CLAUDIO AUGUSTO OLLER DO NASCIMENTO

Engenheiro Químico, Escola Politécnica da USP, 1975

**ESTUDO DA SECAGEM DE SEMENTES DE SORGO EM LEITO
AGITADO MECANICAMENTE; MODELAGEM MATEMÁTICA**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obten-
ção do título de "Mestre em Engenharia".**

**Orientador: Prof. Dr. Giovanni Brunello
Professor Titular do Departamento de
Engenharia Química da EPUSP**

São Paulo — 1979

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Giovanni Brunello, pela orientação segura e dedicada prestada à realização desse trabalho, sempre em busca do aprimoramento.

Ao Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelo uso de seus laboratórios.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo indispensável auxílio financeiro concedido.

Ao Instituto Agrônomo de Campinas, pela colaboração na execução das análises das sementes.

À Engenheira Priscila Aya Shimizu, ao Prof. Dr. Boris Schneiderman, às Srtas. Olga Vanorden Loureiro e Maria Lúcia M. de Carvalho, pela colaboração dada a este trabalho.

Aos amigos do DEQ/EPUSP.

À Ana, minha esposa, aos meus pais e à Zi, pelo incentivo e pela confiança que sempre depositaram em mim.

RESUMO

A secagem de sementes de sorgo foi estudada em secador com leito agitado mecanicamente.

O autor estudou a influência da temperatura do ar (30 a 45°C), da vazão do ar (41 a 123 g/min) e da massa de sólidos (170 a 500 g) na secagem de sorgo. Mostrou que, nessas condições, a viabilidade das sementes não é alterada.

Foi possível, baseando-se no mecanismo de difusão, correlacionar os dados experimentais. Daí resultou a equação da cinética de secagem.

Finalmente, foi proposto um modelo matemático para este sistema e verificou-se sua validade através da simulação do processo de secagem.

ABSTRACT

The drying of grain sorghum seeds was studied in a batch mechanical mixed bed. The author studied the influence of the air temperature (30 to 45°C), the flow rate (41 to 123 g/min) and the mass of solids (170 to 500 g of material) in the drying of grain sorghum seeds. It was verified that the seed germination was not affected by the drying.

It was possible, based on the diffusion equation, to correlate all the experimental data. The kinetic rate of drying was determined.

Finally, it was also proposed a mathematical model for this system and the results were verified by simulation of the drying process.

ÍNDICE

Pág.

<u>NOTAÇÃO</u>	1
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	3
<u>LISTA DE TABELAS</u>	4
 <u>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO</u>	 5
 <u>CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA</u>	 7
2.1. Introdução	7
2.2. Teoria da difusão	7
2.2.1. Considerações gerais	7
2.2.2. Secagem de cereais	8
2.3. Modelos semi-teóricos	10
2.3.1. Difusão de água através de membrana semi-permeável	10
2.3.2. Modelo logarítmico	10
2.4. Equações empíricas	11
2.5. Teoria da capilaridade	13
2.6. Aplicação das teorias a secadores de leite agitado	13
 <u>CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS</u>	 15
3.1. Introdução	15
3.2. Umectação das sementes	15
3.3. Testes de viabilidade de sementes	15
3.4. Eficiência da agitação na mistura dos grãos no secador	16
3.5. Ensaios preliminares de secagem com sementes de sorgo	17
3.6. Descrição do equipamento	17
3.6.1. Equipamento para purificação do ar	19
3.6.2. Aquecedor do ar	19
3.6.3. Secador de leite agitado, câmara de secagem	19
3.6.4. Medida e controle de vazão de ar	22
3.6.5. Medida e controle da temperatura do ar	22
3.6.6. Medida da umidade do ar	22
3.6.7. Umidade do material	22
3.7. Modo operatório	22
3.7.1. Preparação das sementes	22
3.7.2. Ensaio de secagem	22

	Pág.
<u>CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	24
4.1. Introdução	24
4.2. Resultados dos testes de viabilidade das sementes	24
4.3. Resultados dos ensaios definitivos de secagem	25
4.3.1. Reprodutibilidade dos resultados dos ensaios	25
4.3.2. Resultados dos ensaios de secagem	25
4.4. Aplicação do modelo da difusão	43
4.4.1. Hipóteses	43
4.4.2. Análise das possíveis soluções da equação da difusão	43
4.4.3. Umidade de equilíbrio	44
4.4.4. Correlacionamento empírico do coeficiente de secagem K em função da temperatura	45
4.4.5. Cálculo de $\frac{G}{G_0}$ em função do tempo	48
4.4.6. Correlacionamento geral	48
<u>CAPÍTULO 5: MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO</u>	51
5.1. Introdução	51
5.2. Modelo matemático	51
5.3. Propriedades físicas do grão de sorgo e do ar	52
5.4. Estimativa da perda de calor	53
5.5. Resultados e discussão da simulação	54
<u>CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES</u>	69
<u>ANEXO 1: PROGRAMA DE COMPUTADOR UTILIZADO NA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECA- GEM</u>	71
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	74

