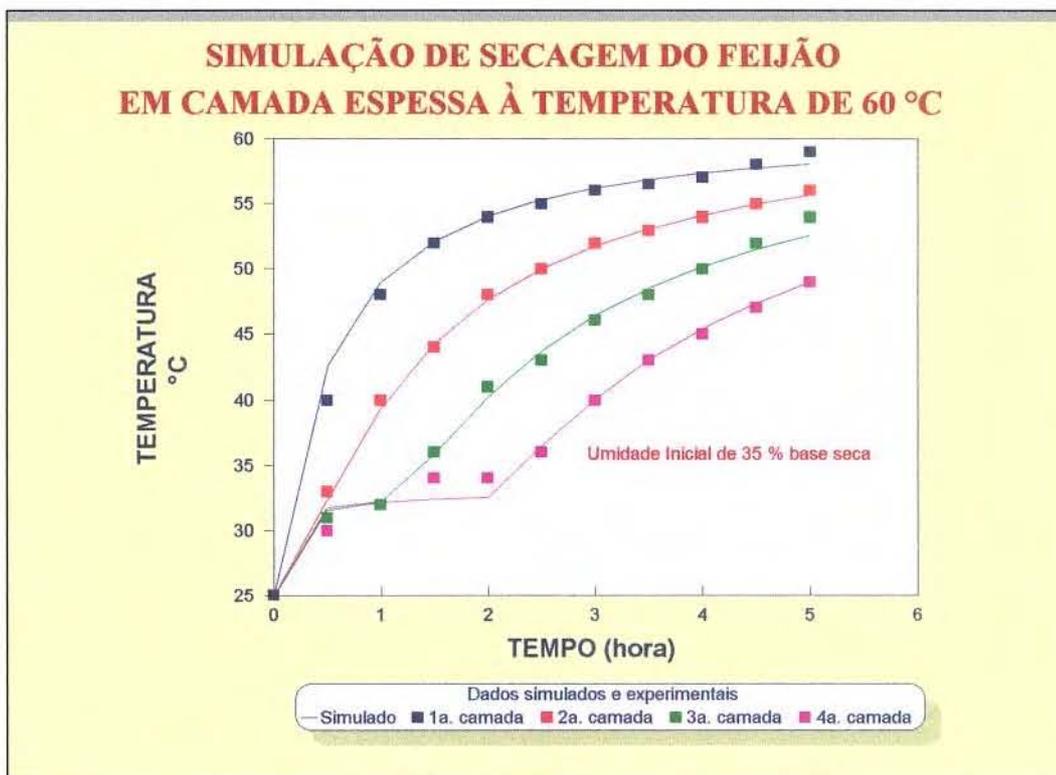


FIGURA 4.32 - Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 60 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.

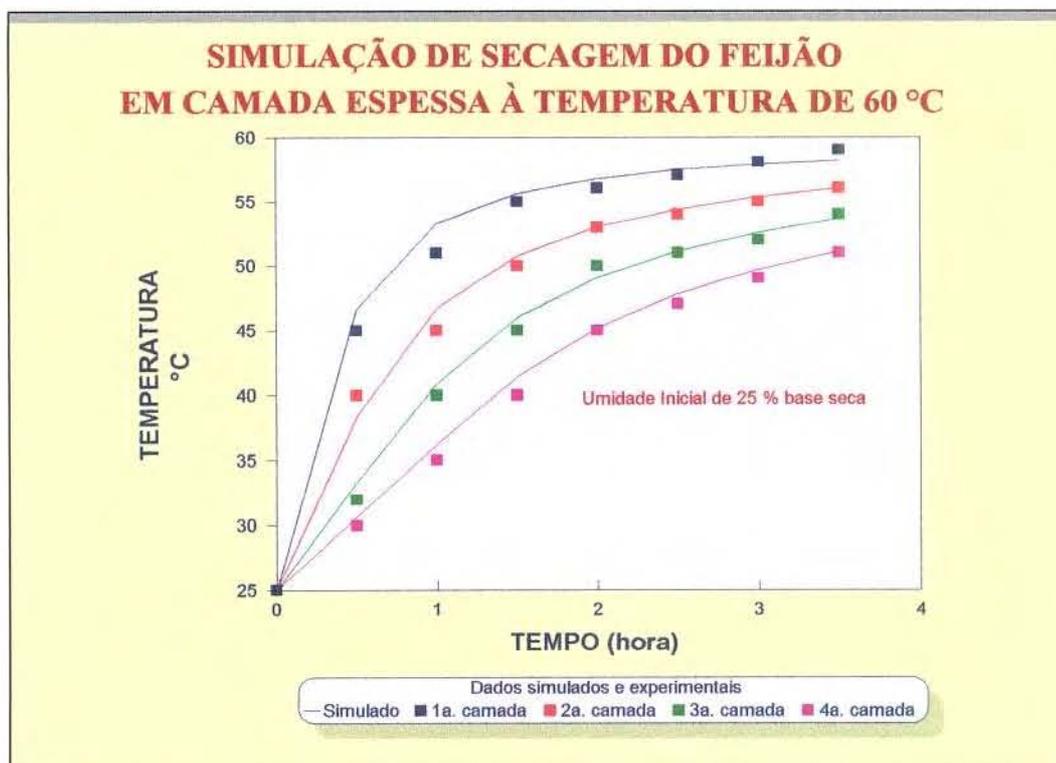


FIGURA 4.33 - Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 60 °C e teor de umidade inicial de 25% b.s.

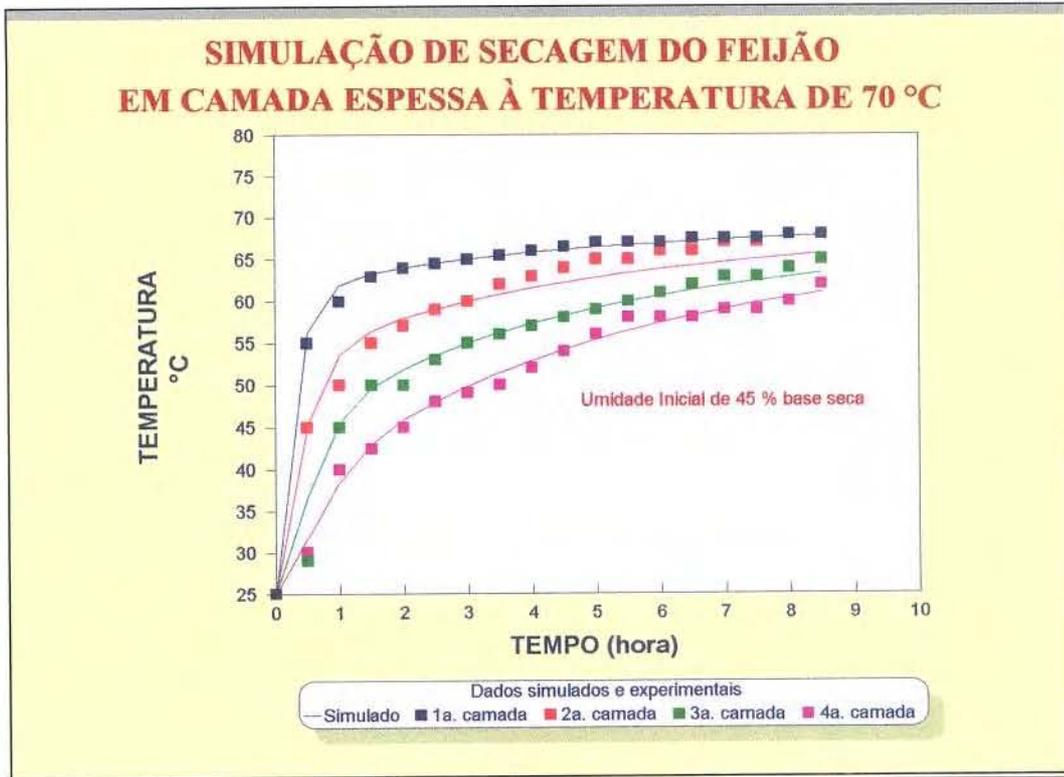


FIGURA 4.34 - Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 70 °C e teor de umidade inicial de 45% b.s.

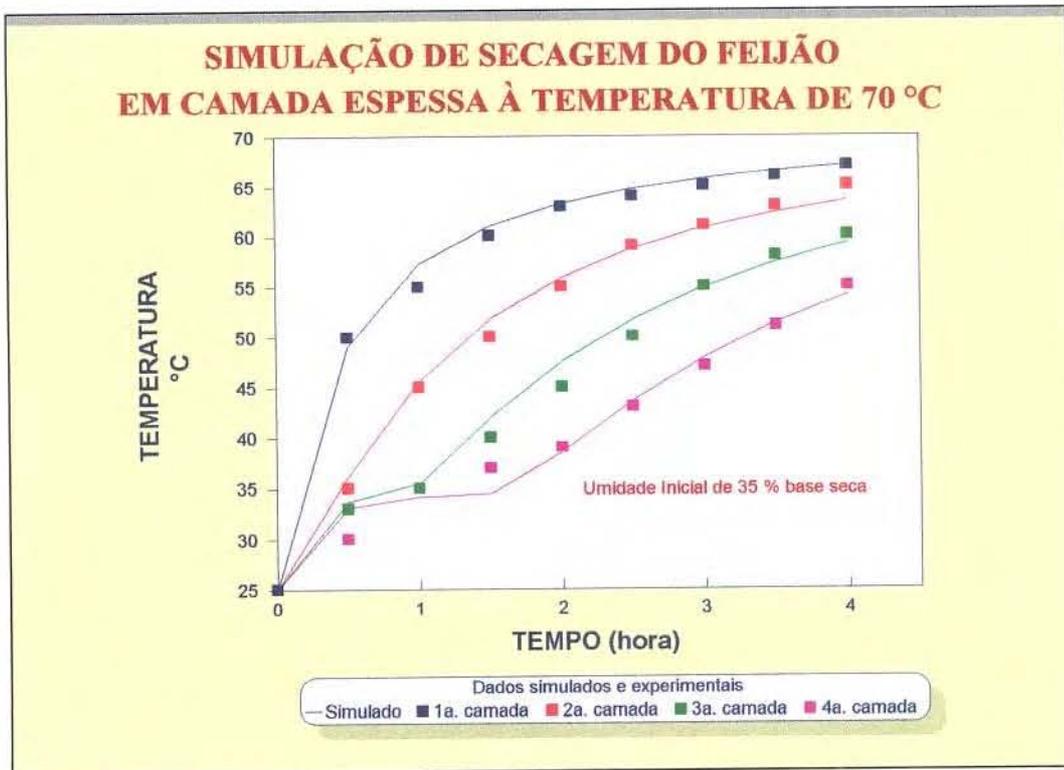


FIGURA 4.35 - Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 70 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.

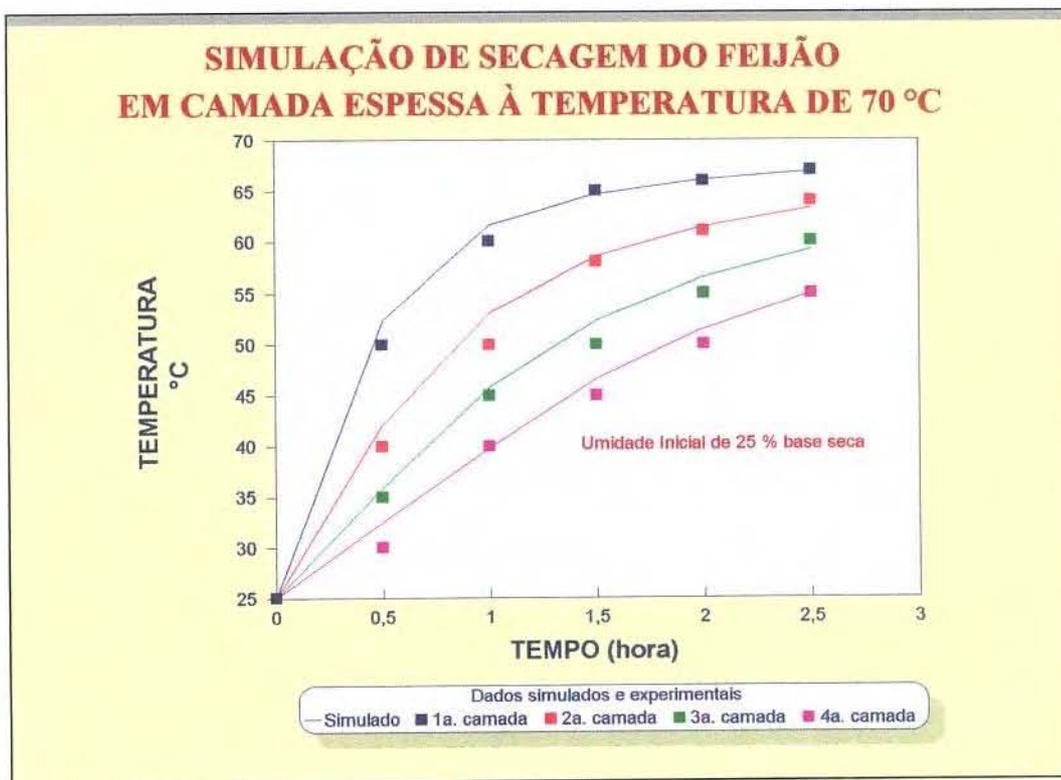


FIGURA 4.36 - Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa de sementes de feijão para a temperatura de 70 °C e teor de umidade inicial de 25% b.s.

4.3. Germinação e vigor das sementes secas em camada espessa

De cada camada do secador e para cada condição de secagem foi determinada após a secagem a germinação e o vigor das sementes e comparada com as equações de perda de germinação e vigor das sementes obtidas no Capítulo 3. Esses dados são mostrados na Tabela 4.2 e 4.3. As maiores discrepâncias encontradas são para as condições mais críticas de secagem a 70 °C e teor de umidade inicial das sementes de 45 % b.s., onde verifica-se para a germinação um valor experimental de 65,2% e calculado de 71,8%, e para o vigor um valor experimental de 32,2% e calculado de 53,5% .

De uma maneira geral, pode-se dizer que os valores experimentais estão bem próximos dos calculados pelas equações representadas nas Figuras 3.9 e 3.10, e que estas equações podem estimar as perdas da qualidade fisiológica das sementes de feijão “carioca” quando seca em camada espessa a altas temperaturas. A diferença entre os dados experimentais e calculados são inferiores a 4 pontos percentuais, exceto para as condições relatadas anteriormente e para o vigor à temperatura de 60 °C e teor de umidade inicial de 45 % b.s., onde observa-se uma diferença entre os dados experimentais e calculados de 5,2 pontos percentuais.

TABELA 4.2 - Germinação das sementes de feijão para cada espessura de camada do secador depois da secagem às temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C a partir dos teores de umidade inicial de 45, 35, e 25 % b.s. até um teor médio de 13,5 % b.s.

Temperatura (°C)	Umidade Inicial % b.s.	Germinação Camada do Secador									
		1a		2a		3a.		4a.		Média	
		exp.	calc.	exp.	calc.	exp.	calc.	exp.	calc.	exp.	calc.
40	45	97,0	94,6	97,0	94,8	98,0	94,8	90,0	94,9	95,5	94,8
	35	98,0	95,3	98,0	95,4	97,0	95,8	92,0	95,9	96,3	95,6
	25	96,0	95,5	98,0	95,6	97,0	95,8	97,0	95,9	97,0	95,7
50	45	90,0	91,2	91,0	92,8	97,0	94,5	96,0	95,1	93,5	93,4
	35	93,0	94,2	95,0	94,9	96,0	95,5	96,0	95,7	95,0	95,1
	25	93,7	95,0	94,0	95,2	95,0	95,6	96,0	95,7	94,7	95,5
60	45	74,0	79,1	79,0	85,0	90,0	90,8	92,0	93,4	84,3	87,1
	35	89,0	91,0	93,0	93,4	94,0	94,5	96,0	95,6	93,0	93,6
	25	93,0	94,0	94,0	95,0	94,0	95,3	96,0	95,7	94,3	95,0
70	45	44,0	49,1	60,0	70,4	77,7	82,7	83,0	85,0	65,2	71,8
	35	80,0	87,0	88,0	91,1	90,0	94,1	94,0	95,4	88,0	91,9
	25	90,0	89,1	92,0	94,5	92,0	95,2	94,0	95,6	92,0	93,6

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 é interessante observar que, na secagem conduzida a 40 °C e teores de umidade inicial de 45 e 35% b.s., existe uma diminuição do poder germinativo e do vigor das sementes na camada superior (4ª camada), embora, em termos de média, essas diferenças sejam inferiores a 2 pontos percentuais entre os dados experimentais e calculados. É possível constatar também que essa perda de germinação e vigor corresponde ao tempo em que essas sementes ficam sem secar nas camadas superiores, sendo 6 horas para o teor de umidade inicial de 45% b.s. (Figura 4.13) e 4 horas para o teor de umidade inicial de 35 % b.s. (Figura 4.14). Esta é uma das razões da importância da simulação, que permite prever não só esta situação, mas outras em que este processo pode se repetir. Portanto, este fato permite corroborar com BAUGMMAN *et alii* (1971) e ALAN e SHOVE (1973) os quais afirmam que a simulação, quando representativa do processo, permite prever situações indesejáveis e determinar quais as melhores condições de secagem para um determinado produto, poupando-se tempo e custos.

TABELA 4.3 - Vigor das sementes de feijão para cada espessura de camada do secador depois da secagem às temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C a partir dos teores de umidade inicial de 45, 35, e 25 % b.s. até um teor médio de 13,5 % b.s.

Temperatura (°C)	Umidade Inicial % b.s.	Vigor									
		Camada do Secador									
		1a		2a		3a.		4a.		Média	
		exp.	calc.	exp.	calc.	exp.	calc.	exp.	calc.	exp.	calc.
40	45	91,1	90,3	90,7	90,0	87,0	88,3	84,3	88,0	88,3	89,2
	35	91,8	91,3	90,1	90,7	89,3	90,0	88,7	89,7	89,9	90,4
	25	89,7	90,3	89,9	90,3	91,2	90,7	91,3	90,7	90,5	90,5
50	45	75,3	73,3	80,9	79,0	86,6	80,3	88,4	83,0	82,8	78,9
	35	85,0	84,3	87,8	87,0	89,3	88,0	90,6	88,7	88,2	87,0
	25	88,0	87,0	89,3	89,3	89,7	89,7	90,7	90,0	89,4	89,0
60	45	43,1	56,3	71,1	73,7	76,4	79,7	79,9	81,3	67,6	72,8
	35	76,4	73,7	83,3	83,7	87,5	90,3	90,5	91,7	84,8	84,9
	25	85,3	87,0	88,3	90,0	89,1	90,7	90,5	90,7	88,3	89,6
70	45	0,0	27,1	14,0	53,4	53,2	65,7	61,7	67,7	32,2	53,5
	35	59,2	60,0	76,3	73,7	85,2	83,3	88,3	90,3	77,3	76,8
	25	79,4	80,7	82,7	84,3	87,7	90,3	89,6	91,3	84,8	86,7

Das Tabelas 4.2 e 4.3 é possível afirmar que a secagem de sementes poder ser conduzida a temperaturas mais elevadas que a qualidade fisiológica não será afetada imediatamente depois da secagem. No entanto, é preciso respeitar o tempo de residência no secador à estas temperaturas acima de 40 °C, e o teor de umidade inicial das sementes a serem secas. Destas tabelas pode-se ainda observar que a secagem em camada espessa a 50 °C pode ser feita sem que haja perda da qualidade fisiológica, pois observa-se que na camada as sementes dificilmente atingem 50 °C por um tempo muito prolongado. Observa-se também que é preferível secar as sementes com um teor de umidade inicial menor que 45 %, pois a maior umidade significa maior tempo de residência no secador, o que é indesejável.

Para a secagem à temperatura de 60 °C pode-se dizer que o efeito do teor de umidade inicial já passa a afetar a qualidade fisiológica das sementes e que para o teor de umidade inicial de 45% b.s. a secagem não deve ser feita completamente a esta temperatura, pois o seu poder germinativo cairá de 96 para 84,3% e o seu vigor de 92% para 67,6%. Para o teor de umidade inicial de 25 % b.s. a secagem pode ser feita até 13,5 % b.s. que a qualidade fisiológica praticamente não será afetada, pois a sua germinação estará em torno de 94,3%, enquanto que seu vigor será de 88,3%. Para o teor de umidade inicial de 35 % b.s., a diminuição da germinação não é tão acentuada, pois a perda de germinação se dá de 96% para 93%. No entanto, o seu vigor cai de 92 % para 84,8%, dando um indicativo que já para este teor de umidade inicial a secagem a 60 °C começa afetar a qualidade fisiológica das sementes como um todo.

Na secagem à temperatura de 70 °C observa-se que existe uma diminuição da qualidade fisiológica das sementes para todos os teores de umidade inicial, e a pior condição é para o teor de umidade inicial de 45 % b.s., o que já era previsto, já que para este teor de umidade inicial o tempo de residência no secador é maior. Neste caso, a germinação cai de 96% para 65,2% e o vigor de 92 para 32,2%. Para a secagem conduzida a esta temperatura e teor de umidade inicial de 35% b.s., a diminuição da germinação é de 96 % para 88,0 % e o vigor de 92% para 77,3 %, indicando que, embora a germinação das sementes não seja tão afetada o seu vigor é substancialmente afetado, refletindo a ação indesejável da temperatura na qualidade fisiológica do produto. Ao analisar-se a secagem a 70 °C com teor de umidade inicial de 25% b.s., em comparação com os teores de umidade inicial de 45 e 35 % b.s. verifica-se que o teor de umidade inicial é um dos fatores que afeta a qualidade fisiológica das sementes, quando secas a altas temperaturas, pois secando-se com este teor de umidade inicial de 25 % b.s., a germinação cai de 96 para 92,0 % e o vigor de 92 para 84,8 %, que são padrões aceitáveis na comercialização de sementes de alto padrão de qualidade. No entanto, existe um forte indicativo que estas sementes foram afetadas pela ação da temperatura, pois o vigor caiu mais acentuadamente e, durante o armazenamento das sementes de feijão, este efeito poderá ser evidenciado.

É preciso ressaltar que a temperatura de secagem aqui indicada é a temperatura do plenum do secador ou seja antes do ar entrar na câmara de secagem, e é bem diferente do observado em alguns secadores onde o termômetro é colocado na câmara do secador, pois se a leitura, neste caso, for de 70 °C isto implica que a temperatura do ar de secagem é bem superior a este valor.

4.4. Simulação e secagem de sementes em camada espessa a altas temperaturas por curtos períodos de tempo

Diante da análise dos resultados no item 4.3 foram selecionadas 3 condições de secagem em camada espessa a temperaturas consideradas elevadas para verificar se, com base na simulação e nos indicativos do tempo de residência no secador, é possível secar sementes a altas temperaturas por determinados períodos de tempo. As condições selecionadas foram:

Secagem a 70 °C por 1,0 hora e secagem complementar a 40 °C- Umidade inicial de 25 % b.s.

Secagem a 60 °C por 1,5 horas e secagem complementar a 40 °C- Umidade inicial de 25 % b.s.

Secagem a 60 °C por 2,5 horas e secagem complementar a 40 °C- Umidade inicial de 35 % b.s.

Na Tabela 4.4 encontram-se os valores de germinação e vigor das sementes de feijão para cada espessura de camada do secador de camada estacionária depois das secagens conduzidas nas temperaturas e teores de umidade inicial aqui descritos. Observa-se nesta tabela que é possível conduzir a secagem de sementes a altas temperaturas, desde que o tempo de residência no secador não ultrapasse o tempo necessário onde as sementes começam a ser afetadas pela alta temperatura. Considerando a secagem à temperatura de 70 °C por uma hora e teor de umidade inicial de 25% b.s., observa-se na Figura 3.36 que depois de uma hora de secagem, a 2^a, 3^a e 4^a camadas não chegam a atingir a temperatura de 50 °C e a primeira camada atinge 60 °C por um período muito curto. Este fato explica do porque a qualidade fisiológica de sementes não é afetada com o uso da temperatura considerada elevada. É interessante observar também que, se for considerado o tempo total de duração da secagem a 70 °C e secagem complementar a 40 °C, tem-se um total de 9 horas de secagem. No entanto, se for utilizada uma secagem complementar a 40 °C do teor de umidade inicial de 18,6 % b.s. até 13,5% b.s. o tempo de secagem será de 10 horas, indicando uma diminuição do tempo total de seca-

gem de 2 horas. Na realidade isto se dá devido a um gradiente de energia entre a secagem a temperatura de 70 °C e a temperatura da etapa seguinte que é de 40 °C. Esta energia intermediária é utilizada na secagem e, portanto, esta secagem se dá mais rápida do que a simulada.

TABELA 4.4 - Germinação e vigor das sementes de feijão, para cada espessura de camada do secador depois das secagens às temperaturas de 70 °C por uma hora e teor de umidade inicial de 25% b.s., 60 °C por 1,5 horas e 2,5 horas e teores de umidade inicial, respectivamente, de 35 e 25 % b.s., com secagem complementar a 40 °C até um teor de umidade médio de 13,5 % b.s.

		Germinação				
Temperatura	Umidade Inicial	Camada do Secador				
(°C)	% b.s.	1a	2a	3a.	4a.	Média
		exp.	exp.	exp.	exp.	exp.
70-1h / 40-8h	25	92,1	95,7	96,0	96,3	95,0
60-1,5hs/40-7,5h	25	92,7	95,3	95,3	96,7	95,0
60-2,5hs/40-7,5h	35	92,7	95,0	95,7	96,3	94,8
		Vigor				
Temperatura	Umidade Inicial	Camada do Secador				
(°C)	% b.s.	1a	2a	3a.	4a.	Média
		exp.	exp.	exp.	exp.	exp.
70-1h / 40-8h	25	88,1	90,7	91,0	91,3	90,3
60-1,5hs/40-7,5h	25	90,7	90,3	90,3	91,7	90,7
60-2,5hs/40-7,5h	35	89,7	91,0	90,7	90,3	90,4

O fato de poder utilizar temperaturas mais elevadas por curtos períodos de tempo, sem que a qualidade fisiológica das sementes seja afetada, parece ser um forte indício de que o processo de seca-aeração poderia ser também implementado para sementes só que com temperaturas inferiores a 90 °C. Pelo aqui estudado, a temperatura alta a ser utilizada no processo de seca-aeração para sementes poderia ser 70 °C. Este processo, até então, não foi estudado para secagem de sementes, podendo ser uma nova idéia a ser estudada em futuros trabalhos.

Na Tabela 4.4 as secagens conduzidas à temperatura de 60 °C por 1,5 horas e teor de umidade inicial das sementes de 25 % b.s. e a 60 °C por 2,5 horas e teor de umidade inicial das sementes de 35 % b.s., não afetaram a qualidade fisiológica das sementes de feijão, indicando que, para estas condições, as secagens podem ser feitas por estes curtos períodos tempo e secagem complementar a 40 °C até um teor de umidade médio de 13,5 % b.s., que estas sementes de feijão não serão afetadas na sua qualidade fisiológica.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos neste capítulo conclui-se que:

- Tanto os dados do teor de umidade das sementes de feijão quanto os de temperatura simulados pelo SASG 5.0 acompanham os dados obtidos experimentalmente, verificando-se que a diferença entre esses valores não são significativas ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de qui-quadrado.
- A compatibilidade entre os dados experimentais e os simulados comprovam a validade do modelo de Thompson para secagem de sementes em camada espessa dentro de uma faixa de temperatura de 40 a 70 °C e teor de umidade inicial das sementes de 45 a 25 % base seca, sendo que as equações de dessecamento, calor latente de vaporização, calor específico e de secagem em camada delgada específicas para este produto, e determinadas neste trabalho, são as principais responsáveis por esta validade.
- As secagens de sementes de feijão em camada espessa podem ser feitas a altas temperaturas por determinados períodos de tempo, sem que seja diminuída sua qualidade fisiológica, desde que respeitado o tempo de residência máximo que estas podem ficar no secador, para que a sua qualidade não seja diminuída, obtido para camada delgada no Capítulo 3.
- As secagens de sementes de feijão em camada espessa a uma temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 45, 35 e 25 % b.s.; 50 °C e teor de umidade inicial de 35 e 25 % b.s. e à temperatura de 60 °C e teor de umidade inicial de 25 % b.s., podem ser feitas que a sua qualidade fisiológica não será afetada.
- As secagens de sementes de feijão em camada espessa, feitas a uma temperatura de 70 °C e teor de umidade inicial de 45, 35 e 25 % b.s.; 60 °C e teor de umidade inicial de 45 e 35% b.s. e à temperatura de 50 °C e teor de umidade inicial de 45 % b.s., afetam a sua qualidade fisiológica.
- A secagem de sementes de feijão em camada espessa podem ser feitas à temperatura de 70 °C por uma hora e teor de umidade inicial de 25% b.s.; ou a 60 °C por uma hora e meia (1,5 h.) e teor de umidade inicial de 25 % b.s. ou ainda a 60 °C por duas horas e meia (2,5 h.) e teor de umidade inicial de 35% b.s., com secagem complementar a 40 °C até o teor de umidade de 13,5 % b.s., que as sementes não serão afetadas na sua qualidade fisiológica logo depois da secagem.

Capítulo 5

Armazenabilidade das sementes de feijão

1. INTRODUÇÃO

No Capítulo anterior tentou-se mostrar que as sementes de feijão “carioca” podem ser secas em camada espessa a altas temperaturas, no entanto, não podem ser secas por um período prolongado. Neste Capítulo 4, procurou-se também verificar se as equações que definem o tempo que as sementes podem ser secas em camadas delgadas a altas temperaturas, podem ser aplicadas na secagem em camada espessa considerando que esta secagem é uma sucessão de camadas delgadas. Tentou-se também o modelo de Thompson para a simulação de secagem em camada estacionária, de modo a permitir prever a secagem de sementes para diversas situações, sem que exista necessidade de pesquisas experimentais, poupando-se tempo e custos. Feito isto foi possível concluir que secagens a altas temperaturas poderiam ser feitas, desde que fosse respeitado o tempo de residência necessário (no secador) para que a qualidade fisiológica das sementes de feijão não fossem afetadas, estabelecido no Capítulo 3.

Como a secagem é um processo necessário que prepara o produto para a armazenagem, algumas seqüelas da secagem podem não ser reveladas imediatamente depois da secagem. No entanto, quando colocadas nos armazéns, e dependendo das condições de armazenagem, esses danos latentes causados às sementes aparecem. Portanto, na armazenagem de sementes o histórico do material é um dos fatores importantes, pois a maioria dos técnicos consideram que a armazenagem de sementes de alta qualidade começa quando estas atingem o seu ponto de maturação fisiológica. Segundo TOLEDO e MARCOS FILHO (1977), a partir desse ponto o poder germinativo e o vigor declinam em intensidade variável, dependendo das condições a que essas sementes ficam sujeitas. Assim, as sementes devem ser colhidas, secas, beneficiadas e, posteriormente, armazenadas sob condições tais que possibilitem a conservação da boa qualidade ou, pelo menos, que essa queda não seja acentuada até o momento de sua utilização. O período de armazenagem no Brasil normalmente é de 6 a 9 meses, podendo ser maior, dependendo da política agrícola a ser adotada.

As sementes mesmo armazenadas adequadamente por esse período, no máximo podem preservar sua qualidade. No entanto, as perdas de origem fisiológica dessas sementes são inevitáveis (DELOUCHE, 1971; HARRINGTON, 1972; WELCH e DELOUCHE, 1974; POPINIGIS, 1985). A preservação da qualidade fisiológica dessas sementes está intimamente ligadas aos fatores temperatura e umidade relativa de armazenagem, que podem fazer com que as sementes sejam armazenadas por um período de tempo prolongado (anos) ou perdida em poucos dias (7 dias).

Como as perdas da qualidade fisiológica das sementes são inevitáveis, é preciso saber distinguir bem o que é perda de germinação e vigor das sementes devido à armazenagem, e perda decorrente da ação da temperatura inadequada de secagem, já que a maior ou menor perda da qualidade fisiológica das sementes está associada a um somatório de fatores. Portanto, neste trabalho, procurou-se eliminar os outros fatores que poderiam contribuir para a queda da germinação e do vigor das sementes, como colheita, debulha e beneficiamento mecânico. Eliminados esses fatores, é possível identificar se sementes secas a altas temperaturas por determinados períodos de tempo e secagem complementar e temperaturas mais baixas, não levam para a armazenagem um efeito latente da secagem conduzidas sob essas condições.

Assim, nesta etapa do presente trabalho teve como objetivo:

- Estudar as alterações da germinação, vigor, teor de umidade, peso de 1000 sementes e massa específica de feijão “carioca”, quando secos a altas temperaturas por curtos períodos

de tempo e secagem complementar a 40 °C até um teor de umidade médio final de 13,5% b.s., durante 12 meses de armazenamento, às temperaturas controladas de 10, 20 e 30 °C e umidades relativas do ar de 43%.

- Determinar equações que possam prever as perdas da germinação e do vigor das sementes de feijão ao longo de 12 meses de armazenamento sob diferentes condições climáticas controladas.

2. REVISÃO DE LITERATURA.

2.1. Germinação das sementes.

Depois que a semente atinge a maturidade é normal passar por um período durante o qual o desenvolvimento e o crescimento do embrião permanecem em estado latente. O ressurgimento dessas atividades recebe o nome de **germinação**. As células do embrião muito jovens são muito semelhantes entre si e há pequena ou nenhuma identificação de diferentes órgãos que comporão uma planta adulta. Essas células passam por múltiplas divisões, aumentam de tamanho e depois de algum tempo, tomam a aparência de órgãos rudimentares tais como raiz, caule e folhas e tamanho de células e diferenciação em tecidos (TOLEDO e MARCOS FILHO, 1977).

Assim, diversos pesquisadores (GRABE, 1968; POPINIGIS, 1977; CHISTENSEN, 1974; CARVALHO e NAKAGAWA, 1979) entendem que a germinação é o reinício do crescimento do embrião, sob condições apropriadas, de modo a dar continuidade ao seu desenvolvimento que havia sido paralisado nos estágios finais da maturação da semente ainda na planta mãe.

As regras para análise de sementes (BRASIL, 1976) considera uma semente como germinada, aquela que apresenta na sua emergência, o desenvolvimento das estruturas essenciais do embrião e demonstre uma capacidade de produzir uma plântula normal sob condições favoráveis de campo. No caso específico de sementes de feijão, as regras recomendam que o teste de germinação deve ser feito em 4 repetições de 100 sementes. O substrato a ser utilizado pode ser de papel, pano ou areia e a temperatura do ambiente para germinação deve ser de 20 a 30 °C para o papel, 25 a 30 °C para o pano e 30 °C para a areia. Todos os substratos devem estar esterilizados e as contagens das plântulas são feitas no 5º dia e 9º dia. A Figura 5.1 mostra as fases de desenvolvimento de uma plântula de feijão e a Figura 5.2 mostra um teste de germinação do feijão "carioca" no 8º dia depois de sua semeadura, realizado neste trabalho.

Embora o teste de germinação permita uma reprodução de resultados mesmo quando se utilizam diferentes laboratórios, muitos pesquisadores entre eles BYRD e DELOUCHE (1971), COELHO (1974), FAGUNDES (1974), POPINIGIS (1977) e ROSSI (1980), relatam que esse teste tem se mostrado insatisfatório para avaliar a qualidade fisiológica das sementes e DELOUCHE e BASKIN (1970) atribuem a inadequação a duas causas principais:

- a) O teste de germinação é refinado e é feito de maneira a se obter o máximo de germinação, fornecendo às sementes as condições mais adequadas de temperatura e umidade, contribuindo para que sementes fracas, não vigorosas, participem do percentual final de germinação.

b) Dificilmente existe igualdade entre os valores de germinação obtidos em Laboratório com as plântulas emersas em campo, pois no campo as condições normalmente são adversas em maior ou menor grau.