NOTAÇÃO

a	- constante
A	- área da secção transversal do secador
A_i , $i=0,1,2,\dots$	- constantes
b	- constante
B_i , $i=0,1,2,\dots$	- constantes
c	- constante
C_{pa}	- calor específico sob pressão constante do ar
C_{ps}	- calor específico do sólido
D	- difusividade
h	- coeficiente de troca de calor
H	- parâmetro definido pela expressão $H = (\ln 2)/K$
H_G	- umidade absoluta do ar
H_r	- umidade relativa do ar
k	- condutividade térmica
K	- constante de velocidade de secagem
L_a	- grupo adimensional definido pela equação 2.16
$\dot{m}_a$	- vazão mássica de ar
m_s	- massa de sólido seco
P_r	- pressão de vapor de água no ar na entrada do secador
P_s	- pressão máxima de vapor de água a T_{bu}
P_{rs}	- pressão máxima de vapor de água a T_e
q_M	- vazão mássica de ar
Q	- fluxo de calor trocado com o exterior
R	- constante da equação 2.9
R_t	- constante da equação 2.10
S	- área da superfície externa de uma partícula
T_a	- temperatura do ar ambiente
T_e	- temperatura do ar na entrada do secador

- T_g - temperatura do sólido
- T_s - temperatura do ar na saída do secador
- T_{bu} - temperatura de bulbo úmido
- T_u - temperatura de "pseudo-saturação" do ar
- W - umidade do sólido em base seca
- W_e - umidade de equilíbrio do sólido em base seca
- W_o - umidade inicial do sólido em base seca
- W_r - umidade adimensional, $W_r = (W - W_e)/(W_o - W_e)$
- W_s - umidade na superfície do grão em base seca
- v - velocidade do ar
- V - volume de uma partícula
- x - distância a partir do fundo do leito
- X - constante da equação 2.9
- Y - grupo adimensional definido pela equação 2.16
- $\mathcal{B}$ - parâmetro definido pela expressão $\mathcal{B} = 2h/kb$
- θ - tempo
- λ - calor latente de vaporização da água no interior do grão
- λ_a - calor latente de vaporização da água livre
- ξ - função definida pela equação 2.3
- ρ - densidade da matéria seca

LISTA DE FIGURAS

FIGURA Nº	TÍTULO	PÁGINA
3.1	Esquema do agitador de pás inclinadas	18
3.2	Esquema da coluna de acrílico utilizada no ensaio de mistura	18
3.3	Resultado do ensaio de mistura	20
3.4	Representação esquemática do secador utilizado	20
3.5	Representação esquemática da aparelhagem experimental	21
4.1	Resultados dos ensaios de viabilidade das sementes, realizados após os ensaios preliminares	25
4.2	Reprodutibilidade dos ensaios	26
4.3	Umidade em função do tempo, ensaios E1, E2 e E3	39
4.4	Umidade em função do tempo, ensaios E4, E5, E6 e E7	39
4.5	Umidade em função do tempo, ensaios E8, E9, E10 e E11	40
4.6	Umidade em função do tempo, ensaios E12, E13, E14 e E15	40
4.7	Umidade em função do tempo, ensaios E16, E17, E18 e E19	41
4.8	Umidade em função do tempo, ensaios E20, E21, E22, E23 e E24	41
4.9	$\ln(W - W_e)$ em função do tempo	46
4.10	$\ln(W - W_e)$ em função do tempo	47
4.11	Relação de K com a temperatura	47
4.12	Relação de K em função do tempo	48
4.13	Correlação geral	49
5.1	Esquema da flange de fixação	53
5.2	Exemplo da simulação da curva de secagem	56
5.3	Exemplo da simulação da temperatura do ar na saída do leite	56

LISTA DAS TABELAS

TABELA Nº	TÍTULO	PÁGINA
4.I	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E1	27
4.II	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E2	27
4.III	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E3	28
4.IV	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E4	28
4.V	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E5	29
4.VI	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E6	29
4.VII	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E7	30
4.VIII	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E8	30
4.IX	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E9	31
4.X	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E10	31
4.XI	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E11	32
4.XII	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E12	32
4.XIII	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E13	33
4.XIV	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E14	33
4.XV	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E15	34
4.XVI	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E16	34
4.XVII	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E17	35
4.XVIII	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E18	35
4.XIX	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E19	36
4.XX	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E20	36
4.XXI	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E21	37
4.XXII	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E22	37
4.XXIII	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E23	38
4.XXIV	Dados da secagem de sementes de sorgo, ensaio E24	38
4.XXV	Tabela geral de condições dos ensaios de secagem e valores da umidade de equilíbrio	42
4.XXVI	Desvios da equação 4.6	50
5.I	Resultados da simulação: W_o real	57
5.II	Resultados da simulação: W_o extrapolado	63

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A secagem de materiais sólidos é uma importante operação no campo da Engenharia Química, pois há poucos produtos sólidos que não necessitem ser secados durante o seu processamento.