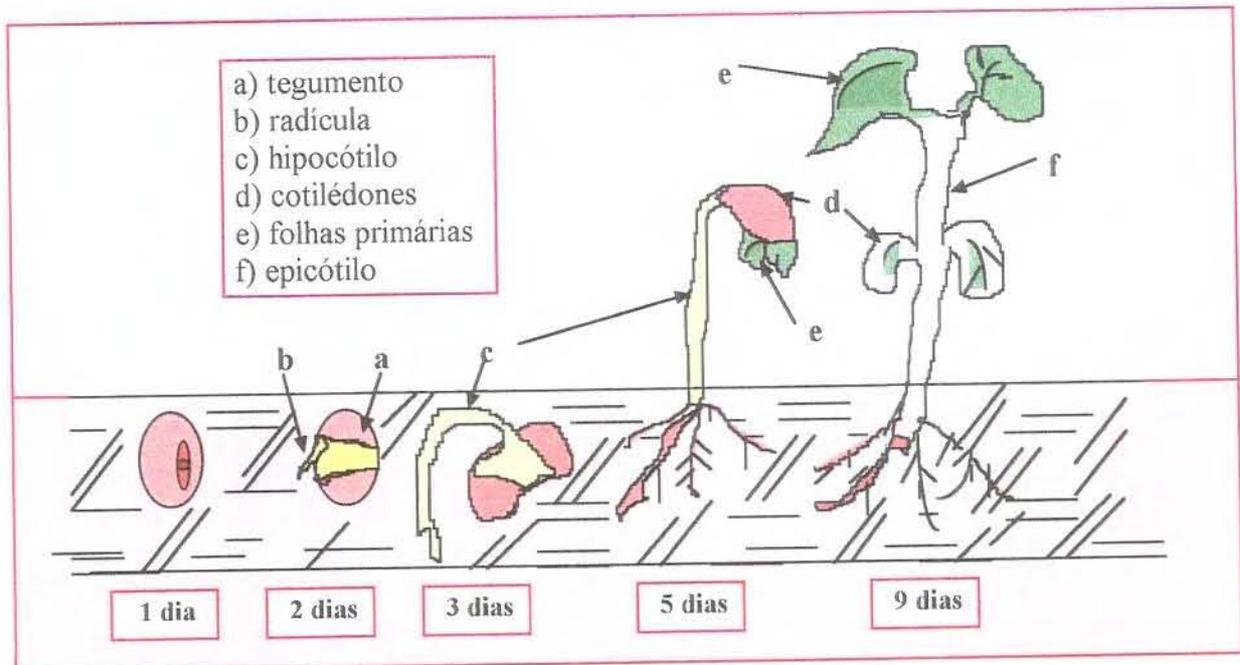


FIGURA 5.1 Fases do desenvolvimento de uma plântula de feijão.

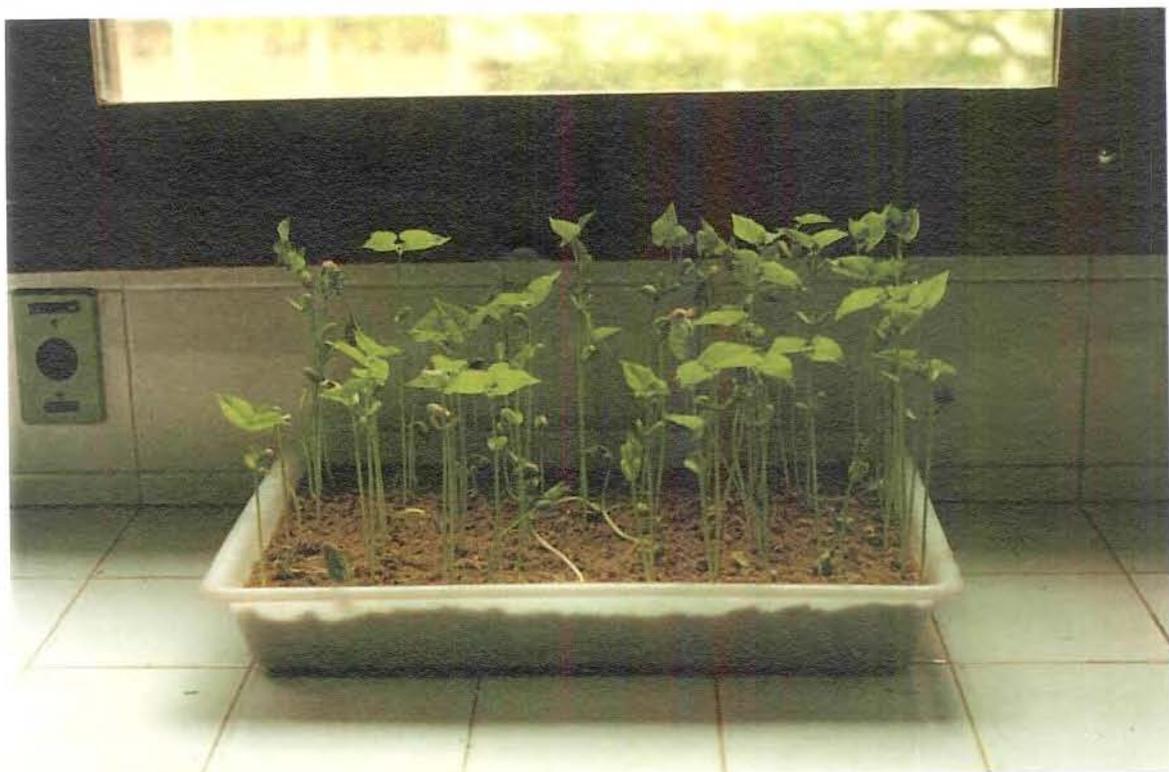


FIGURA 5.2 - Sementes de feijão "carioca" germinadas oito dias depois da sementeira.

Segundo ROCHA (1979), é praticamente impossível equipar um laboratório de condições ambientais aproximadamente iguais às condições naturais de campo. Desta forma, a germinação por si só não é um índice que permite uma avaliação segura quanto à qualidade da semente. No entanto, de acordo com POPINIGIS (1977), este teste permite dar informações sobre a quantidade de sementes capazes de se reproduzir sob condições favoráveis.

2.2. Vigor das sementes

Embora já se tenha tentado definir o que é vigor da semente, até o momento, não existe um conceito universalmente aceito (TOLEDO e MARCOS FILHO, 1977; ALMEIDA, 1981; FIGUEIREDO *et alii*, 1994).

Algumas propostas de definição do vigor foram feitas por SCHOOREL (1960); DELOUCHE e CALDWELL (1960); WOODSTOCK (1965); GRABE (1966); HEYDECKER (1972). No entanto, uma das mais recentes tentativas de definição do vigor foi proposta por PERRY (1972), que diz que o vigor é uma característica fisiológica determinada pelo genótipo e modificada pelo ambiente, que governa a capacidade de uma semente originar rapidamente uma plântula no solo e tolerar significativas variações do ambiente. A influência do vigor da semente pode persistir por toda a vida da planta e afetar a produção.

MARCOS FILHO *et alii* (1987) relatam que o teste de vigor possibilita diferenciar dois lotes que apresentam poder germinativo semelhantes, contudo os pesquisadores mencionam que este fato não deve implicar em substituir o teste de germinação pelo de vigor, mas sim utilizá-lo como informação complementar daquelas obtidas pelo teste de germinação.

Devido às deficiências no teste de germinação, alguns testes de vigor foram propostos de modo a identificar parâmetros não revelados pelo teste de germinação.

Os testes de vigor são classificados em duas categorias (ISELY, 1957; CAMARGO e VECHI, 1971):

- a) **Diretos**: onde as condições de campo são simuladas no laboratório.
- b) **Indiretos**: onde alguns parâmetros físicos, fisiológicos, químicos e bioquímicos das sementes são medidos no laboratório.

Os testes diretos de vigor são:

1. Teste a frio
2. Velocidade de emergência no campo
3. População inicial ("stand" final)
4. Peso do material verde médio
5. Peso do material seco médio

Os testes indiretos de vigor são:

1. Primeira contagem do teste de germinação
2. Velocidade de crescimento da planta
3. Germinação a baixa temperatura
4. Transferência de peso seco

5. Teste de exaustão
6. Imersão em água quente
7. Teste de submersão
8. Envelhecimento rápido
9. Imersão em solução tóxica
10. Imersão em solução osmótica
11. Condutividade elétrica
12. Teor de ácidos graxos
13. Atividade respiratória
14. Atividade de descarboxilase do ácido glutâmico
15. Teste de tetrazólio

Cada um desses testes são descritos por POPINIGIS (1977). Contudo, segundo CAMARGO e VECHI (1971), a primeira contagem é um teste que é conduzido juntamente com o teste de germinação, dando um bom indicativo do vigor das sementes, principalmente se o lote possuir um baixo vigor.

2.3. Armazenagem de sementes

A importância das sementes só é percebida, no Brasil, quando existe uma baixa produtividade de um produto em relação a outros países, e uma comparação internacional é feita de modo a colocar o Brasil no local de países onde ainda não chegou o desenvolvimento tecnológico. A partir desse momento, o Brasil passa a tomar providências e muitas vezes nem sempre bem sucedidas, já que para um desenvolvimento tecnológico é necessário que haja um mínimo de pessoas dotadas desse conhecimento específico. A armazenagem no Brasil já foi alvo de diversos programas, inclusive de incentivo à construção de armazéns de grande porte para estocagem da safra de grãos, nos quais estimava-se que 30 % desta safra era perdida por falta de unidades armazenadoras. Com o decorrer dos anos, estes valores ainda estão entre 10 e 30%, dependendo do produto, e as perdas se dão, não só por falta de armazéns, mas também por falta de conhecimento técnico adequado, já que a grande maioria dessas perdas atualmente se verificam dentro dos armazéns e não por falta deles.

No Brasil, o número de unidades específicas para conservação de sementes é mínima, na sua maioria são unidades onde as sementes são conservadas sob condições climáticas ambientais e não sob condições climáticas controladas. Desta forma, as sementes ficam sujeitas à armazenagem onde as condições climáticas podem ser favoráveis ou não, e em muitas localidades, este período favorável só se dá por um determinado período de tempo ao longo do ano.

Esta é uma das razões pelas quais as sementes chegam ao campo nem sempre com baixo poder germinativo, mas com baixo vigor, o que, segundo ALMEIDA *et alii* (1985a), é um dos principais fatores que corroboram com a baixa produtividade e possibilita o maior desenvolvimento de pragas no campo. Portanto, a armazenagem de sementes sob condições controladas não pode continuar sendo negligenciada a segundo plano, quando a qualidade dos produtos, a produtividade, e principalmente, o lucro dos agricultores, estão ligados a uma produção e conservação eficientes de sementes.

As sementes pertencem à categoria de produtos deterioráveis, mas não perecíveis. Assim, quando colocadas em ambientes favoráveis conservam suas características por um longo período de tempo.

Como a semente, no período de armazenagem, é um organismo vivo que continua respirando, varias modificações ocorrem de ordem física, química, biológica e a inter-relação desses fatores. No entanto, é preciso minimizá-las. Uma maneira de se fazer isso é diminuindo a atividade metabólica das sementes. Por isso, as condições ambientais onde as sementes são colocadas é um fator decisivo para a sua conservação eficaz.

Para minimização das atividades metabólicas das sementes, dois fatores são os principais responsáveis: a) temperatura e b) umidade relativa. Segundo NUNFORD (1965) e PUZZI (1986), o ambiente ideal seria baixas temperaturas e baixas umidades relativas. A temperatura ideal para conservação da grande maioria das sementes está entre 5 e 20 °C, dependendo do produto, e a umidade relativa entre 30 e 50 %, pois uma umidade relativa do ar ambiente ainda mais baixa que estes valores, favorece o aumento de sementes dormentes (ALMEIDA *et alii*, 1985b).

Segundo DELOUCHE (1981), são importantes os estudos que determinem o período no qual as sementes das espécies cultivadas mantenham um nível de qualidade aceitável sob condições não controladas de armazém, nas diversas áreas geográficas do Brasil. Contudo, devido às condições continentais do Brasil e de sua diversidade climática, é difícil de se realizar experimentos como aqueles sugeridos pelo autor sem que grandes somas de recursos sejam envolvidos. Portanto, CAVALCANTI MATA *et alii* (1996) o estudo da perda de viabilidade das sementes, sob condições controladas de temperatura e umidade relativa, é um dos estudos de maior relevância na armazenagem de produtos, pois além de permitir prever a diminuição da germinação e vigor das sementes ao longo do tempo, permite também estimar essas perdas durante a armazenagem em condições climáticas ambientais.

O feijão armazenado com 12 % de umidade e umidade relativa de 65 a 70 % e temperatura abaixo de 20 °C tem se conservado satisfatoriamente por 12 meses (DEL GIUDICE *et alii*, 1972; JORDÃO *et alii*, 1976; CAULLIEZ *et alii*, 1979).

BOSCO *et alii* (1980) estudaram o armazenamento de sementes de feijão vigna por 12 meses no Norte e Nordeste do Brasil nas localidades de Petrolina-PE, Campina Grande-PB e Belém-PA, tendo concluído que os ambientes de armazéns abertos de Petrolina e Campina Grande apresentam condições para o armazenamento adequado pelo período de 8 meses. No entanto, em Belém as sementes já haviam se deteriorado com quatro meses, pois o vigor das sementes de feijão armazenadas em saco de papel era de apenas 5 % e as sementes armazenadas em sacos de juta o percentual era zero, embora na armazenagem com saco de papel o poder germinativo das sementes fosse de 76%.

As condições ambientais média dos armazéns foram temperatura de 27,4 °C e umidade relativa (UR) de 61,7% em Petrolina; 23,6 °C e UR de 81,2 % em Campina Grande, e 26,4 °C e UR de 83,3 % em Belém. O que observou-se neste trabalho, é que quando as sementes de feijão apresentavam uma diminuição significativa de germinação, isto correspondia às sementes estarem com um teor de umidade inadequado para a sua armazenagem, indicando que se o processo de armazenagem continuasse haveria certamente uma redução no seu poder germinativo, pelo fato dessas condições serem as condições próprias para aceleração do processo degenerativo das sementes. Portanto, as embalagens pouca ou nenhuma influência tinham no processo de impedir a absorção de água pelas sementes e provocar o seu processo degenerativo. Um lote dessas sementes também foi armazenado em câmara fria à temperatura média de 8,4 °C e umidade relativa média de 46 %, tendo-se constatado que essas sementes conservaram o seu poder germinativo e vigor pelo período de 12 meses.

CIRNE *et alii* (1992) armazenaram, durante seis meses, sementes de feijão mulatinho em condições ambientais de Campina Grande. Os autores utilizaram 4 tipos de armazenagem em nível de produtor rural: a) silo de flandre de zinco exposto ao ambiente; b) silo de flandre de zinco enterrado no solo; c) silo de flandre de zinco isolado com casca de arroz e d) silo de resina poliéster reforçado com fibra de vidro. Para cada uma desses tipos de armazenagem foram empregados silos de 2 tamanhos: a) 5 kg de sementes e b) 20 kg de sementes. As sementes foram submetidas a dois tratamentos: a) expurgo com fosfina e b) expurgo com fosfina e adição de casca de laranja seca e moída. Os resultados obtidos mostraram que o vigor e a germinação das sementes armazenadas sofreram redução gradativa ao longo do tempo, sendo que essas reduções foram menos acentuadas nos silos de maior capacidade, com melhor isolamento térmico e apenas expurgado. Este fato indica que a temperatura foi o fator que mais contribuiu para a diminuição do processo degenerativo das sementes. A pesquisa revela também que as sementes, quando armazenadas em silo de resina poliéster reforçado com fibra de vidro e capacidade de 20 kg, até os 3 meses podem ser utilizadas como sementes de razoável qualidade, pois a perda de germinação neste período é de 98 para 80 %, e do vigor de 95% para 80%. A partir desse período as perdas são mais acentuadas, principalmente no vigor das sementes, indicando que, se forem utilizadas, provavelmente a produtividade deste feijão será baixa.

Alguns outros aspectos físicos e químicos das sementes dão um indicativo de perda de sua qualidade fisiológica. SOUZA *et alii* (1987/1990) relataram a perda de carboidratos associados à taxa de respiração das sementes, quando armazenadas por 6 meses sob determinadas condições controladas e SARTORI (1982) observou uma variação na coloração das sementes de feijão quando armazenadas a 25 °C e 70 % de U.R. durante 12 meses de armazenamento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta etapa do presente trabalho foi realizada em 93/94 nos Laboratórios do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

Para execução deste trabalho experimental as sementes de feijão utilizadas na armazenagem foram provenientes das diferentes condições de secagem realizadas e descritas no Capítulo 4.

Como o objetivo desta etapa do trabalho foi verificar se as sementes secas a altas temperaturas, por curtos períodos de tempo e secagem complementar a 40 °C até um teor de umidade médio final de 13,5 % b.s., podem levar a um efeito degenerativo latente da secagem a altas temperaturas para o armazenamento, as sementes que foram armazenadas sob condições controladas sofreram as seguintes secagens:

- 70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 8 h. -Ui. -25 % b.s. (Tratamento 1)
- 70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 10 h. -Ui. -35 % b.s. (Tratamento 2)
- 60 °C por 1,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h.-Ui. -25 % b.s. (Tratamento 3)
- 60 °C por 2,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h.-Ui. -35 % b.s. (Tratamento 4)
- 50 °C por 5,5 h - Ui. de 25 % b.s. (Tratamento 5)
- 50 °C por 6,5 h - Ui. de 35 % b.s. (Tratamento 6)
- 40 °C por 13,0 h - Ui. de 25 % b.s. (Tratamento 7)
- 40 °C por 13,5 h - Ui. de 35 % b.s. (Tratamento 8)

Depois da secagem o material proveniente do secador era homogeneizado e subdividido em amostras destinadas à armazenagem controlada. O material destinado à armazenagem foi expurgado com Gastoxin, para proteger as sementes contra insetos, na base de 0,6 gramas por 4 sacos de 60 kg, durante 72 horas. Depois do expurgo o material foi aerado naturalmente por 8 horas, e para inibir a presença de fungos nas sementes foi aplicado o fungicida Captan 200 na dosagem de 6 ml por kg de sementes.

Inicialmente as sementes foram colocadas em 144 pequenas cestas, cada uma contendo aproximadamente 200 gramas de feijão. As cestas foram colocadas no interior de recipientes contendo uma solução saturada de sal de carbonato de potássio dihidratado ($K_2CO_3 \cdot 2H_2O$) que estabelecia no interior do recipiente a umidade relativa do ar de 45% para a temperatura de 10 °C, 44 % para a temperatura de 20 °C e 43% para a temperatura de 30 °C. Para evitar o contato direto das cestas com a solução utilizou-se um duto circular vazado de pvc de 10 cm de diâmetro e 8 cm de altura, conforme mostrado na Figura 1.2 do Capítulo 1.

Antes das sementes serem armazenadas foi retirada uma sub-amostra para determinação de sua pureza, germinação, vigor, teor de umidade, peso de 1000 sementes e massa específica, obedecendo as Regras para Análises de Sementes (BRASIL, 1980).

Em seguida, em cada câmara B.O.D foram acondicionados 48 recipientes hermeticamente vedados contendo no seu interior as sementes de feijão, sendo estes recipientes distribuídos aleatoriamente no interior da câmara. Os 48 recipientes continham os 8 tratamentos de secagem e 6 repetições para avaliação da qualidade fisiológica durante o período de armazenamento. Foram utilizadas 3 câmaras onde cada uma era controlada à temperatura de 10, 20 e 30 °C, respectivamente.

O ensaio foi conduzido por um período de 12 meses, fazendo-se avaliações de 2 em 2 meses quanto à qualidade das sementes de feijão, por meio dos testes de germinação, vigor, teor de umidade, peso de 1000 sementes e massa específica das sementes, obedecendo as recomendações prescritas nas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 1980) com algumas alterações. Os testes de germinação e vigor foram feitos conforme o descrito no Capítulo 3, item 3.2.

3.1- Determinação do teor de umidade

O teor de umidade em base úmida (b.u.) foi determinado usando-se o método Oficial do Brasil que é a inserção da amostra em estufa com circulação de ar (Fanem 330) a 105 °C \pm 1 °C durante 24 horas.

3.2 - Determinação do peso de 1000 sementes e massa específica

O peso de 1000 sementes foi determinado pesando-se 1000 sementes em uma balança mettler PC-440 com precisão de 0,001 grama e a massa específica determinada por meio de um picnômetro de comparação a ar. Essas determinações foram feitas no início dos testes e posteriormente aos 4, 8 e 12 meses.

3.3 - Análise estatística

As análises estatísticas dos dados de germinação e vigor foram feitas utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado, seguindo um esquema fatorial 8 X 3 X 7 (8 tratamentos) X (3 temperaturas) X (7 períodos de armazenamento) com 3 repetições. A análise de variância foi feita usando o programa computacional ASSISTAT 6.1 (SILVA, 1996).

A comparação entre médias foi realizada pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade (GOMES, 1982).

Os resultados obtidos de germinação e vigor foram transformados em $\arcsin(P/100)^{1/2}$, em que P é a percentagem de germinação ou vigor (SNEDECOR, 1966), para efetivação da análise de variância.

Os dados de germinação (%G) e vigor (%V) das sementes de feijão obtidos experimentalmente foram submetidos a uma análise de regressão não-linear em que ajustou-se o modelo abaixo que prevê a perda da qualidade fisiológica das sementes em função do tratamento de secagem e da temperatura ao longo do armazenamento.

$$\%G = G_i - a_1 \cdot (Ts)^{a_2} \cdot (Ui)^{a_3} \cdot (Ta)^{a_4} \cdot (ta)^{a_5} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$\%V = V_i - a_1 \cdot (Ts)^{a_2} \cdot (Ui)^{a_3} \cdot (Ta)^{a_4} \cdot (ta)^{a_5} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

em que

Ui = umidade inicial do produto antes da secagem, % base seca

Ts = temperatura de secagem, °C

Ta = temperatura de armazenagem, °C

ta = tempo de armazenagem, meses

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Germinação das sementes de feijão armazenadas

Na Tabela 5.1 encontram-se os dados médios de germinação das sementes de feijão submetidas a diversos tratamentos de secagem e armazenadas pelo período de 12 meses, sob condições controladas de temperatura (10, 20 e 30 °C) e umidade relativa média do ar de 44%, e na Tabela 5.2 está a análise de variância deste experimento, observando-se que existem diferenças significativas, ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F, para os fatores estudados de temperatura, tratamentos de secagem e período de armazenamento, bem como a interação entre esses fatores.

Na Tabela 5.3 encontra-se a análise estatística para cada fator isoladamente, constatando-se que temperatura de armazenagem influi na manutenção da germinação das sementes e que as sementes armazenadas à temperatura de 10 °C preservam mais a sua germinação do que as sementes armazenadas à temperatura de 20 e 30 °C.

Na maioria das cidades brasileira as temperaturas médias oscilam entre os valores de 20 e 30 °C. Portanto, há que se ter bastante cuidado quanto à decisão de se armazenar em ambiente aberto ou controlado, pois esta pode ser a diferença entre o sucesso e o fracasso da armazenagem de sementes de feijão.

Ainda na Tabela 5.3, observa-se que existem diferenças significativas na germinação das sementes quando estas foram secas de diferentes maneiras. Nessa tabela verifica-se que as sementes que foram secas com menor temperatura e menor umidade inicial mantiveram a ger-

minação em níveis mais elevados. Observa-se ainda que, para o fator período de armazenagem, a germinação das sementes diminuem significativamente ao longo de todo o período.

TABELA 5.1 - Dados médios de germinação das sementes de feijão "carioca" armazenadas por 12 meses depois ter sido submetidos a diversos tratamentos de secagem

Temperatura de 10 °C							
Tratamentos	Meses						
	0	2	4	6	8	10	12
1	97,0	96,3	96,3	96,0	95,3	96,0	94,3
2	97,0	97,0	96,3	95,7	95,0	95,7	93,7
3	97,0	96,7	95,7	95,7	95,3	95,7	95,0
4	97,0	96,3	96,3	95,7	95,7	95,3	94,7
5	97,0	96,3	96,0	96,0	95,7	95,3	94,7
6	97,0	96,7	96,3	96,0	95,7	95,7	95,0
7	97,0	96,7	96,7	96,3	95,3	95,3	95,0
8	97,0	96,3	96,3	96,7	95,0	96,0	94,7
Temperatura de 20 °C							
Tratamentos	Meses						
	0	2	4	6	8	10	12
1	97,0	96,0	95,7	95,0	94,3	92,3	92,0
2	97,0	95,3	95,0	93,7	93,0	91,7	90,3
3	97,0	95,7	95,7	94,7	95,3	93,7	93,0
4	97,0	96,0	95,3	95,0	94,3	93,0	90,7
5	97,0	95,7	96,3	94,7	95,0	94,7	94,0
6	97,0	96,0	96,0	95,3	94,7	94,3	94,0
7	97,0	96,7	96,3	95,7	96,3	95,3	95,0
8	97,0	96,7	96,3	96,0	96,0	95,0	95,0
Temperatura de 30 °C							
Tratamentos	Meses						
	0	2	4	6	8	10	12
1	97,0	90,3	73,3	74,3	67,7	60,0	52,3
2	97,0	88,7	76,0	70,3	65,0	45,3	42,0
3	97,0	92,0	77,3	75,3	67,0	69,0	66,3
4	97,0	90,3	80,0	74,3	67,7	64,3	60,3
5	97,0	92,3	87,0	76,3	74,0	73,7	72,7
6	97,0	90,3	85,3	76,3	72,7	70,7	68,3
7	97,0	93,7	89,7	82,3	76,3	77,0	76,0
8	97,0	92,0	88,0	80,3	76,0	70,7	68,0

70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 8 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 1)

70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 10 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 2)

60 °C por 1,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 3)

60 °C por 2,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 4)

50 °C por 5,5 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 5)

50 °C por 6,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 6)

40 °C por 13,0 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 7)

40 °C por 13,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 8)

TABELA 5.2 - Análise de variância dos dados de **germinação** das sementes de feijão submetidas a diferentes tratamentos de secagem e armazenadas pelo período de 12 meses a diferentes condições controladas de temperatura

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Temperatura	2	23550,2383	11775,1191	10705,17 **
Tratamentos	7	919,7619	131,3946	119,46**
Período	6	7950,7778	1325,1296	1204,72 **
Temperatura x Tratamentos	14	794,7147	56,7653	51,61 **
Temperatura x período	12	7171,1519	597,5960	543,30 **
Tratamentos x período	42	473,1273	11,2649	10,24 **
Temperatura x tratam.x período	84	556,3962	6,6238	6,02 **
Resíduo	336	369,5820	1,0999	
Total	503	41785,7500		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

GL Grau de liberdade

SQ - Soma dos quadrados

QM Quadrado médio dos desvios

TABELA 5.3 - Efeito dos fatores, temperatura, tratamentos de secagem e período de armazenagem nos valores médios de **germinação** das sementes de feijão armazenadas.

Médias dos Fatores					
Temperatura Médias		Tratamentos Médias		Período Médias	
10 °C	78,4341 a	(1)	71,8718 e	0	80,1194 a
20 °C	77,3376 b	(2)	70,5908 f	2	76,8875 b
30 °C	63,4184 c	(3)	72,8575 d	4	74,1268 c
		(4)	72,3488 de	6	72,1685 d
		(5)	73,9273 bc	8	70,6455 e
		(6)	73,5923 c	10	69,4150 f
		(7)	75,0219 a	12	68,0809 g
		(8)	74,2965 b		
DMS1= 0,2695		DMS2= 0,5698		DMS3= 0,5182	
MG = 73,0633		CV%= 1,4354			

Os valores seguidos pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e pelas mesmas letras minúsculas nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

MG - Média Geral; DMS - Desvio mínimo significativo

4.1.1 Interação entre os fatores - germinação

Na Tabela 5.4 está a interação entre os fatores temperatura e os tratamentos de secagem que foram feitos nas sementes de feijão. É possível observar na coluna que, para as temperaturas de armazenagem das sementes de 10 e 20 °C, existe apenas uma diferença significativa na germinação das sementes entre essas duas temperaturas que é obtido quando as sementes

foram secas com um teor de umidade inicial de 35% b.s. a 70 °C por 1 hora e secagem complementar a 40 °C por 10 horas. Para o restante dos tratamentos de secagem, a germinação das sementes de feijão tem o mesmo comportamento quando armazenadas a 10 e 20 °C. Contudo, a germinação das sementes de feijão para todos os tratamentos de secagem e armazenagem a 30 °C diferem significativamente da armazenagem a 10 e 20 °C, indicando que esta temperatura não é adequada para a preservação da viabilidade das sementes.

Analisando-se na linha da Tabela 5.4 constata-se que à temperatura de 10 °C todos os tratamentos comportam-se semelhantemente e não diferem significativamente entre si. Para a temperatura de 20 °C, observa-se uma diferença significativa da germinação das sementes quando secas a 40 °C com o tratamento 2 (Secagem a 70 °C por 1,0 hora com o teor de umidade inicial das sementes de 35 % b.s. e secagem complementar a 40 °C por 10 h.) embora este tratamento não difira significativamente dos demais tratamentos.

Fica evidenciado na análise da Tabela 5.4 que existe um efeito latente da temperatura de secagem (tratamento 2) e que este efeito não se evidencia se as sementes forem armazenadas a 10 °C, mas este se revela quando as sementes são armazenadas a 20 °C ou acima. Este fato confirma as afirmações feitas por OLIVEIRA *et alii* (1988), quando diz que o efeito latente nas sementes secas a altas temperaturas podem, em alguns casos, ser inibido na armazenagem pelo uso de temperaturas menores nas câmaras de conservação. No entanto, isto significa aumento de custos da armazenagem das sementes.

Na Tabela 5.5 estão os valores médios de germinação das sementes para a interação entre a temperatura e o período de armazenagem. Observa-se, nesta tabela, que a germinação das sementes quando armazenadas às temperaturas de 20 e 10 °C não apresenta diferenças significativas ao longo de todo o período de armazenamento. No entanto, estas diferem significativamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, da armazenagem à temperatura de 30 °C. Analisando-se esta tabela na linha, verifica-se que a germinação das sementes passam a ser significativamente diferentes só a partir do 10^o mês de armazenamento, a 20 °C a partir do 6^o mês e a 30 °C já no segundo mês as sementes apresentam uma diminuição significativa de sua germinação.

Na Tabela 5.5 é interessante observar que à temperatura de 20 °C existe um aumento do poder germinativo das sementes no 10^o mês de armazenamento. O aumento, embora não pareça lógico, no caso de sementes ele pode ser previsível já que alguns fatores podem estar envolvidos como a heterogeneidade do material biológico e, principalmente, a quebra de dormência das sementes, fato esse verificado por diversos autores (ALMEIDA, 1981; CIRNE, 1992) quando armazenaram sementes por determinado período de tempo.

Na Tabela 5.6 estão os valores da germinação para a interação entre os tratamentos de secagem aplicados às sementes e o período de armazenagem destas sementes. Constata-se nesta tabela que existe uma diminuição do poder germinativo das sementes ao longo do período de armazenamento independentemente dos tratamentos de secagem o que faz com que as constatações feitas por ALMEIDA (1981) e CAVALCANTI MATA *et alii* (1996) em seus trabalhos com sementes de algodão e arroz, respectivamente, de que as sementes perdem sua viabilidade ao longo do período de armazenamento, independentemente, das condições de armazenagem, também se verifiquem neste trabalho.

Analisando-se ainda a Tabela 5.6 observa-se que para a perda do poder germinativo das sementes, nas colunas, constata-se que até o 2^o mês de armazenamento todos os tratamentos não apresentam diferenças significativas entre eles, e a partir deste período, existem perdas do poder germinativo destas sementes de acordo com os tratamentos de secagem que estas

TABELA 5.4 - Comparações entre os valores médios de **germinação** das sementes de feijão para a interação entre temperatura de armazenamento e tratamentos de secagem das sementes

INTERAÇÃO entre Temperatura e Tratamentos									
Temperatura	Tratamentos								Médias
	1	2	3	4	5	6	7	8	
10 °C	78,41Aa	78,27Aa	78,35Aa	78,33Aa	78,33Aa	78,61Aa	78,62Aa	78,56Aa	78,33
20 °C	76,78Aab	75,71Bb	77,20Aab	76,63Aab	77,63Aab	77,62Aab	78,60Aa	78,53Aa	77,34
30 °C	60,42Bde	57,80Ce	63,02Bc	62,09Bcd	65,83Bab	64,55Bbc	67,85Ba	65,80Bab	63,42
Médias	71,87	70,59	72,86	72,35	73,93	73,59	75,02	74,30	73,06

DMS/coluna = 2,02 (letras maiúsculas) DMS/linha = 2,61 (letras minúsculas)

Os valores seguidos pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e pelas mesmas letras minúsculas nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.
DMS - Desvio mínimo significativo

TABELA 5.5 - Comparações entre os valores médios de **germinação** das sementes de feijão para a interação entre temperatura e período de armazenagem

INTERAÇÃO entre Temperatura e Período de armazenagem								
Temperatura	Período							Médias
	Meses							
	0	2	4	6	8	10	12	
10 °C	80,12Aa	79,33Aa	78,88Aab	78,52Aab	77,61Aab	77,96Aab	76,62Aab	78,43
20 °C	80,12Aa	78,51Aab	78,25Aab	77,11Aabc	76,98Abc	78,60Aab	74,78Ac	77,34
30 °C	80,12Aa	72,82Bb	65,25Bc	60,87Bd	57,35Be	54,68Bf	52,84Bf	63,42
Médias	80,12	76,89	74,13	72,17	70,65	69,42	68,08	73,06

DMS/coluna = 2,02 (letras maiúsculas) DMS/linha = 2,54 (letras minúsculas)

Os valores seguidos pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e pelas mesmas letras minúsculas nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.
DMS - Desvio mínimo significativo

- 70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 8 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 1)
- 70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 10 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 2)
- 60 °C por 1,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 3)
- 60 °C por 2,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 4)
- 50 °C por 5,5 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 5)
- 50 °C por 6,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 6)
- 40 °C por 13,0 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 7)
- 40 °C por 13,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 8)

receberam. É possível observar também que até o 6º mês de armazenagem, as sementes tendem a se comportar igualmente, exceto para o tratamento 2 (secagem a 70 °C por 1 hora com o teor de umidade inicial das sementes de 35% b.s. e secagem complementar a 40 °C por 10 h), embora haja uma conturbação no quarto mês de armazenagem. Observa-se ainda que os tratamentos a 40 e 50 °C apresentam o mesmo comportamento, ou seja, não apresentam diferenças significativas entre si pelo período de 12 meses de armazenamento, indicando que as sementes podem ser secas a temperaturas mais elevadas que 45 °C que estas não são afetadas na sua qualidade fisiológica mesmo durante o seu armazenamento. Este fato ressalta as afirmações feitas por DALPALQUALE *et alii* (1987), quando afirmam que o mais importante não é a temperatura de secagem mas sim a temperatura das sementes durante o processo de secagem.