No caso de cereais, uma das principais fontes de alimentos para homens e animais, é indispensável, para sua conservação, que tenham uma baixa umidade; de fato, a alta umidade apresentada ao serem colhidos propicia uma grande atividade biológica no seu interior, favorecendo a rápida deterioração.

Os estudos da secagem de cereais têm sido realizados com dois objetivos principais:

1. Determinar as condições de secagem para se obter, economicamente, um produto conveniente para o consumo, isto é, com boas propriedades nutritivas.
2. Analisar a operação de secagem em si, ou seja, obter modelos da cinética da operação, correlações quanto à influência das variáveis do processo (temperatura, vazão, umidade do ar, altura da camada de grãos, etc.) e os dados necessários à ampliação da escala de secadores; neste caso, devem-se, também, levar em conta outros fatores: a dinâmica do movimento do ar e dos sólidos, a troca de calor entre o ar e os sólidos e a distribuição dos tempos de residência dos sólidos, quando em sistemas contínuos.

Na secagem de cereais, os secadores mais usuais são aqueles em que o ar passa através de um leito constituído pelos grãos; esta secagem pode-se fazer em:

- processos descontínuos como, por exemplo, em bandejas, em leitos fixos (tipo silo), fluidizados, com jorro, etc.;
- processos contínuos, como ocorre em silos, onde os grãos descem lentamente e o ar passa em contra-corrente ou no mesmo sentido, em esteiras horizontais, em leitos fluidizados ou em leitos com jorro.

Embora a secagem de sementes de cereais seja, em princípio, análoga à dos cereais em geral, ela apresenta características bastante especiais: é necessário manter seu poder germinativo após secagem por meses ou mesmo anos. Esse poder é perdido rapidamente quando a umidade dos grãos se conserva elevada.

Para evitar isto, não basta secar as sementes, como se faz com cereais; é indispensável fazê-lo em condições bastante delicadas, ou seja, a temperatura de secagem deve ser mantida relativamente baixa (1), as sementes não podem sofrer choques violentos (2) e o tempo de secagem não deve ser demasiadamente prolongado.

Devido às condições especiais em que as sementes devem ser secadas, poucos são os secadores utilizados para esse fim. Usam-se, em geral, ou secadores de bandejas ou de leito fixo tipo silo ou de coluna.

Em ambos os casos, se não existe um controle cuidadoso da temperatura e da umidade do ar de secagem, certas camadas de sementes, por ficarem expostas por um tempo longo demais ao ar relativamente quente e seco que chega ao secador, correm o perigo de perder seu poder germinativo.

Brooker e colaboradores (3) propõem, para evitar esse problema, o uso de agitadores dentro do leito de sementes. Dizem o seguinte: "Discussões anteriores a respeito da secagem de grãos em silos indicam que consideráveis melhorias poderiam ser feitas em tais secadores se o problema do "over-drying" pudesse ser contornado. Misturadores de grãos estão sendo utilizados com essa finalidade" e, adiante, "Muito pouca pesquisa nesse tipo de equipamento tem sido realizada e somente comunicações pessoais a esse respeito existem".

É em consequência de considerações deste tipo que, no presente trabalho, se resolveu estudar a secagem de sementes em leitos agitados mecanicamente.

O trabalho consiste em uma análise fundamental de dados experimentais da secagem de sementes de sorgo, tendo em vista obter uma correlação geral que represente o fenômeno com a finalidade de prever tempos de secagem e, daí, executar o projeto de secadores. Para isto, procurar-se-á aplicar os modelos matemáticos dos mecanismos de secagem que possam representar adequadamente a sua cinética. Através do conhecimento dessa e com o auxílio do balanço de energia no leito de sementes, calcular-se-á, através da simulação matemática, o tempo de secagem. Para conhecer se as condições empregadas na secagem são convenientes, realizar-se-ão ensaios de poder germinativo sobre o material obtido.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, far-se-á um resumo das mais importantes teorias e trabalhos sobre a secagem de materiais sólidos e, em especial, os relacionados com grãos de cereais. As principais teorias que serão discutidas na presente revisão são: teoria da difusão, da membrana semi-permeável, da capilaridade e algumas equações empíricas. Ver-se-á como se aplicam no caso de cereais, levando-se em conta, também, os tipos de secadores usados.

2.2. TEORIA DA DIFUSÃO

2.2.1. Considerações gerais

A difusão de água líquida através do sólido foi proposta como sendo o principal mecanismo na secagem de sólidos por Lewis (4), Sherwood (5, 6, 7, 8, 9) e outros pesquisadores.

Supuseram que a variação da concentração da água dentro do sólido se guisse a segunda lei de Fick,

$$\frac{\partial W}{\partial \theta} = D \nabla^2 W \quad (2.1)$$

Muitos autores resolveram a equação da difusão para diversas condições de contorno, tanto para o período de velocidade constante de secagem como para o de velocidade decrescente.

Uma das soluções da equação de difusão é representada por uma série convergente de termos exponenciais. Sherwood (7) chegou a esse tipo de solução na secagem de placa plana; Moon e Spencer (10) confirmaram esta conclusão e afirmaram que, em um processo de secagem, genericamente, a solução resultante da equação (2.1) é uma série do seguinte tipo, para o caso de difusividade constante

$$\frac{W - W_e}{W_o - W_e} = A_o e^{-B_o D \theta} + A_1 e^{-B_1 B_o D \theta} + \dots \quad (2.2)$$

Discussões minuciosas das soluções da equação da difusão são apresentadas por Hougen e colaboradores (11), Crank (12) e Luikov (13).

Muitas das soluções vistas até aqui restringem-se a condições em que a temperatura, umidade, pressão e velocidade do ar de secagem são constantes. Mesmo nestas condições, o estudo da secagem é dificultado pela variação da temperatura do sólido e pela variação da concentração de água em seu interior. Assim, Kamei e Shiomi (14) verificaram que a difusividade da água em materiais como papel e argilas é função da temperatura e umidade do material. Estes dois fatores provocam a variação da difusividade da água através do sólido e essa variação deve ser levada em conta na integração da equação da difusão.

Alguns autores, como Crank (12), estudaram a influência da variação da difusividade com o tempo, devido à sua variação com a temperatura. Para a integração da equação (2.1), este autor propõe a seguinte mudança de variável

$$\xi = \int_0^\theta B_0 D(\theta) d\theta \quad (2.3)$$

Substituindo em (2.1), vem

$$\frac{\partial W}{\partial \xi} B_0 D(\theta) = D(\theta) \nabla^2 W \quad (2.4)$$

ou

$$\frac{\partial W}{\partial \xi} = \frac{1}{B_0} \nabla^2 W \quad (2.5)$$

cujas soluções são idênticas à da equação (2.1). No mesmo livro, esse autor apresenta métodos numéricos para a solução da equação da difusão, quando a difusividade é uma função somente da concentração da umidade.

2.2.2. Secagem de cereais

No caso específico de secagem de grãos de cereais, muitos autores aplicam o modelo de difusão para a previsão da curva de secagem. Becker e colaboradores (15, 16, 17, 18, 19) desenvolveram um extenso trabalho relativo à secagem de trigo. Consideraram que a principal resistência à secagem, neste caso, era a resistência interna. O modelo matemático adotado era o da difusão de água líquida através do sólido. Desenvolveram uma solução geral da equação de difusão em sólidos, de forma arbitrária, com coeficiente de difusão constante, e chegaram a duas soluções: uma válida no início da secagem, ou seja, para tempos próximos a zero

$$\frac{W_0 - W}{W_0 - W_s} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{S}{V} \right) \sqrt{D\theta} - a \left(\frac{S}{V} \right)^2 D\theta \dots \quad (2.6)$$

e outra, válida para o fim da secagem, para tempos tendendo a infinito,

$$\frac{W - W_s}{W_o - W_s} = \frac{b}{c} \exp \left[-c^2 \left(\frac{S}{V} \right)^2 D\theta \right] \quad (2.7)$$

Aplicaram essas soluções ao caso particular de grãos isolados de trigo e comprovaram-nas através de comparações com resultados experimentais (16). As curvas de velocidade de secagem obtidas a partir das equações (2.6) e (2.7) são válidas para grãos de trigo com umidade inicial inferior a 25% em base seca.

A partir da cinética de secagem, esse autor (16) previu as curvas de secagem de trigo em vários tipos de secadores, tais como secador tipo jorro (17, 18), secadores comerciais de coluna (18) e um secador de leito fixo (19). Spencer (20), utilizando a cinética de secagem desenvolvida por Becker (16), simulou a secagem de grãos de trigo em secadores de leito fixo. A comparação com dados experimentais mostrou um bom ajuste ao modelo proposto. A altura do leito nesse estudo variou de 0,15 a 0,60 m.

Hustrulid e colaboradores (21, 22) estudaram, a partir da seguinte solução da equação da difusão

$$\frac{W - W_s}{W_o - W_s} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp (-n^2 D\theta) \quad (2.8)$$

métodos de previsão da curva de secagem para mono-camadas de grãos de milho. Compararam os resultados com dados experimentais.

Em trabalho posterior, Hustrulid e Chen (23) desenvolveram uma solução numérica da equação de difusão para o caso de a difusividade ser uma função da umidade, sendo essa função da forma exponencial. Aplicaram o método à secagem de grãos de milho.

O modelo de difusão também foi empregado por Baughman e colaboradores (24, 25) na previsão de processos de secagem em leitos fixos e em secadores contínuos de coluna. Os resultados foram comparados com dados obtidos em secagem de grãos de milho. Henderson (26) analisa a secagem de mono-camadas de grãos de milho, considerando como principal resistência à secagem a difusão da umidade através do sólido. Em ambos os casos, supôs-se a difusividade constante.