TABELA 5.6 - Comparações entre os valores médios de germinação das sementes de feijão para a interação entre os tratamentos de secagem e períodos de armazenagem

INTERAÇÃO entre Tratamentos e Período de armazenagem								
Tratamentos	Período de armazenagem							Médias
	Meses							
	0	2	4	6	8	10	12	
1	80,12Aa	76,47Ab	71,97 Dc	71,70ABc	69,71 BCcd	67,74 Cde	65,40De	71,87
2	80,12Aa	76,00Ab	72,27 Dc	70,14 Bcd	68,50 Ccd	64,52 Dc	62,58Ee	70,59
3	80,12Aa	77,06Ab	72,53 CDe	71,65ABc	70,01ABCcd	69,89ABCd	68,76BCd	72,86
4	80,12Aa	76,47Ab	73,32BCDc	71,55ABcd	69,86ABCde	68,51 Be	66,61CDe	72,35
5	80,12Aa	76,97Ab	75,44ABb	72,03ABc	71,48ABCc	71,12Ac	70,33ABc	73,93
6	80,12Aa	76,62Ab	75,00ABb	72,30ABc	71,05ABCcd	70,48ABd	69,58ABd	73,59
7	80,12Aa	78,17Aa	76,58Ab	74,06Abc	72,47Ac	72,14Ac	71,61Ac	75,02
8	80,12Aa	77,35Ab	75,91Abc	73,91Acd	72,08ABde	70,92ABe	69,78ABe	74,30
Médias	80,12	76,89	74,13	72,17	70,65	69,42	68,08	73,06
DMS/coluna = 2,61 (letras maiúsculas) DMS/linha = 2,54 (letras minúsculas)								

Os valores seguidos pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e pelas mesmas letras minúsculas nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

DMS - Desvio mínimo significativo

70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 8 h. - Ui.- 25 % b.s. (Tratamento 1)

70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 10 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 2)

60 °C por 1,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 3)

60 °C por 2,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 4)

50 °C por 5,5 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 5)

50 °C por 6,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 6)

40 °C por 13,0 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 7)

40 °C por 13,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 8)

4.2 Vigor das sementes de feijão armazenadas

A Tabela 5.7 contém os dados médios do vigor das sementes de feijão submetidas a diversos tratamentos de secagem e armazenadas pelo período de 12 meses sob condições controladas de temperatura (10, 20 e 30 °C) e umidade relativa média do ar de 44%, e na Tabela 5.8 está a análise de variância deste experimento, observando-se que existem diferenças significativas, ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F, para os fatores estudados de tempe-

ratura, tratamentos de secagem e período de armazenamento, bem como a interação entre esses fatores.

TABELA 5.7 - Dados médios de vigor das sementes de feijão "carioca" armazenados por 12 meses depois de ter sido submetidas a diversos tratamentos de secagem

Temperatura de 10 °C							
Meses							
Tratamentos	0	2	4	6	8	10	12
1	93,0	91,3	91,0	90,3	90,0	88,7	87,7
2	93,0	91,0	91,0	90,0	89,7	89,3	87,3
3	93,0	91,3	91,3	91,0	90,3	90,0	89,3
4	93,0	91,7	91,7	90,7	90,0	90,3	88,7
5	93,0	91,3	91,0	91,7	91,7	90,3	89,7
6	93,0	91,7	91,3	91,0	90,7	90,3	89,3
7	93,0	92,3	91,7	91,7	90,3	90,7	90,0
8	93,0	92,3	92,0	91,3	91,0	90,7	89,3
Temperatura de 20 °C							
Meses							
Tratamentos	0	2	4	6	8	10	12
1	93,0	91,7	89,7	89,7	87,7	83,0	71,0
2	93,0	91,3	89,3	89,3	86,3	81,0	69,0
3	93,0	91,3	90,3	89,7	89,3	88,0	72,7
4	93,0	91,3	90,7	90,3	89,0	87,7	71,7
5	93,0	91,7	90,7	90,3	89,3	89,0	74,0
6	93,0	91,3	91,0	90,3	89,3	88,7	74,0
7	93,0	91,7	91,3	90,7	90,0	89,0	76,7
8	93,0	92,0	91,3	91,0	90,3	89,3	77,0
Temperatura de 30 °C							
Meses							
Tratamentos	0	2	4	6	8	10	12
1	93,0	87,0	67,0	59,3	51,7	41,0	29,3
2	93,0	85,7	62,3	57,0	42,0	36,3	26,7
3	93,0	89,7	69,3	65,7	61,0	40,7	39,0
4	93,0	89,0	70,0	63,7	60,3	36,3	35,3
5	93,0	91,0	73,7	70,7	62,7	57,3	39,3
6	93,0	90,3	70,7	69,7	60,7	55,3	38,3
7	93,0	92,0	77,7	72,7	69,3	59,3	41,3
8	93,0	91,0	76,0	71,3	69,0	56,7	36,7

70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 8 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 1)

70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 10 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 2)

60 °C por 1,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 3)

60 °C por 2,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 4)

50 °C por 5,5 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 5)

50 °C por 6,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 6)

40 °C por 13,0 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 7)

40 °C por 13,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 8)

TABELA 5.8 - Análise de variância dos dados de vigor das sementes de feijão submetidas a diferentes tratamentos de secagem e armazenadas pelo período de 12 meses a diferentes condições controladas de temperatura

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Temperatura	2	28149,1426	14074,5713	25289,07 **
Tratamentos	7	966,7936	138,1134	248,16 **
Período	6	18426,4453	3071,0742	5518,08 **
Temperatura x Tratamentos	14	598,5403	42,7529	76,82 **
Temperatura x período	12	12963,0801	1080,2567	1941,00 **
Tratamentos x período	42	371,8724	8,8541	15,91 **
Temperatura x tratam. x período	84	421,6257	5,0194	9,02 **
Resíduo	336	187,0000	0,5565	
Total	503	62084,5000		

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

GL Grau de liberdade

SQ - Soma dos quadrados

QM Quadrado médio dos desvios

Na Tabela 5.9 está a análise estatística para cada um dos fatores estudados, observando-se, que a exemplo da germinação, o vigor das sementes é afetado pela ação da temperatura de armazenagem e estas diferem significativamente entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey, obtendo-se maior preservação do vigor das sementes à temperatura de armazenagem de 10 °C.

TABELA 5.9 - Efeito do fatores tratamento de secagem, temperatura e período de armazenagem nos valores médios de vigor das sementes de feijão armazenadas

Médias dos Fatores						
Temperatura		Tratamentos			Período	
Médias		Médias			Médias	
10 °C	72,4930 a	(1)	64,4663 d	0	74,6830 a	
20 °C	70,0051 b	(2)	63,4765 e	2	72,4771 b	
30 °C	55,5421 c	(3)	65,8731 e	4	67,4816 c	
		(4)	65,5371 e	6	66,2654 d	
		(5)	66,9500 b	8	64,3713 e	
		(6)	66,6125 b	10	61,4398 f	
		(7)	67,7320 a	12	55,3756 g	
		(8)	67,4597 a			
DMS1= 0,1917		DMS2= 0,4053			DMS3= 0,3686	
MG = 66,0134		CV%= 1,1301				

Os valores seguidos pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e pelas mesmas letras minúsculas nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

MG - Média Geral; DMS - Desvio mínimo significativo

Na Tabela 5.9 observa-se que as médias de vigor das sementes quando secas às temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, diferem significativamente entre elas. No entanto, para cada temperatura individualmente o teor de umidade inicial de 35% ou 25% não interfere no comportamento do vigor das sementes exceto para a temperatura de 70 °C, para a qual se constata uma diferenciação de comportamento do vigor das sementes de feijão, quando secas a partir de um teor de umidade de 35 % e 25 % b.s.. Ainda na Tabela 5.9, verifica-se que para o fator período de armazenagem o vigor das sementes diminuem significativamente ao longo de todo o período.

4.2.1. Interação entre os fatores - vigor

Na Tabela 5.10 está a comparação entre as médias de vigor das sementes de feijão para a interação dos fatores temperatura e os tratamentos de secagem. É possível constatar, nesta tabela, analisando-se na coluna que as médias de vigor das sementes diferem significativamente entre elas ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey, quando as sementes são armazenadas às temperaturas de 10, 20 e 30 °C.

Esse fato indica que, embora para a germinação das sementes as temperaturas de armazenagem de 10 e 20 °C não apresentem diferenças significativas entre si, este fato não ocorre com o vigor das sementes, constatando-se o que foi afirmado por MARCOS FILHO *et alii* (1987) que só o teste de germinação não é suficiente para revelar a qualidade das sementes. Neste caso, fica evidente que qualidade fisiológica das sementes de feijão tem sua preservação melhor assegurada quando armazenadas à temperatura de 10 °C.

Uma análise feita na linha da Tabela 5.10 verifica-se que, para a temperatura de 10 °C, todos os tratamentos comportam-se semelhantemente e não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Já à temperatura de 20 °C, observa-se que as sementes quando secas às temperaturas de 40, 50 e a 60 °C por 1,5 horas e 2,5 horas com secagem complementar a 40°C, não apresentam diferenças significativas entre si. A armazenagem das sementes de feijão feita à temperatura de 30 °C apresenta os melhores resultados quando as sementes foram secas a 40 °C e a 50 °C, para um teor de umidade inicial de 25 % b.s., não existindo diferenças significativas entre esses tratamentos, indicando que as temperaturas inadequadas de armazenagem das sementes mostram com mais evidência os danos latentes causados às sementes pela ação da temperatura durante a secagem.

Na Tabela 5.11 estão os valores médios de vigor das sementes para a interação entre a temperatura e o período de armazenagem. Nesta tabela, analisando-se o vigor das sementes nas colunas, verifica-se que este não difere significativamente até o oitavo mês para as temperaturas de armazenagem de 10 e 20 °C, sendo que as sementes de feijão quando armazenadas à temperatura de 30 °C apresentam uma diferença significativa no seu vigor, ao longo dos 12 meses de armazenamento, quando comparada com as temperaturas de armazenagem de 10 e 20 °C.

Analisando-se a Tabela 5.11, na linha, observa-se que as média de vigor do feijão quando as sementes foram armazenadas à temperatura de 10 °C não apresentam diferenças significativas entre elas até o quarto mês de armazenamento, para 20 °C até o 2º mês de armazenamento e para 30 °C já no segundo mês de armazenamento as médias de vigor das sementes são significativamente diferentes entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

TABELA 5.10 - Comparações entre os valores médios de vigor das sementes de feijão para a interação entre temperatura de armazenamento e tratamentos de secagem das sementes

INTERAÇÃO entre Temperatura e Tratamentos									
Temperatura	Tratamentos								Médias
	1	2	3	4	5	6	7	8	
10 °C	71,91Aa	71,82Aa	72,48Aa	72,45Aa	72,72Aa	72,63Aa	72,96Aa	72,97 Aa	72,49
20 °C	68,99Bbc	68,30Bc	69,98Babc	69,94Babc	70,42Bab	70,37Bab	70,90Ba	71,12Ba	70,01
30 °C	52,49C e	50,31Cf	55,15Ccd	54,22Cd	57,71Cab	56,84Cbc	59,33Ca	58,29Cab	55,54
Médias	64,47	63,48	65,87	65,54	66,95	66,61	67,73	67,46	66,01

DMS/coluna = 1,43 (letras maiúsculas) DMS/linha = 1,86 (letras minúsculas)

Os valores seguidos pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e pelas mesmas letras minúsculas nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.
DMS - Desvio mínimo significativo

TABELA 5.11 - Comparações entre os valores médios de vigor das sementes de feijão para a interação entre temperatura e período de armazenagem

INTERAÇÃO entre Temperatura e Período								
Temperatura	Período de armazenagem							Médias
	Meses							
	0	2	4	6	8	10	12	
10 °C	74,68Aa	73,19Aab	72,93Aab	72,51Ab	71,94Abc	71,62Abc	70,57Ac	72,49
20 °C	74,68Aa	73,10Aab	72,10Abc	71,73Abc	70,59Acd	68,94Bd	58,88Be	70,01
30 °C	74,68Aa	71,14Bb	57,41Bc	54,55Bd	50,59Be	43,76Cf	36,67Cg	55,54
Médias	74,68	72,48	67,48	66,27	64,37	61,44	55,38	66,01

DMS/coluna = 1,43 (letras maiúsculas) DMS/linha = 1,81 (letras minúsculas)

Os valores seguidos pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e pelas mesmas letras minúsculas nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.
DMS - Desvio mínimo significativo

70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 8 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 1)

70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 10 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 2)

60 °C por 1,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 3)

60 °C por 2,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 4)

50 °C por 5,5 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 5)

50 °C por 6,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 6)

40 °C por 13,0 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 7)

40 °C por 13,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 8)

Na Tabela 5.12 estão os valores de vigor do feijão para a interação entre os tratamentos de secagem feitos nas sementes e o período de armazenagem dessas sementes. Constata-se nesta tabela, que existe uma diminuição do vigor das sementes ao longo de todo o período de armazenamento, independentemente, dos tratamentos de secagem, embora existam alguns valores intermediários para os quais essas diminuições não são significativas.

Analisando-se ainda a Tabela 5.12 verifica-se, nas colunas, que não existe uma diminuição do vigor das sementes de feijão até o 12º mês de armazenagem para as sementes secas a 40 e 50 °C, embora se tenha observado neste período de 12 meses de armazenagem, que as sementes secas a 50 °C a partir de um teor de umidade inicial de 35% b.s. apresentou uma diferença significativa com a secagem feita a 40 °C, e mesmo teor de umidade inicial apenas no oitavo mês de armazenagem, conseqüentemente não se verificando essa diferença nos meses seguintes. Embora, nesta Tabela, exista uma análise bastante minuciosa da diminuição do vigor das sementes ao longo do tempo de armazenagem e em função dos tratamentos de secagem que sofreram essas sementes, o que torna essa análise bastante complexa, é possível, no entanto, identificar no final do período de armazenagem que as sementes podem ser secas a altas temperaturas, desde que alguns parâmetros sejam observados como tempo de residência no secador para cada temperatura elevada.

TABELA 5.12 - Comparações entre os valores médios de vigor das sementes de feijão para a interação entre os tratamentos de secagem e período de armazenagem

INTERAÇÃO entre Tratamento e Período de armazenagem								
Tratamentos	Período de armazenagem							Médias
	Meses							
	0	2	4	6	8	10	12	
1	74,68Aa	71,67 BCh	66,25 Dc	64,51DEc	62,33Dd	58,60 Ce	53,22CDf	64,47
2	74,68Aa	71,07 Cb	65,22 CDc	63,84 Ec	59,99Ed	57,39 BCe	52,14 Df	63,48
3	74,68Aa	72,34ABCb	67,05 CDc	65,98BCDcd	64,73Ccd	60,31Be	56,03ABf	65,87
4	74,68Aa	72,25ABCb	67,41BCc	65,68CDEcd	64,39Cd	59,47Be	54,88BCf	65,54
5	74,68Aa	72,89ABCa	67,96ABCb	67,44ABCb	65,27ABCc	63,92Ac	56,48ABd	66,95
6	74,68Aa	72,67ABCb	67,54ABCc	67,01ABCc	64,77 BCd	63,43Ad	56,18ABe	66,61
7	74,68Aa	73,58Aa	69,30Ab	67,98Abc	66,61ABc	64,41Ad	57,56Ac	67,73
8	74,68Aa	73,35ABa	69,12ABb	67,69ABbc	66,87Ac	64,00Ad	56,52ABe	67,46
Médias	74,68	72,48	67,48	66,27	64,37	61,44	55,38	66,01
DMS/coluna = 1,86 (letras maiúsculas) DMS/linha = 1,81 (letras minúsculas)								

Os valores seguidos pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e pelas mesmas letras minúsculas nas linhas não apresentam diferenças significativas entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.
DMS - Desvio mínimo significativo.

Neste trabalho fica claro que as sementes levam consigo algum efeito latente da temperatura elevada de secagem, mas fica mais evidente ainda que este efeito latente é inibido se a temperatura de armazenagem for adequada para que o processo degenerativo não se inicie. Uma vez iniciado esse processo degenerativo, decorrente da colocação dessas sementes em ambientes inadequados, os fatores latentes aparecem com maior amplitude nas sementes secas

às temperaturas acima de 50 °C, não implicando de maneira alguma em dizer que nas sementes secas a temperaturas mais amenas (40 °C) não ocorra o processo degenerativo se colocadas em ambientes inadequados, tornando essas sementes impróprias para o plantio, mas sim que, o processo degenerativo das sementes é mais acelerado quando essas são secas a determinadas temperaturas consideradas elevadas por determinado período de tempo e ainda quando colocadas em ambientes impróprios para a sua conservação.

Essas observações indicam que a temperatura de armazenagem é um fator importante para a preservação da qualidade fisiológica das sementes confirmando as afirmações feitas por POPINIGIS (1985) quando relatam que a temperatura do ar onde as sementes são armazenadas é um dos fatores que mais influenciam na conservação das sementes.

4.3 Teor de umidade, peso de 1000 sementes e massa específica das sementes de feijão armazenadas

Nas Tabelas 5.13, 5.14 e 5.15 estão os dados médios respectivamente do teor de umidade, peso de 1000 sementes e massa específica das sementes de feijão "carioca" armazenados por 12 meses depois de terem sido submetidas a diversos tratamentos de secagem.

Para estas tabelas nenhum tipo de análise estatística foi feito uma vez que estas determinações foram realizadas com a finalidade de dar informações de uma possível alteração das características físicas das sementes. Como este fato não ocorreu, foi possível fazer os relatos com mais segurança do que ocorreu com a germinação e o vigor das sementes de feijão.

As informações importantes que podem ser obtidas destas tabelas é que, para os oito tratamentos de secagem estudados o teor de umidade das sementes tende a entrar em equilíbrio com as condições ambientais controladas depois de dois meses de armazenamento e tende a não variar até os 12 meses de armazenagem. As oscilações encontradas são próprias da natureza biológica do produto e o teor de umidade para a temperatura de armazenamento de 10 °C oscila entre 12,1 e 12,7 %, base úmida (b.u.), a 20 °C entre 11,0 e 11,5% b.u. e para 30 °C entre 10,0 e 10,5% b.u.

Para a massa de 1000 sementes, Tabela 5.14, observa-se que existem pequenas variações para cada temperatura de armazenamento. No entanto, este fato decorre das mudanças de umidade pois, como observado na Tabela 5.13, as sementes tendem a entrar em equilíbrio com o ar que está sob condições controladas, e neste caso as sementes cedem água para o ar ambiente diminuindo de massa. Os valores encontrados para a massa de 1000 sementes estão entre 282,3 e 293,7 gramas para as sementes armazenadas à temperatura de 10 °C e 45 % de umidade relativa, entre 279,0 e 281,8 gramas para a temperatura de 20 °C e umidade relativa de 44% e entre 277,1 e 279,4 gramas para a temperatura de armazenagem das sementes de 30 °C.