Rowe e Gunkel (27) aplicaram a solução da equação de difusão obtida por Crank (12) (equações 2.3 e 2.5) para o caso de secagem não isotérmica de camadadas de pequena espessura de alfafa. Este autor previu as curvas de secagem a partir da cinética de secagem obtida de acordo com a equação (2.2) e com o auxílio dos balanços de massa e de energia na camada de material.

2.3. MODELOS SEMI-TEÓRICOS

2.3.1. Difusão de água através de membrana semi-permeável

Como vimos, um dos modelos utilizados para a previsão da curva de secagem é o modelo de difusão de água líquida através do sólido. Della Nina (28) verificou que a utilização dessa teoria não correlaciona adequadamente os dados de secagem de cereais com umidades iniciais relativamente altas.

Brunello e colaboradores (29) desenvolveram, então, um modelo para secagem de grãos de cereais segundo o qual a saída de água se dá por difusão de vapor de água através de membrana semi-permeável que envolve os grãos, acompanha da por uma difusão de substâncias solúveis para o interior do grão. Essas substâncias concentrar-se-iam junto à superfície interna da membrana que envolve o grão devido à evaporação da água. A expressão a que esses autores chegaram, partindo do modelo acima descrito, foi:

$$\frac{dW}{d\theta} = \frac{I}{\left[R/(P_{rs} - P_r) \right] + X} \quad (2.9)$$

O modelo foi comprovado na secagem de malte de cevada (29) e milho (30) em secador de leite com jorro.

Brunello e Nascimento (31) estudaram a secagem de grãos de sorgo em secador de leite fluidizado, verificando, também, a validade desse modelo. Em trabalho posterior (32), os autores simplificaram o modelo, englobando todas as resistências à secagem em um único parâmetro. Verificaram sua validade para vários cereais (malte de cevada, milho, sorgo, trigo). A equação resultante dessa simplificação é:

$$\frac{dW}{d\theta} = \frac{P_s - P_{rs}}{R_t} \quad (2.10)$$

2.3.2. Modelo logarítmico

A simplificação da solução da equação da difusão do tipo representado pela equação (2.2) tem sido frequentemente utilizada para prever a secagem de grãos de cereais e produtos agrícolas. Em vez de se adotar uma infinidade de termos, somente o primeiro termo da equação (2.2) é empregado para a representação da velocidade de secagem; esta é expressa, então, da seguinte forma:

$$\frac{dW}{d\theta} = - K(W - W_e) \quad (2.11)$$

Muitas vezes este tipo de correlacionamento é chamado de modelo logarítmico, onde o parâmetro K é conhecido como constante de velocidade de secagem;

para cada material, é função apenas da temperatura.

Veremos, a seguir, alguns dos trabalhos que aplicam esse modelo.

Na secagem de mono-camadas de grãos de milho, Simmonds e colaboradores (33, 34, 35, 36, 37) utilizaram o modelo apresentado pela equação (2.11) e verificaram a influência das condições do ar na velocidade de secagem. A partir desses estudos, apresentaram métodos para a previsão do tempo de secagem em leitos fixos de grãos de trigo com alturas variando de 7,5 a 30 cm (34). Esses autores, trabalhando com mono-camadas de grãos de trigo, verificaram que a principal variável que influia na secagem era a temperatura do ar e que a umidade do ar (em valores moderados) não possuía uma influência marcante na constante de velocidade de secagem. Em trabalho posterior, McEwen e O'Callaghan (38) mostraram que, para umidades relativas do ar inferiores a 70%, a constante de velocidade de secagem eram função só da temperatura.

Barre e colaboradores (39) analisaram a secagem de grãos de milho em leito fixo, aplicando o modelo logarítmico; embora não descrevesse o comportamento da secagem de leitos tão bem quanto o modelo de difusão ou uma equação empírica, constituía, entretanto, conforme os autores, uma maneira simples de se utilizar os dados assim correlacionados, dispensando técnicas complicadas para a análise.

Brunello e colaboradores (40, 41) utilizaram esse modelo para a obtenção de curvas de velocidade de secagem no caso da secagem isotérmica de mono-camadas de grãos de milho e arroz, em condições de resistência externa nula. A constante da equação da velocidade dependia apenas da temperatura.

Vários outros autores (42, 43) aplicaram esse tipo de correlacionamento na análise de seus dados.

2.4. EQUAÇÕES EMPÍRICAS

Inúmeras equações empíricas têm sido apresentadas para expressar a velocidade de secagem de grãos de cereais.

Um caminho bastante promissor para a análise da secagem em leito não agitado consiste em integrar as equações empíricas que descrevem a secagem de camadas de poucos grãos de altura. Thompson e colaboradores (44), para o caso de grãos de milho, propuseram uma equação do tipo

$$\theta = a \ln W_r + b [\ln W_r]^2 \quad (2.12)$$

Esta equação, utilizada juntamente com balanços de energia e massa, previu, com sucesso, as curvas de secagem de milho em vários tipos de secadores (secador de passagem através e secadores contínuos de coluna). Em trabalho posterior, Thompson e Paulsen (45) desenvolveram estudo análogo para o caso de grãos

de sorgo. Roberts e Brooker (46), utilizando equação similar, desenvolveram modelo matemático para descrever a secagem de grãos de cereais em silos com circulação interna dos grãos.

A partir da análise dimensional do fenômeno, Chien e colaboradores (47) previram os grupos adimensionais para o cálculo de perfis de umidade em leitos fixos. A equação (2.13) apresenta aí o tipo de função obtida

$$\frac{W - W_e}{W_o - W_e} = f\left(\frac{v\theta}{L}, \frac{x}{L}, \frac{T_u}{T_e}\right) \quad (2.13)$$

Outro tipo de equação empírica utilizada é o proposto por Troeger e Hukill (48) que, ao estudarem a secagem de mono-camadas de grãos de milho, chegaram ao seguinte tipo de expressão

$$\frac{dW}{d\theta} = -K(W - W_e)^a \quad (2.14)$$

onde a é uma constante maior que a unidade.

Hukill e colaboradores (49, 50) estudaram a secagem de vários tipos de cereais, tais como sorgo e milho. Propuseram a seguinte equação empírica

$$W_r = \frac{2^{L_a}}{2^{L_a} + 2^Y - 1} \quad (2.15)$$

onde

$$L_a = \frac{c \times A \lambda_a (W_o - W_e)}{c_{pa} \dot{m}_a H (T_e - T_g)} \quad (2.16)$$

e

$$Y = \frac{\theta}{H} \quad (2.17)$$

Em trabalho posterior, Young e Dickens (51) avaliaram os custos de secagem de grãos de milho em secadores de leito fixo, utilizando equação cinética de secagem obtida a partir da equação (2.15).

Roa e Macedo (52) simularam a secagem de feijão carioca em silos a partir da determinação da curva de secagem em mono-camadas. A equação resultante é

$$W_r = \exp \left[-a(P_{rs} - P_r)^b \theta^c \right] \quad (2.18)$$

Uma extensa revisão foi realizada por Bakker-Arkema (53) em relação à simulação de secadores de cereais em leitos não agitados, utilizando equações empíricas do tipo proposto por Thompson (44).

Inúmeras outras equações empíricas se encontram na literatura (54, 55, 56, 57) no estudo de secagem de grãos de cereais.

2.5. TEORIA DA CAPILARIDADE

Segundo Bakker-Arkema e colaboradores (53), grãos de cereais poderiam ser considerados como corpos capilares porosos.

Luikov e colaboradores (58, 13, 59) desenvolveram modelo matemático para descrever a secagem de sólidos porosos. As equações resultantes desse modelo formam um sistema de equações diferenciais parciais. Até este momento, poucos coeficientes dessas equações são conhecidos, para o caso de grãos de cereais. Esse conjunto de equações diferenciais parciais foi aplicado à secagem de milho, mas não levou a resultados razoáveis (53).

Muitos outros autores estudaram a teoria da capilaridade para a secagem de materiais sólidos (60, 61, 62, 63), mas, ao que tudo indica, não se aplica à secagem de grãos de cereais (28, 29). De fato, observando a constituição dos cereais, verificou-se que a casca do grão (camada aleurona) não parece ser porosa (35).

2.6. APLICAÇÃO DAS TEORIAS A SECADORES DE LEITO AGITADO

Como vimos, os autores que apresentaram ou discutiram as teorias acima restringiram, em geral, sua aplicação a secadores em que os grãos aproximadamente mantêm fixas suas posições relativas, tais como os de leito fixo, os de esteira e os contínuos tipo silo.

Entretanto, os cereais podem ser secados, também, em secadores, contínuos ou não, de leito agitado; usam-se os de leito fluidizado, leito com jorro e leito agitado mecanicamente.

Em secagem contínua de trigo em secador de leito com jorro, Becker e Sallans (17) idealizaram o processo como sendo uma secagem uniforme de sólidos aproximadamente esféricos, em um leito de mistura perfeita e isotérmica. O modelo cinético aplicado era o da difusão da água líquida dentro do sólido. A difusividade foi suposta independente da umidade do material. Uma solução matemática rigorosa foi desenvolvida para este caso. Em trabalho posterior, Becker e Isaacson (18) estudaram, também, processos descontínuos de secagem em secadores de mistura perfeita. O modelo empregado consistia de balanços de energia e massa e da equação da cinética de secagem. Usaram uma mudança de variável na equação da cinética bastante parecida com a sugerida por Crank (12) e discutida no §2.2.

No caso de leitos fluidizados, Vanecek e colaboradores (64) sugeriram que se determinassem experimentalmente as curvas de secagem, recorrendo-se à teoria somente para os casos mais simples; a teoria poderia, também, ser usada para o cálculo e curvas de secagem a partir de curvas obtidas em condições experi-

mentais um pouco diferentes.