Na Tabela 5.15 encontram-se os valores da massa específica das sementes de feijão armazenadas às temperaturas de 10, 20 e 30 °C, verificando-se uma variação dessa massa específica ao longo de 12 meses de armazenamento entre 830,5 e 887,6 kg.m⁻³ para a temperatura de 10 °C, de 829,0 a 881,8 kg.m⁻³ para 20 °C e de 838,0 a 879,7 kg.m⁻³ para a temperatura de armazenagem das sementes de 30 °C. Nesta tabela não se verifica uma tendência de variação da massa específica em função do tempo de armazenagem ou da sua temperatura, muito menos dos processos de secagem.

TABELA 5.13 - Dados médios de teor de umidade (% base úmida) das sementes de feijão "carioca" armazenados por 12 meses depois de terem sido submetidas a diversos tratamentos de secagem

Temperatura de 10 °C							
Meses							
Tratamentos	0	2	4	6	8	10	12
1	12,0	12,6	12,7	12,6	12,5	12,5	12,3
2	12,0	12,5	12,1	12,7	12,4	12,7	12,7
3	12,0	12,7	12,7	12,7	12,3	12,7	12,4
4	12,0	12,1	12,3	12,7	12,7	12,3	12,7
5	12,0	12,3	12,2	12,4	12,7	12,1	12,7
6	12,0	12,7	12,3	12,6	12,7	12,7	12,6
7	12,0	12,7	12,7	12,3	12,3	12,3	12,5
8	12,0	12,3	12,3	12,7	12,3	12,6	12,7
Temperatura de 20 °C							
Meses							
Tratamentos	0	2	4	6	8	10	12
1	12,0	11,0	11,2	11,5	11,3	11,3	11,1
2	12,0	11,3	11,0	11,2	11,5	11,2	11,3
3	12,0	11,1	11,2	11,2	11,3	11,1	11,5
4	12,0	11,5	11,3	11,0	11,3	11,0	11,1
5	12,0	11,1	11,3	11,3	11,5	11,1	11,0
6	12,0	11,0	11,5	11,3	11,1	11,3	11,2
7	12,0	11,1	11,5	11,4	11,3	11,3	11,1
8	12,0	11,2	11,3	11,0	11,0	11,5	11,0
Temperatura de 30 °C							
Meses							
Tratamentos	0	2	4	6	8	10	12
1	12,0	10,3	10,3	10,1	10,4	10,0	10,3
2	12,0	10,2	10,0	10,3	10,0	10,3	10,0
3	12,0	10,0	10,3	10,1	10,0	10,0	10,3
4	12,0	10,3	10,0	10,3	10,4	10,3	10,3
5	12,0	10,3	10,0	10,1	10,0	10,5	10,4
6	12,0	10,3	10,3	10,3	10,4	10,4	10,3
7	12,0	10,4	10,4	10,2	10,3	10,0	10,0
8	12,0	10,0	10,0	10,3	10,0	10,5	10,1

70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 8 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 1)

70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 10 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 2)

60 °C por 1,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 3)

60 °C por 2,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 4)

50 °C por 5,5 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 5)

50 °C por 6,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 6)

40 °C por 13,0 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 7)

40 °C por 13,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 8)

TABELA 5.14 - Dados médios de massa de 1000 sementes de feijão "carioca" armazenadas por 12 meses depois de terem sido submetidas a diversos tratamentos de secagem

Temperatura de 10 °C							
Tratamentos	Meses						
	0	2	4	6	8	10	12
1	286,8	282,7	291,6	287,4	290,4	289,4	290,5
2	286,8	284,3	287,6	291,3	289,2	282,9	289,6
3	286,8	287,1	282,8	293,7	291,1	288,5	282,9
4	286,8	293,4	283,9	287,2	282,3	286,4	287,6
5	286,8	292,5	287,3	288,1	285,6	287,3	289,6
6	286,8	285,5	290,5	287,3	284,7	291,6	286,8
7	286,8	282,5	291,6	283,4	287,7	288,9	287,7
8	286,8	290,4	288,4	287,9	282,6	291,6	291,1
Temperatura de 20 °C							
Tratamentos	Meses						
	0	2	4	6	8	10	12
1	286,8	279,0	281,3	281,0	279,7	281,3	281,7
2	286,8	280,3	280,4	281,2	281,0	280,2	279,8
3	286,8	280,9	279,7	281,2	280,3	280,1	280,9
4	286,8	281,7	279,8	280,9	281,3	279,0	281,7
5	286,8	281,3	281,1	281,3	280,0	280,1	279,6
6	286,8	280,4	281,0	280,3	279,1	281,3	280,2
7	286,8	279,9	281,4	281,4	281,3	281,8	280,1
8	286,8	279,8	280,5	281,0	281,0	281,0	281,3
Temperatura de 30 °C							
Tratamentos	Meses						
	0	2	4	6	8	10	12
1	286,8	278,3	277,3	279,1	279,4	277,9	278,3
2	286,8	277,8	278,0	279,3	278,5	277,6	278,8
3	286,8	278,0	277,3	279,1	279,0	278,6	277,6
4	286,8	277,3	278,0	278,3	277,4	279,3	279,3
5	286,8	278,3	279,0	277,1	278,0	277,5	279,4
6	286,8	277,3	279,3	278,3	278,4	278,4	278,8
7	286,8	277,4	278,4	278,2	279,3	279,0	278,7
8	286,8	278,0	278,0	278,3	279,0	278,5	277,1

70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 8 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 1)
 70 °C por 1,0 h e secagem complementar a 40 °C por 10 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 2)
 60 °C por 1,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 25 % b.s. (Tratamento 3)
 60 °C por 2,5 h e secagem complementar a 40 °C por 7,5 h. - Ui - 35 % b.s. (Tratamento 4)
 50 °C por 5,5 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 5)
 50 °C por 6,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 6)
 40 °C por 13,0 h - Ui de 25 % b.s. (Tratamento 7)
 40 °C por 13,5 h - Ui de 35 % b.s. (Tratamento 8)

4.4. Equações de predição do decréscimo da germinação e do vigor das sementes de feijão

Na Tabela 5.16 encontram-se as equações que estimam a queda da germinação e do vigor das sementes de feijão que sofreram um processo de secagem a diferentes temperaturas (40, 50 °C e a 60 e 70 °C, por curto período de tempo e secagem complementar a 40 °C), durante o período de 12 meses de armazenamento para as temperaturas do ar de armazenagem de 10, 20 e 30 °C e umidades relativas correspondentes de 45, 44, 43%. Nesta tabela estão os coeficientes de determinação de 97,19% para a germinação e 95,57% para o vigor, sendo que para uma equação genérica e 4 parâmetros envolvidos, pode-se dizer que a equação é satisfatória para expressar o que acontece com a germinação e o vigor das sementes ao longo de 12 meses de armazenamento. As Figuras 5.3 e 5.4 mostram os dados experimentais e as curvas calculadas por essas equações.

Observando as Figuras 5.3 e 5.4 pode-se dizer, que de uma maneira mais prática que as sementes de feijão “carioca” podem ser armazenadas à temperatura de 10 °C que estas preservam sua qualidade fisiológica, mesmo quando as sementes são secas a altas temperaturas por curtos períodos de tempo. No entanto, quando armazenadas a temperaturas mais elevadas os efeitos da secagem vão sendo revelados, alguns significativos outros não. Contudo, quando essas sementes são colocadas em ambientes de armazenamento a 30 °C esses efeitos latentes da secagem se pronunciam com mais evidência, ressaltando os danos causados pela secagem. Portanto, essa temperatura de armazenagem deve ser evitada, pois tanto as sementes secas a altas temperaturas como aquelas secas a temperatura recomendável, chegam praticamente no mesmo tempo de armazenagem, a valores inaceitáveis aos padrões de sementes de alta qualidade.

Pode-se dizer também que os dados de vigor são excelentes auxiliares na avaliação de lotes de sementes de alta qualidade, pois estes definem bem diferenças existentes entre sementes aparentemente com mesmo poder germinativo, o que vem de encontro com as afirmações feitas por ISELY (1957) e CAMARGO e VECHI (1971), que dizem que devido a existir deficiências no teste de germinação, alguns testes de vigor foram propostos de modo a identificar parâmetros não revelados pelo teste de germinação.

TABELA 5.16 - Equações para estimar a diminuição da germinação e vigor das sementes de feijão “carioca” secas às temperaturas de 40 e 50 °C, e a 60 e 70 °C por curto período de tempo e secagem complementar a 40 °C, armazenada pelo período de 12 meses às temperaturas de 10, 20 e 30 °C.

Equação para germinação
$\%G = 97,0 - 6,9055894 \cdot 10^{-11} \cdot (Ts^{1,202297} \cdot Ui^{0,4647165} \cdot Ta^{5,4383525} \cdot ta^{0,82831424}) \quad R^2 = 97,19\%$
Equação para o vigor
$\%V = 93,0 - 4,619287 \cdot 10^{-7} \cdot (Ts^{0,728399} \cdot Ui^{0,207027} \cdot Ta^{3,591455} \cdot ta^{1,121702}) \quad R^2 = 95,57\%$
Ui - umidade Inicial do produto antes da secagem , % base seca Ts - temperatura de secagem, °C Ta - temperatura de armazenagem, °C ta - tempo de armazenagem, meses

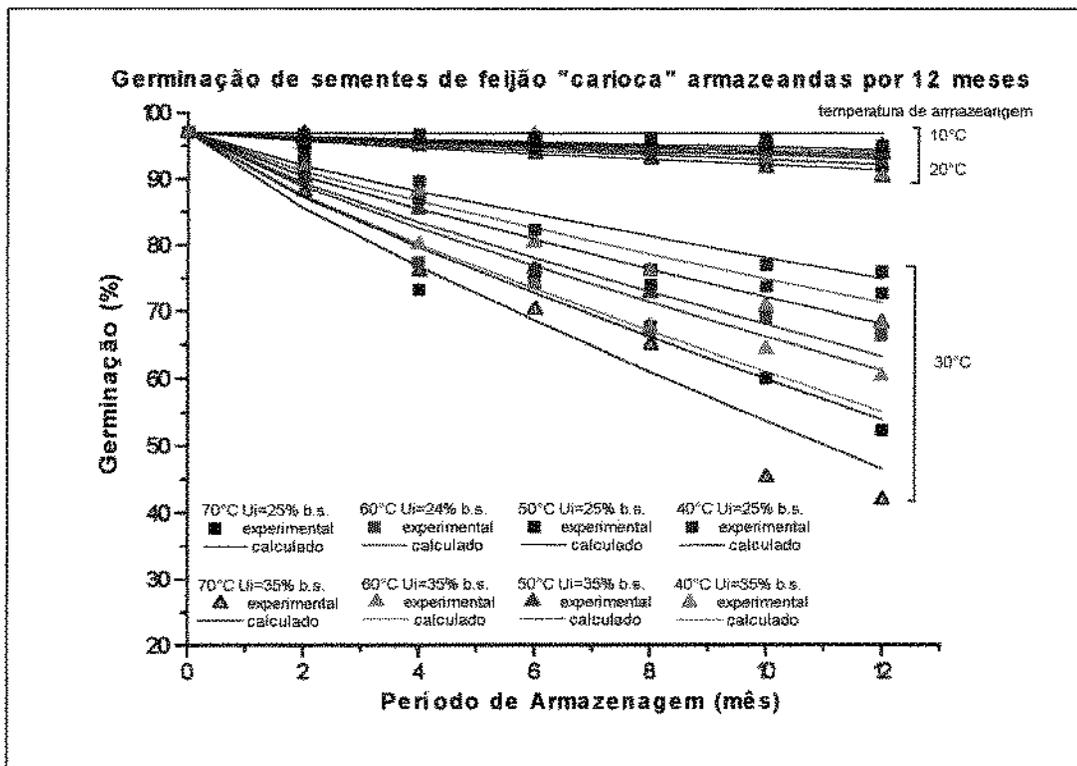


FIGURA 5.3 - Germinação das sementes de feijão "carioca" secas às temperaturas de 40 e 50°C, e a 60 e 70°C por curto período de tempo e secagem complementar a 40°C, armazenadas pelo período de 12 meses às temperaturas de 10, 20 e 30°C.

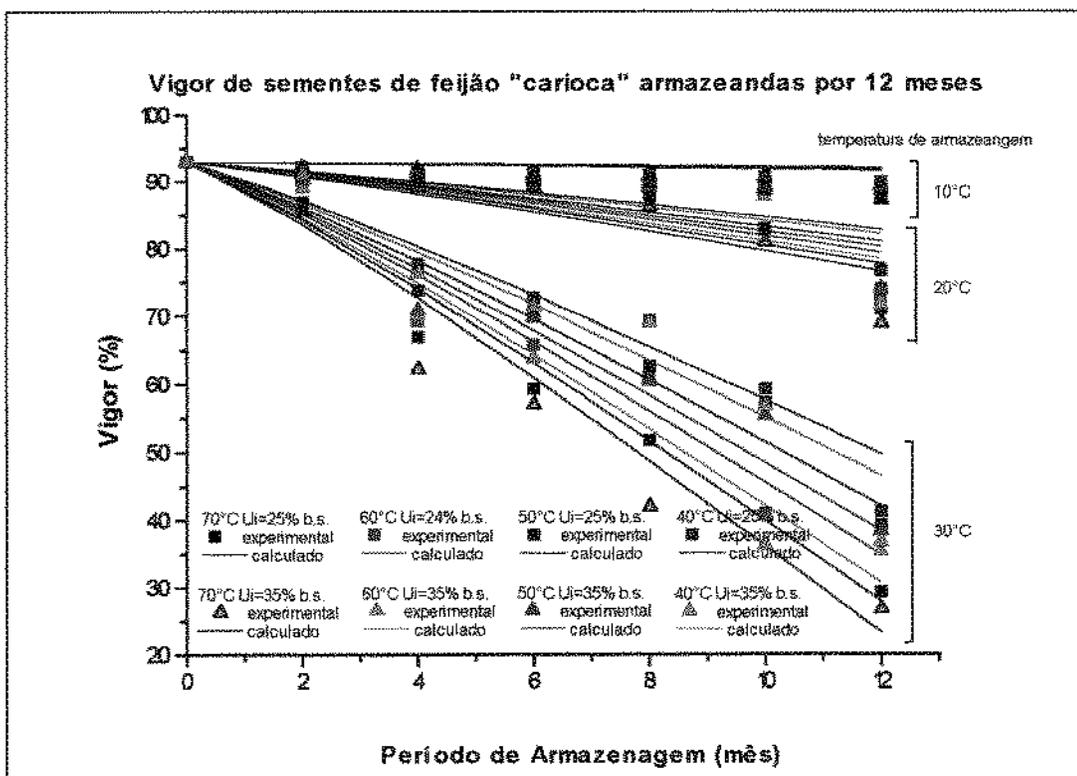


FIGURA 5.4 - Vigor das sementes de feijão "carioca" secas às temperaturas de 40 e 50°C, e a 60 e 70°C por curto período de tempo e secagem complementar a 40°C, armazenadas pelo período de 12 meses às temperaturas de 10, 20 e 30°C.

5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados sobre a armazenagem de sementes de feijão “carioca” pelo período de 12 meses, sob condições controladas de temperatura, para as sementes secas com diferentes tratamentos permite concluir que:

- A germinação e o vigor das sementes de feijão diminuem com o aumento da temperatura de armazenagem de 10 para 30 °C e com o aumento do período de armazenagem.
- A temperatura de armazenagem de 30 °C, mesmo a baixa umidade relativa (43%), não é recomendada para conservar sementes de feijão com alta qualidade fisiológica, pois com 2 meses de armazenamento estas apresentam perdas significativas de sua germinação e vigor.
- As sementes quando armazenadas à temperatura de 10 °C preservam o seu poder germinativos até o 10^o (décimo) mês e o seu vigor até o 4^o (quarto) mês.
- Para as sementes de feijão secas às temperaturas de 40 e 50 °C não houve diferenças significativas entre esses dois tratamentos na sua qualidade fisiológica, quando armazenadas às temperaturas de 10, 20 e 30 °C.
- Para as sementes de feijão secas a 70 °C por 1 hora e secagem complementar a 40 °C ocorreu um efeito degenerativo latente e este aparece com mais evidência quando as sementes são armazenadas a 30 °C; na armazenagem a 20 °C este efeito aparece moderadamente e praticamente não se evidencia quando as sementes são armazenadas a 10 °C.
- As equações seguintes expressam razoavelmente as perdas do poder germinativo das sementes e de seu vigor em função da temperatura de secagem das sementes (Ts), teor de umidade inicial das sementes antes da secagem (Ui), temperatura de armazenagem (Ta) e período de armazenamento (ta):

$$\%G = 97,0 - 6,9055894 \cdot 10^{-11} \cdot (T_s^{1,202297} \cdot U_i^{0,4647165} \cdot T_a^{5,4383525} \cdot t_a^{0,82831424})$$

$$\%V = 93,0 - 4,619287 \cdot 10^{-7} \cdot (T_s^{0,728399} \cdot U_i^{0,207027} \cdot T_a^{3,591455} \cdot t_a^{1,121702})$$

- O teor de umidade das sementes de feijão durante o armazenamento tendem para a umidade de equilíbrio e oscila entre 12,1 e 12,7 % base úmida (b.u.), para a temperatura de 10 °C, entre 11,0 e 11,5% b.u. para a temperatura de 20 °C e entre 10,0 e 10,5% b.u. para a temperatura de 30 °C.
- A massa de 1000 sementes está entre 282,3 e 293,7 gramas para as sementes armazenadas à temperatura de 10 °C e 45 % de umidade relativa, entre 279,0 e 281,8 gramas para a temperatura de 20 °C e umidade relativa de 44% e entre 277,1 e 279,4 gramas para a temperatura de armazenagem das sementes de 30 °C.
- A massa específica das sementes encontrada ao longo de 12 meses de armazenamento está entre 830,5 e 887,6 kg.m⁻³ para a temperatura de 10 °C, de 829,0 a 881,8 kg.m⁻³ para 20 °C e de 838,0 a 879,7 kg.m⁻³ para a temperatura de armazenagem das sementes de 30 °C, não se verificam uma tendência de variação da massa específica em função do tempo de armazenagem ou da sua temperatura, muito menos dos processos de secagem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho foi verificar se as sementes de feijão poderiam ser secas a altas temperaturas por curtos períodos de tempo, sem que houvesse perda de sua qualidade fisiológica. Procurou-se estruturar esta pesquisa de modo a dar uma complementariedade a este objetivo. Para tanto, necessitou-se conhecer algumas propriedades físicas das sementes, curvas de secagem em camada delgada e desenvolver um programa para simular diversas situações de secagem para determinar os perfis de umidade e temperatura ao longo de um secador de leito fixo. Trabalhou-se no sentido de encontrar o ponto em que as sementes começam a ser afetadas pela ação da temperatura durante a secagem em camada delgada, determinando-se o tempo de residência das sementes no secador para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Constatou-se que as sementes podem ser secas a altas temperaturas por curtos períodos de tempo que sua qualidade fisiológica não é afetada imediatamente depois da secagem, desde que sejam respeitados os tempos de residência no secador para cada temperatura estudada. Observou-se neste trabalho que existe um efeito latente degenerativo nas sementes, que é levado para a armazenagem, quando estas são secas a altas temperaturas por curtos períodos de tempo, principalmente com a temperatura de 70 °C. Estes efeitos se revelam com mais intensidade quando as condições de armazenagem não são adequadas para uma conservação satisfatória de sementes de alto padrão de qualidade. No entanto, não conservar sementes adequadamente também parece um despropósito, já que um esforço ímpar foi empregado para obtê-la neste referido padrão. Na armazenagem feita a 10 °C estes efeitos degenerativos das sementes não se fazem sentir quando secas a altas temperaturas por curtos períodos de tempo, mesmo à temperatura de 70 °C.