Kunii e Levenspiel (65), para leitos fluidizados, discutiram, entre outras coisas, o caso de secagem de sólidos, onde a velocidade de secagem era controlada pela difusão da umidade no interior do sólido; esses autores afirmaram que o problema podia ser tratado supondo que, no leito, cada partícula secasse como se estivesse isolada. Exemplos de cálculo são dados para leitos fluidizados contínuos (regime estacionário), não sendo abordado o caso de sistemas descontínuos.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. INTRODUÇÃO

Em virtude da pouca bibliografia específica para o tipo de secador usado neste trabalho, foi necessário realizar uma série de ensaios preliminares visando:

- conhecer o efeito das condições do ar utilizado na secagem, juntamente com o da agitação mecânica, no poder germinativo das sementes;
- obter informações a respeito da capacidade de homogeneização dos grãos efetuada pelo agitador, na câmara de secagem;
- ajustar o equipamento e a técnica experimental.

Após este trabalho inicial, uma vez ajustado o equipamento e definidos os intervalos das variáveis a serem estudadas (velocidade, temperatura e umiuidade do ar e massa de sólidos), realizaram-se os ensaios definitivos.

Nos itens subsequentes, descrevem-se o aparelhamento e as técnicas utilizadas em cada etapa desse trabalho.

3.2. UMECTAÇÃO DAS SEMENTES

Como não foi possível obter sementes "in natura", optou-se por umectar sementes já tratadas.

O método utilizado na umectação das sementes é o empregado por Shimizu (69): consiste em colocar as sementes em câmara de temperatura controlada (30°C), na qual a nebulização contínua de água permite manter-se uma umidade de 100%.

As sementes de sorgo, dispostas em mono-camadas em prateleiras com fundo de tela de plástico, permaneciam nesta câmara por 14 horas e atingiam, assim, uma umidade semelhante à natural (18 a 25% em base seca).

3.3. TESTES DE VIABILIDADE DE SEMENTES

As sementes sofrem, desde a colheita até o seu armazenamento final,

uma série de processamentos, tais como transporte, secagem e tratamentos químicos (aplicação de germicidas, fungicidas).

Para se poder verificar o estado da semente pronta para a lavoura, realizam-se provas que definem o seu estado em relação à probabilidade de germinação. Esses testes são chamados de testes de viabilidade de sementes e fornecem a porcentagem delas que provavelmente germinarão quando semeadas.

Os testes de viabilidade de sementes são realizados por amostragem do lote.

O teste de viabilidade empregado neste trabalho, antes e após a secagem das sementes de sorgo, foi o teste topográfico de tetrazolium. Baseia-se no princípio de que o processo de respiração no interior das células vivas libera hidrogênio. Este teste bioquímico é feito imergindo as sementes cortadas ao meio numa solução incolor de cloreto de 2,3,5 trifenil tetrazóleo; este sal, quando combinado com o hidrogênio proveniente da respiração das células, produz um pigmento vermelho no interior dos grãos. Se as sementes assim tratadas apresentarem determinadas regiões coloridas, significa que estão vivas e podem germinar; para avaliar a viabilidade por esses testes, é necessário ter uma noção sobre a estrutura da semente. Existem inúmeras referências bibliográficas a este respeito na literatura (66, 67, 68).

Os testes feitos por este método foram realizados por técnico treinado no Instituto Agrônomo de Campinas, sob a orientação do Dr. Antonio Augusto Lago.

3.4. EFICIÊNCIA DA AGITAÇÃO NA MISTURA DOS GRÃOS NO SECADOR

Se por um lado é desejável uma boa homogeneização dos grãos de sementes dentro da câmara de secagem, por outro lado a agitação mecânica não deveria prejudicar o poder germinativo das sementes durante a secagem; daí a necessidade de a agitação ser tão suave quanto possível.

Os agitadores ensaiados eram constituídos de um eixo dotado de pás; experimentaram-se pás paralelas ao eixo, inclinadas e helicoidais. O agitador era movimentado por um conjunto motor - redutor, cuja velocidade máxima é de 0,84 rad/s.

Para verificar a mistura axial que ocorria dentro do leito agitado com cada tipo de agitador, isto é, com o intuito de saber a sua eficiência, foram feitos inicialmente ensaios qualitativos.

Esses ensaios consistiam em colocar no secador duas camadas de grãos de cores diferentes e operar o agitador em sua máxima rotação. No fim de períodos que variavam de 2 a 5 minutos, desligava-se o agitador e verificava-se, visualmente, através da parede do secador, a distribuição das partículas. A melhor

mistura foi obtida com o de pás inclinadas apresentado na fig. 3.1.

Fizeram-se, então, com este agitador, alguns ensaios quantitativos sobre a eficiência da mistura. O equipamento experimental consistia de uma coluna de acrílico formada por anéis sobrepostos de 1,5 cm de altura cada um, montada no lugar da câmara de secagem, com o mesmo diâmetro desta (fig. 3.2).

As experiências eram realizadas da seguinte maneira, segundo sugestão de Chatterjee (70).