Portanto, a sequência deste trabalho parece interessante e, para que possa ser implantada com êxito, recomenda-se dar sequência em alguns tópicos não abordados nesta pesquisa. Assim, recomenda-se para futuros trabalhos estudar:

- a) A quantidade energética envolvida no sistema e otimização do secador.
- b) Estudo econômico de sua implantação.
- c) Estudar se o comportamento ora apresentado pelo feijão "carioca", também ocorre para outras variedades de feijão.
- d) Desenvolver um sistema de controle que permita automatizar o processo de secagem a alta temperatura, prevendo o máximo de tempo de residência que a semente pode ficar exposta a essa temperatura no secador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR, P.C. **Efeito imediato e latente, da temperatura do ar de secagem sobre a qualidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade "ouro negro 1992"**. Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa, 1996. 70p. (Tese de Mestrado).
- AGRAWAL, K.K.; CIARY, B.L. ; NELSON, G. L. Investigation into the theories of desorption for rough rice and peanuts. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph Mich., p. 1 - 33, (s. d.).
- ALAN, A. E; SMOVE, G.C. Simulation of soybean drying. **Transactions of the ASAE**, v.16, n.1, p. 134-136, 1973.
- ALMEIDA, B. V. **Determinação das propriedades físicas de amêndoas de cacau**. Viçosa. UFV, 1979 (Tese M. S.).
- ALMEIDA, F. A.C. **Efeito da temperatura e umidade relativa do ar sobre a germinação, vigor e teor de umidade de sementes armazenadas de algodão. (*Gossypium hirsutum* L. r. latifolium, HUTCH)**. Areia, UFPB, 1981. 65 p. (Tese de Mestrado).
- ALMEIDA, F.A.C.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. Tratamento térmico e mecânico para superar a dormência em sementes de umbu (*Spondia tuberosa*, Arruda Câmara) **Revista Nordestina de Armazenagem**. Campina Grande - PB, a. 4, n. 2, p. 27-39, 1987/1990.
- ALMEIDA, F. A. C.; CAVALCANTI MATA, M. E. R.M.; MARTINS, J. H. Dormência das sementes de algodão sob condições controladas de armazenamento. **Revista Nordestina de Armazenagem**, Campina Grande - PB. a. 2, n. 1, p. 22-36, 1985a.
- ALMEIDA, F. A. C.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; VIEIRA, R. M.; SANTOS, E. O. Perda da qualidade fisiológica das sementes do algodoeiro durante o armazenamento. **Revista Nordestina de Armazenagem**, Campina Grande-PB. a. 2, n. 2, p. 03-27, 1985b.
- ALVARENGA, L.C.; FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J.B.; HARA, T. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão-preto sob condições de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa-MG, v. 5, n. 1, p. 5 - 18, 1980.
- ARAÚJO, E.F. **Influência da secagem e debulha das vagens na germinação e no vigor de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa, 1983. 74 p. (Tese de Mestrado).
- ASAE-STANDARDS. **Standards Engineering Practices Data**. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan, 1983. 534 p.
- ASAE-STANDARDS. **Standards Engineering Practices Data**. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan, 1993. 784 p.
- AYERST, G. Determination of water activity of some hygroscopic food materials by a dew-point method. **J. Science Food Agricultural**. v. 6, p. 71-78, 1965.

- AZEVEDO, J.T. de; LAUDARES FILHO, L. A produção de sementes de feijão de alta qualidade. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 8, n. 90, p. 34-35, 1982.
- BABBIT, J.D. Observations on the differential equations of diffusion. **Canadian Journal of Research**, a. 18, p. 419-474, 1950.
- BACH, D. B. **Curvas de equilíbrio higroscópico de feijão preto**. Viçosa-MG, UFV, 1979. 39p. (Tese Mestrado).
- 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).
- BAUGMMAN, G.R., HANDY, M.Y.; BARRE, H.J. Analog computer simulation of deep-bed drying of grain. **Transaction of the ASAE**, v. 14, n.6, p. 1058 - 1060, 1971.
- BECKER, H.A.; SALLANS, H.T. A study of the desorption isotherms of wheat at 25 °C and 50 °C. **Cereal Chemistry**. v. 33, p. 79-91, 1956.
- BERBERT, P.A. **Secagem de café (*Coffea arabica* L.), em camada fixa, com inversão de sentido de fluxo de ar**. Viçosa-MG. Universidade Federal de Viçosa, 1991. 83 p. (Tese de Mestrado).
- BLOOME, P.D.; SMOVE, G.C. Near equilibrium simulation of shelled corn drying. **Transactions of the ASAE**, v.14, n.4, p. 709-712, 1971.
- BORÉM, F.M. **Efeito da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem sobre a qualidade de sementes de milho (*Zea mays* L.), híbrido AG-303**. Viçosa, MG. 39 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1992.
- BOSCO, J.; POPINIGIS, F.; PESKE, S.T.; SILVEIRA Jr, P. Armazenamento de sementes de feijão vigna (*Vigna unguiculata* (L). Walp) em algumas localidades do Norte e Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 5, n. 2, p. 37-42, 1980.
- BRAGA, M. E. D. **Estudo da histerese entre as isotermas de sorção e dessorção do milho BR-451**. Campina Grande - PB, Universidade Federal da Paraíba, 1991. 70p. (Tese de Mestrado).
- BRAGA, M.E.D.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. Curvas de dessorção do milho BR-451. Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, Campina Grande, PB **Boletim Técnico No. 6**, 1992. 21 p.
- BRASIL, Ministério da Agricultura. **Regras para análises de sementes**. Brasília: 1980. 2a ed. 218 p.
- BRASIL, Ministério da Agricultura. **Regras para análises de sementes**. Brasília:1976. 188 p.
- BROOKER, D.B.; ARKEMA, F.W.B.; HALL, C.W. **Drying cereal grains**. Connecticut, the AVI publishing company, inc. 1974, 265 p.

- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York, The AVI Van Nostrand Reinhold, 1992, 450p.
- BYRD, H.B.; DELOUCHE, I.C. Deterioration of soybean seed in storage. **Proc. Ass. Off. Seed Analysts**. v. 61, p. 41-57, 1971.
- CANEPPELE, C; HARA, T.; MARTINS, J.H.; CAMPELO JÚNIOR, J.H. Simulação de secagem de arroz (*Oriza sativa* L.). In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 22, **Anais**. Ilhéus, BA, CEPLAC, v. 2, p. 1080-1090. 1993.
- CAMARGO, C.P.; VECHI, C. Pesquisas em tecnologia de sementes In: Encontro Nacional de Técnicos em Análises de Sementes, 1. **Anais**. Porto Alegre-RS, p. 151-186, 1971
- CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: Ciência, Tecnologia e Produção**. 2ª Ed. Campinas, Fundação Cargill, 1983. 429 p.
- CASTELLAN, G.W. **Físico-Química**. Vol. 1 Livros Técnicos e Científicos p.281, 302-312 . São Paulo, 1976.
- CAULLIEZ, A.; POISSON, J.; DROVET, H.; CHARPENTIER, M. Stockage de haricot secs (*Phaseolus vulgaris*). Evolution de leur microflore, de leur faculté germinative et de leur qualité technologique en fonction de caractéristiques de stockage. In: Technologie Agricole. **Annales**, Paris, v. 28, p. 57-77, 1979.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. **Pesquisas sobre secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Campina Grande-PB, Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, Universidade Federal da Paraíba., 1987. 165 p. (Relatório de Pesquisa).
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Campina Grande-PB, Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, Universidade Federal da Paraíba., 1992. 187 p. (Relatório de Pesquisa).
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. **Simulação de secagem do milho branco BR-451 em secador de camada estacionária**. Campina Grande - PB, Universidade Federal da Paraíba, 1993. 140 p. (Tese de Professor Titular).
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. Simulação de secagem de feijão em secador de camada estacionária. In: I Congresso Ibero-Americano de Engenharia de Alimentos. Campinas - SP. Paper C2-10. 16 p. 1995.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. Simulation for the drying of beans in a stationary layer drier. In: I Congreso Ibero-Americano de Ingenieria de Alimentos, **Anales**. Valencia, España, Tomo III, Capítulo III, p. 227-243, dez. 1996.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; ALMEIDA, F.A.C.; ARAGÃO, R.F. Determinação do teor de umidade de equilíbrio das sementes de feijão macassar (*Vigna unquiculata* (L) Walpers) variedade figado de galinha, pelo método estático. **Revista Nordestina de Armazenagem**, Campina Grande-PB. a. 1, n. 2, p. 57-71, 1984.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; ALMEIDA, F. de A.C.; MARTINS, J.H. Deterioração das sementes armazenadas de algodão (*Gossypium hirsutum* L. r. latifolium HUTCH).

- Revista Nordestina de Armazenagem**, Campina Grande - PB. a. 2, v. 1, p. 37-56, 1985.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; ARAGÃO, R.F.; SANTANA, E.F.; SILVA, F.A.S. Estudo da morfologia geométrica em grãos. **Revista Nordestina de Armazenagem**, Campina Grande-PB. a. 3, n. 1, p. 3-30, 1986.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; DANTAS, L.A.; BRAGA, M.E.D. Software aplicado a secagem de grãos. **Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola Viçosa-MG**. Paper No. 95-5- 429, 29 p. 1995.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; BRAGA, M.E.D.; QUEIROZ, A.J.M. Perda de qualidade fisiológica de sementes de arroz armazenadas sob condições controladas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 25 e II Congresso Latino-americano de Engenharia Agrícola, **Anais**. UNESP. Bauru-SP. 1996. p. 386 (Trabalho publicado na íntegra em CD).
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; MARTINS, J.H.; ALMEIDA, F.A.C. Histerese em sementes de feijão mulatinho (*Phaseolus vulgaris* L.) variedade paulista. **Revista Nordestina de Armazenagem**, Campina Grande-PB. a. 2, n. 2, p. 28-44, 1985.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; OLIVEIRA, M.R.T. Estudo das curvas de secagem do feijão mulatinho (*Phaseolus vulgaris* L.) em camada fina. Núcleo de Tecnologia em Armazenagem - UFPB, Campina Grande - PB. **Boletim Técnico Nº 4**, 1989, 33 p.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; PINHEIROS FILHO, J.B.; FORTES, M. Estudo experimental de seca-aeração de amêndoas de cacau em camadas finas. **Revista Brasileira de Armazenagem**. Viçosa - MG, v. 5, n. 2, dezembro de 1980.
- CHAKRABARTI, S.M. & JOHNSON, W.H. Specific heat of flue cured tobacco by differential scanning calorimetry. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 5, n. 15, p. 928-931, 1972.
- CHINNAM, M.S.; YOUNG, J.H. A study of diffusion equations describing moisture movement in peanut pods - I: comparison of vapor and liquid diffusion equations. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v. 20, n. 3, p. 539-546, 1977.
- CHITTENDEN, D.H. **Drying of single kernels and deep beds of shelled corn**. . Wisconsin, University of Wisconsin, 1961, 214 p. (Thesis Ph.D.).
- CHRIST, D. **Curvas de equilíbrio higroscópico e de secagem da canola (*Brassica napus* L. var. *oleifera*), e efeito da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem sobre a qualidade das sementes**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 50p. (Tese Mestrado).
- CHRISTENSEN, C.M. **Storage of cereal grains and their products**. Minnesota, American Association of cereal Chemists, 1974. 549 p.
- CHUNG, D.S.; HUSTRULID, A. Numerical solution of diffusion equations. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v. 11, n. 5, p. 705-708, 1968.

- CHUNG, D.S.; PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 10, n. 4, p. 149-157, 1967.
- CIRNE, L.E.M.R **Armazenagem alternativa de feijão mulatinho à nível de pequeno produtor**. Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1992. 85p. (Tese de Mestrado).
- CIRNE, L.E.M.R.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; SCAICO, M.A. Estudo do vigor e germinação de sementes de feijão mulatinho (*Phaseolus vulgaris* L.) submetidas a diferentes condições de armazenagem. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 21, **Anais**. Santa Maria-RS. v.4, p. 1918-1932, Julho de 1992.
- COELHO, R.C. Efeito imediato de danos mecânicos em sementes de soja (*Glycine max* (L.) Merrill. **Sementes**. Brasília, v. 9, p. 8-9, 1974.
- CRANK, K.J. The diffusion equations, The mathematics of diffusion. Oxford. **Clareance Press**, 1957, p. 1-10.
- CURRAY, J.K. **Analysis of sphericity and roundness of quartz grains**. Pennsylvania State University. 1951. 56 p. (Thesis M.Sc.).
- DALPASQUALE, V.A. **Drying of soybeans in continuous-flow and fixed-bed drying systems**. East Lansing, Michigan State University, 1981. 154p. (Tese de Ph.D.)
- DALPASQUALE, V.A.; QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M.; SINÍCIO, R. **Secagem de grãos em altas temperaturas**. Centro Nacional de treinamento em Armazenagem - CENTREINAR, Viçosa, MG. 1987. 47p.
- DAY, D.L. and NELSON, G.L. Desorption isotherms for wheat. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 8, n. 4, p. 293-297, 1965.
- DEL GIUDICE, P.M.; ALVARENGA, S.C.; CONDE, A.R. Estudo comparativo de diferentes processos de armazenagem de feijão preto. **Experientiae**, Viçosa, v. 13, n. 9, p. 273- 313, 1972.
- DELOUCHE, J.C. **Determinants of seed quality**, Mississippi, Seed Technology Laboratory p.53-68. 1971.
- DELOUCHE, J.C. Metodologia de pesquisa em sementes II. Secagem, beneficiamento e armazenamento. **Revista Brasileira de Sementes, Brasília**, v. 3, n. 2, p. 48-55, 1981.
- DELOUCHE, J.C.; BASKIN, C.C. Vigor determines performance of cottonseed. **Cotton Internacional**, Willoughby, v. 24, p. 65-70, 1970.
- DELOUCHE, J.C.; CALDWELL, W.P. Seed vigor and vigor test. **Proc. Assoc. off Seed Anal.**, v.50, n. 1, p. 124-129. 1960.
- DISNEY, R.W. The specific heat of some cereal grains. **Cereal Chemistry**, Slough, Bucks, England, v. 31, n. 3, p. 229-239, 1954.

- DUCAN, G.A.; BUNN, J.M.; HENSON, W.H. Specific heat of burley tobacco during the cure. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 11, n. 4, p. 480-483, 1968.
- FIGUEIRÊDO, R.M.F.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; QUEIROGA, V.P. Armazenamento das sementes de arroz em diferentes embalagens e microregiões do Estado da Paraíba II - Vigor. **Boletim Técnico No. 12**. Núcleo de Tecnologia em Armazenagem Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande - Paraíba, 1994. 22 p.
- FORTES, M. **A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary-porous media with special reference to drying of grains and foods**. Purdue University, 1978, 226 p. (Tese de Doutorado)
- FORTES, M.; OKOS, M. R. A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary-porous media In: Proceedings of the First International Symposium of Drying (Ed. A.S. Mujundar), **Sciences Press**, Princeton, USA, 1978.
- FORTES, M.; OKOS, M.R. Changes in physical properties of corn during drying. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v. 23, n. 4, p. 1004-1008, 1980.
- FORTES, M.; OKOS, M.R. Heat and mass transfer in hygroscopic capillary extruded products. **AICHE J.**, St. Joseph, v. 27, n. 2, p. 102-113, 1981.
- FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J.B.; OKOS, M.R. Estudo de secagem de duas variedades de milho em camadas finas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa-MG, v. 7, n. 1, p. 27-32, 1982.
- GERZHOI, A.P.; SAMOCHETOU, V.F. **Grain drying e grain dryers**. Translations, 1960.
- GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: 10 ed. NOBEL, 1982. 430 p.
- GRABE, D.F. Significance of seedling vigor in corn. **Proc. Hybrid Corn Res. Conf.** v. 21, p. 34-39. 1966.
- GRABE, D.F. **Opportunities for progress in seed germination testing**. Mississippi, Seed Technology Laboratory, 1968. p. 58-63.
- GUIMARÃES, A.C.; QUEIROZ, D.M.; DONZELES, S.M.L. Secagem de café em secador de leito fixo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 20, **Anais**. Londrina, PR, v. 2, 1991.
- GURR, C.C.; MARSHALL, T.J.; HUTTON, J.T. Movement of water in soil due to a temperature gradient. **Soil Science**, Baltimore, Maryland, n. 74, p. 335-345, 1952.
- GUSTAFSON, R.J. **Equilibrium moisture of shelled corn from 50 °F to 155 °F**. Urbane, Illinois, University of Illinois, 1972. 63p. (Thesis M.Sc.).
- HALL, C.W. **Drying farm crops**. Ann Arbor, Eduards Brothers, Michigan, 1971, 336p.
- HALL, C.W.; RODRIGUES-ARIAS, J.H. Equilibrium moisture content of shelled corn. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, Michigan, v. 39, n. 8, p. 466-470, 1958.

- HARRINGTON, J.F. Problems of seed storage. In: HEYDECKER W. **Seed Ecology**. University Park and London. The Pennsylvania State University press, n. 14, p. 251-262, 1972a.
- HARRINGTON, J.F. Seed storage and longevity, In: KOSLOWSKI, T. Ed. **Seed Biology**. New York, Academic Press, p. 145-245, 1972b.
- HENDERSON, S.M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, Michigan, v. 33, n. 1, p. 29-32, 1952.
- HENDERSON, S.M. Equilibrium moisture content of small grain- hysteresis. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 13, n. 6, p. 762-764, 1970.
- HENDERSON, S.M.; PABIS, S. Grain drying theory - I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Wrest Park, Silsol, Gedford, v. 6, n. 32, p. 169-174, 1961.
- HENDERSON, S.M.; PABIS, S. Grain drying theory - IV. The effect of airflow rate on the drying index. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London v. 7, n. 2, p. 85-89, 1962.
- HENRY, P.S.H. Diffusion in absorbing media **Proc. Royal Society**, 171-A, p.215 - 241, 1939.
- HEYDECKER, W. 1972. Vigour. In: ROBERTS, E.H., (ed). **Viability of seed**. Siracuse: Siracuse University Press, p. 209-252. 1972.
- HLINKA, I.; ROBINSON, A.D. Moisture and its measurement in storage of cereal grains and their products. **American Association of Cereal Chemist**, St. Paul, Minnesota, 1954.
- HUBBARD, J.E.; FARLE, F.R.; SENTI, F.R. Moisture relations in wheat and corn. **Cereal Chemistry**, v. 34, n. 6, p. 422-432, 1957.
- HUBINGER, M. D. **Modelagem, simulação e avaliação energética e exergetica de secadores a leito deslizante**. Campinas - São Paulo, UNICAMP, 1994. 179 p. (Tese Doutorado).
- HUKILL, W. V. Drying of grain. In: Christensen, C.M. Ed. **Storage of cereal grains and their products**. 2 Ed. St. Paul, Minn. American Society of cereal Chemists, 1974, p. 481-508.
- HUSTRULID, A.; FLIKKE, A.M. Theoretical drying curve for shelled corn. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v. 2, n. 1, p. 31-34, 1959.
- ISELY, D. Vigor test. **Proceedings of the Association of Official Seed Analysts**. North Bruswich, n.47, p. 177-182, 1957.
- JORDÃO, B.A.; CARVALHO, G.R.; SARTORI, M.R.; ANGELUCCI, E.; LEITÃO, M.F.F.; COSTA, S.I.; MIYA, E.E. Armazenamento de feijão de mesa em escala industrial, a granel em silo ventilado artificialmente. **Coletânea do ITAL**, Campinas, v. 7, p. 265-298, 1976.

- KAZARIAN, E.A.; HALL, C.W. Thermal properties of grain. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 8, n. 1, p. 33-38, 1965.
- KEEY, R.B. **Drying: principles and practice**. Oxford, Pergammon Press, 1972, 358 p.
- KELVIN, W.T. Adsorption, surface area and porosity. **Academic Press**, New York, 1871.
- KOSOSKI, A.R. Dois métodos comparando a obtenção do equilíbrio higroscópico dos grãos. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa-MG, v. 2, n. 2, p. 31-43, 1977.
- KUZMAK, J.M.; SEREDA, P.J. The mechanics by which water moves through a porous material subjected to a temperature gradient II Salt tracer and streaming potential to detect flow in the liquid phase. **Soil Science**, Baltimore, Maryland, p. 419-422, 1957.
- LABUZA, T.P. Sorption phenomena in foods. **Food Technology** Vol. 22, no. 3, 1968.
- LI, H.; MOREY, R.U. Thin-layer drying of yellow dent corn. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v. 27, n. 2, p. 581-585, 1984.
- MANTOVANI, B.H.M. **Análise e simulação de secagem de grãos de milho em camadas espessas**. Viçosa-MG. Universidade Federal de Viçosa, 1976. 90 p. (Tese de Mestrado).
- MARCOS FILHO, J.; CÍCERO, S.M.; SILVA, W.R. da. **Avaliação da qualidade das sementes**. Piracicaba. FEALQ, 1987, 256 p.
- MARTINS, J.H. **Thin-layer drying rates of corn hybrids related to performance of high-speed, high temperature batch dryer**. West Lafayette, Purdue University, 1988, 340p. (Tese de Ph.D.).
- MARTINS, J.H.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. **Introdução à teoria e simulação matemática de secagem de grãos**. Núcleo de Tecnologia em Armazenagem. Campina Grande - PB, UFPB. 1984.
- MILLER, E.E.; MILLER, R.D. Theory of capillary: I practical implications. **Proc. Soil Science Society American**, n. 19, p. 267-271, 1975.
- MISRA, M.K.; BROOKER, D.B. Thin-layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v.12, n.8, p. 1254-1260, 1980.
- MOHSENIN, N.N. **Physical proprieties of plant and animal materials**. New York, Gordon and Breach Science Publishers, 1970. 734 p.
- MOKSHIN, P.N.; SILCHENKO, N.F. Drying of beans. **Agricultural and Horticultural Engineering Abstracts**, v. 13, n. 4, p. 252-253, 1982.
- MORAES, J.M. de **Determinação de parâmetros básicos de feijão cariquinho necessários ao modelamento matemático de secagem em camada espessa**. Campina Grande - PB, Universidade Federal da Paraíba, 1991. 70p. (Tese de Mestrado).

- 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 status of grains drying simulation.** St. Joseph, Michigan, 1978. 24 p. (ASAE Paper 78- 3009).
- MOYSEY, E.B.; SHAN, J.T. & LAMPMAN, W.P. The effect of temperature and moisture on the thermal properties of rapeseed. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 20, n. 4, p. 768-771, 1977.
- NASCIMENTO, J. W. B.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; MARTINS, J.H. Simulação de secagem de milho utilizando a energia térmica de um gasogênio de fluxo transversal descendente. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 20, **Anais.** Londrina - PR. v.1, p. 207-228, Junho de 1991.
- NEVES, M.J.B. **Processo de seca-aeração.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 55p. (Tese de Mestrado).
- NOOMHORM, A.; VERMA, L.R. **Deep-bed rice drying simulation.** California, California Polytechnic Institute, 1986. (ASAE PAPER 86.3058).
- NUNFORD, R.S. **Controlled temperature and humidity storage.** Mississippi, Seed Technology Laboratory, 1965. p. 145-156.
- O'CALLAGHAN, J.R.; MENZIES. D.J.; BAILEY, P.H. Digital simulation of agricultural drier performance. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London n. 16, p. 223-244, 1971.
- OLIVEIRA, M.R.T.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; BORA, P.S. Análise do teor de proteínas e da qualidade de cozimento do feijão mulatinho durante o processo de secagem. Núcleo de Tecnologia em Armazenagem - UFPB, Campina Grande - PB. **Boletim Técnico Nº 1**, 1988, 20 p.
- OTHMER, D.F. Correlating vapor pressure and latent heat data. **Industrial and Engineering Chemistry.** vol. 32, n. 6, p. 841-846. 1940).
- OVERHULTS, D.G.; WHITE, G.M.; HAMILTON, H.E.; ROSS, I.J. Drying soybeans with heated air. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v. 16, n. 1, p. 112-113, 1973.
- PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of drying shelled corn in layer.** West Lafayette, Department of the Agricultural Engineering. Purdue University, 1949.
- PATIL, B.G.; WARD, G.T. Heated air drying of rapeseed. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa, and Latin America.** v. 20, n. 4, p. 52-58, 1989.
- PERRY, D.A. Seed vigour and field establishment. **Hort. Abstr.** v. 42, p. 334-342. 1972.
- PHILIP, J. R.; De VRIES, D.A. Moisture movement in porous materials under temperature gradient. **Trans. Am. Geophys. Union**, v. 38, n. 2, p. 222-232, 594, 1957.

- PINHEIRO FILHO, J.B. **An experimental study of the effect of intermittent drying of soybeans on quality and rate of drying.** Purdue, Purdue University, 1976. (Thesis Ph.D.).
- POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente.** Brasília, Agricultura, AGIPLAN, 1977. 289 p.
- POPINIGIS, F. Preservação da qualidade fisiológica da semente durante o armazenamento, In: Seminário Nacional de Armazenagem, 2. Brasília. **Anais**, v. II, Brasília. 1977.
- POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente.** Brasília, AGIPLAN, (2a. ed) 1985. 298 p.
- POPINIGIS, F. Produção de sementes básicas In: Cultura do Feijoeiro. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p. 63-85, 1988.
- PUZZI, D. **Abastecimento e armazenamento de grãos.** Campinas, São Paulo. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. 1986, 603p.
- QUEIROZ, D.M. **Simulação de secagem de milho (*Zea mays* L.) em secadores de fluxos concorrentes.** Viçosa-MG. Universidade Federal de Viçosa, 1984. 69 p. (Tese Mestrado)
- QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M. Secagem de grãos em baixas temperaturas. Centro Nacional de treinamento em Armazenagem - CENTREINAR, Viçosa, MG. 1987. 50p.
- QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M.; MELO E.C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos.** Viçosa, Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, S/D. 55p.
- QUEIROZ, D.M., SILVA, J.S., MELO, E.C. **Prática de simulação de secagem em calculadoras programáveis.** Viçosa, Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1982. 84p. (Centreinar, n.3).
- QUEIROZ, D.M.; MELO, E.C.; SILVA, J.S. Comparação entre os modelos de secagem de milho de Thompson e de Hukill em computador IBM-360 e adaptados para a calculadora Texas TI-59. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 11, **Anais** Brasília-DF. v.1, p.459- 473, Junho de 1981.
- QUENOVILLE, M.H. **Associated Measurements.** Butter Worth Sprinter, Ltd. London, 1952.
- ROA, G.; MACEDO, I.C., **Drying of carioca dry beans with solar energy in a stationary bin.** American Society of Agricultural Engineers, Lincoln, Annual Meeting. Paper n° 76.3021. 1976.
- ROA, G.; ROSSI, S.J. Determinação experimental de curvas de teor de umidade de equilíbrio mediante a medição da umidade relativa de equilíbrio. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa-MG, v. 2, n. 2, p. 17-22, 1977.
- ROCHA, F.F. Fatores que afetam a conservação das sementes. In: **Curso sobre produção e tecnologia de sementes.** Pelotas, Universidade Federal de Pelotas p. 43-68, 1979.

- ROCKLAND, L.B. A new treatment of higroscopic equilibrium applications to walnuts (*Juglans regia*) and other foods. **Journal of Food Science**, Davis, California, v. 22, n. 1, p. 628-614, 1957.
- RODRIGUES-ARIAS, J.H. Heat of vaporization for shelled corn. **Agricultural Engineering** p. 677-683. 1963.
- ROSSI, S.J. **Ar natural e bomba de calor na secagem e armazenamento de sementes de soja**. Campinas, Universidade Federal de Campinas, 1980. 187 p.
- ROSSI, S.J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural**. São Paulo, Academia de Ciências do Estado de São Paulo. 1980, 295p.
- SABAATH, M.A. **Prediction of batch drying performance with natural air**. Purdue University, 1968, 120 p. (Tese Ph.D.).
- SARTORI, M.R. **Technological quality of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) stored under nitrogen**. Manhattan, Kansas State University. 1982. 60 p. (Tese de Ph.D.).
- SATHLER, M.G.B. **Secagem de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas finas, a baixas temperaturas e seus efeitos na germinação das sementes**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1979. 39p. (Tese de Mestrado).
- SCHOOREL, A.F. Report on the activities of the vigor test committee. **Proc. Intern. Seed Test. Assoc.** v. 25, p. 519-525, 1960.
- SILVA, F. de A. S. **Software estatístico ASSISTAT 6.1**. Departamento de Engenharia Agrícola - UFPB. 1996.
- SILVA, J.N. **Curvas de equilíbrio higroscópico do cacau**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1979, 64p. (Tese Mestrado).
- SILVA, J.N.; PINHEIRO FILHO, J.B. Curvas de equilíbrio higroscópico do cacau. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa-MG, v. 4, n. 2, p. 31-38, 1979.
- SILVA, J. S. S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora, MG. Instituto Maria, 1995. 500p.
- SINHA, R.N.; MUIR, W.E. **Grain storage: Part of System**. Westport, Connecticut, AVI Publishing Company, 1973. 58p.
- SINÍCIO, R. **Simulação de secagem de milho em camadas espessas a baixas temperaturas**. Viçosa-MG. Universidade Federal de Viçosa, 1983. 64 p. (Tese de Mestrado).
- 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.
- SINÍCIO, R.; ROA, G. Quantificação de umidade de equilíbrio para grãos. **In: III Seminário Nacional de Armazenagem**. Curitiba -PR. 1978.

- SNEDECOR, G.W. **Métodos estadísticos aplicados a la investigación agrícola y biológica.** México: Continental, 1966. 622 p.
- SOARES, J. B. **Curvas de secagem em camada fina e propriedades físicas de soja (*Glycine max* L.)** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1986. 91p. (Tese de Mestrado).
- SOKHANSANJ, S.; SINGH, D.; WASSERMAN, J.D. Drying characteristics of wheat, barley and canola subjected to repetitive wetting and drying cycles. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v.27, n. 3, p. 903-914, 1984.
- SOUSA, J.B.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. N.; SCAICO, M. A. Análise de alguns componentes químicos em sementes de feijão macassar submetidos a diversas condições controladas de armazenagem II Carboidratos Totais e Açúcares Redutores. **Revista Nordestina de Armazenagem**, Campina Grande-PB. a. 4, n. 2, p. 03- 26, 1987/1990.
- STEFANINI, R.; ROA, G. Algoritmo geral para determinação do calor latente de vaporização da água dos produtos biológicos. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa-MG, v. 5, n. 1, p. 30-42, 1980.
- SYARIEF, A.M.; MOREY, R.V.; GUSTAFSON, R.J. Thin-layer drying rate of sunflower seed. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v. 27, n. 1, p. 195-200, 1984.
- TASCON, C.E.O. **Simulação de secagem de café, em camada fixa, com inversão de sentido de fluxo de ar.** Viçosa-MG. Universidade Federal de Viçosa, 1984. 64 p. (Tese de Mestrado).
- THOMPSON, T.L. **Predicted performance and optimal design of convection grain dryer.** West Lafayette, Purdue University, 1967, 134 p. (Tese de Doutorado).
- THOMPSON, T.L., PEART, R.M. , FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying - A new model. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.11, n.4, p. 582 - 586, July/Aug. 1968.
- THOMPSON, H.J.; SHEDD, C.K. Equilibrium moisture content and heat of vaporization of shelled corn and wheat. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, Michigan, v. 35, n. 11, p. 786-788, 1954.
- THOMPSON, T.L. THOMPSON, T.L. Temporary storage of high moisture shelled corn using continuous aeration. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph, Michigan, 15(2):333-337, 1972.
- TIPLER, P.A. **Física I** . Rio de Janeiro, Guanabara Dois. 2ª Ed. 1984. 596 p.
- TOLEDO, F.F.; MARCOS FILHO, J. **Manual das sementes: Tecnologia da produção.** São Paulo, Ed. Agronômica Ceres, 1977. 224 p.
- VAN REST, D.J.; ISAACS, G.W. Exposed layer drying rates of grain. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.11, n.2, p. 236 - 237, 239, Mar./Apr. 1968.

- VIEIRA, C. **Cultura do feijoeiro - Perspectiva da cultura do feijão e de outras leguminosas de grãos no país e no mundo.** Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1988. 589p.
- YOUNG, J.H. Sorption and desorption equilibrium moisture content isotherms of virginia type peanuts. **Transactions of the ASAE**, Oklahoma State University Atillwater, Oklahoma, n. 743034, 1974.
- YOUNG, J.H.; NELSON, G.L. Theory of hysteresis between sorption and desorption isotherms in biological materials. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 10, n. 2, p. 260-263, 1967.
- WANG, C.Y.; SINGH, R.P. **A single layer drying equation for rough rice** ASAE. St. Joseph, Michigan. Paper No. 78-3001. 21 p. 1.978.
- WARATTEN, F.T.; POOLE W.D.; CHESNESS, J.L.; BAL, S. & RAMARAO, V. Physical and thermal properties of rough rice. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 12, n. 6, p. 801-803, 1969.
- WEAST, R.C. **Handbook of Chemistry and Physics**, p. 3-65/3-68, 1982-1983.
- WELCH, G.B.; DELOUCHE, J.C. **Conditioned storage of seed.** Mississippi, Seed Technology Laboratory, 1974. p. 30-40.
- 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.
- WHITE, G.M.; ROSS, I.J.; KLAIBER, J.D. J.D. Moisture equilibrium in mixing of shelled corn. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 15, n. 3, p. 508-509, 1972.
- WHITNEY, J.D.; PORTERFIELD, J.G. Moisture movement in a porous higroscopic solid. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v. 12, n. 5, p. 720-725, 1969.
- WOODSTOCK, L.W. Seed vigor. **Seed World**. v. 97, n. 5, p. 6, 1965.
- WRIGHT, M.E.; PORTERFIELD, J.G. Specific heat of Spanish peanut. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 13, n. 4, p. 508-510, 1970.