Colocava-se na câmara já contendo o agitador uma camada de 1 cm de sorgo com coloração clara e massa conhecida; a seguir, completava-se até a altura de aproximadamente 8 cm com o sorgo de coloração vermelha e também de massa conhecida. Em seguida, por 2 minutos, agitava-se o leito nas condições dinâmicas que seriam usadas nos ensaios de secagem, ou seja, vazão de ar análoga e agitador com velocidade de 0,84 rad/s. Desmontando a coluna e coletando o material contido em cada anel por deslizamento deste sobre os inferiores, determinava-se a fração mássica das partículas claras em cada um.

Compararam-se as frações mássicas obtidas com as que se teriam no caso de o sistema ser de mistura perfeita.

A fig. 3.3 apresenta os resultados.

Nesta etapa não foram realizados testes para verificar o efeito da agitação no poder germinativo, pois tais testes foram realizados após cada ensaio preliminar, levando-se, então, em conta não somente a agitação, mas, também, os demais fatores envolvidos.

3.5. ENSAIOS PRELIMINARES DE SECAGEM COM SEMENTES DE SORGO

Conforme foi dito no §3.1, estes ensaios foram realizados com as seguintes finalidades:

- verificar se o equipamento montado funcionava convenientemente (melhorando-o, quando necessário) e se os resultados eram reprodutíveis;
- adquirir prática em sua manipulação;
- delimitar as faixas de variação das seguintes variáveis: altura do leito, temperatura e vazão do ar de secagem;
- averiguar se a ação combinada da agitação e da secagem não diminuía a viabilidade das sementes.

Foram realizados 14 ensaios, cada um seguido do teste de viabilidade.

3.6. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O equipamento experimental consiste basicamente em: câmara de secagem com agitador, sistema de suprimento, purificação e aquecimento do ar utilizada

Figura 3.1 - Esquema do agitador de pás inclinadas

Figura 3.2 - Esquema da coluna de acrílico utilizado nos ensaios de mistura

do no processo, instrumentos de medida de sua vazão, temperatura e umidade.

As fig. 3.4 e 3.5 mostram o equipamento utilizado, cabendo apenas as informações complementares que se seguem.

3.6.1. Equipamento para purificação do ar - O ar utilizado na secagem provém de um compressor (A) mantido à pressão de aproximadamente 3 atm, através da regulação de um dreno de ar (B); para a retenção de partículas sólidas, de água e de óleo presentes no ar, foi instalado um sistema para sua purificação constituído de um ciclone (C) com diâmetro de 8 cm e altura de 23 cm e quatro filtros de lã de vidro (D) com diâmetro de 6 cm e altura de 23 cm.

3.6.2. Aquecedor do ar - O trocador de calor (H) consiste em um cilindro de 4 cm de diâmetro por 30 cm de altura. No seu interior foram colocadas resistências elétricas apropriadas para o aquecimento de ar, perpendicularmente ao seu fluxo. O cilindro foi isolado externamente com corda de amianto.

3.6.3. Secador de leite agitado, câmara de secagem - A figura 3.5 apresenta, em pormenores, esta aparelhagem. É constituída, de baixo para cima, por uma câmara vazia para regularizar o escoamento do ar de secagem, uma placa porosa com a mesma finalidade e, por último, a câmara de secagem propriamente dita, contendo o agitador. Há guarnições de borracha de 0,3 cm de espessura entre todas as peças unidas, para evitar perdas de ar. Os característicos destas diversas partes são os seguintes.

- a) Coluna de paredes de latão (I) com 9 cm de diâmetro por 21 cm de altura, tendo, na parte inferior, um tronco de cone de 7 cm de altura; em sua extremidade inferior é feita a alimentação do ar de secagem.
- b) Placa porosa (J) de material sintetizado, com 14 cm de diâmetro e 0,5 cm de espessura; é presa à coluna de latão por meio de duas flanges de ferro (K).
- c) Câmara de secagem (L), de forma cilíndrica, com diâmetro interno de 8 cm e altura de 10 cm; a altura desta câmara pode ser aumentada até 15 cm, sobrepondo anéis com encaixe tipo macho-fêmea, idêntico ao da figura 3.2; na base inferior do cilindro por onde entra o ar, é encaixada uma tela de plástico (M) que sustenta o material a ser secado. A câmara de secagem é fixada à coluna de latão por meio de molas de aço. A câmara foi construída em acrílico.
- d) Agitador de partículas sólidas (N), constituído por um eixo contendo três pares de pás acopladas duas a duas com ângulos de inclinação de 30° e espaçadas de 1 cm.
- e) Motor redutor (O), acoplado ao agitador por meio de uma luva.

Figura 3.4 - Representação esquemática do secador utilizado

Figura 3.3 - Resultado do ensaio de mistura

Figura 3.5 - Representação esquemática da aparelhagem experimental

3.6.4. Medida e controle de vazão de ar - A vazão de ar era medida por meio de rotâmetro (G) Fischer-Potter previamente calibrado contra gasômetro aferido. A vazão de ar foi controlada manualmente por uma válvula de agulha inserida na linha (VI).

3.6.5. Medida e controle da temperatura do ar - Eram medidas as temperaturas do ar antes da placa porosa, na saída da câmara de secagem e do ambiente com termômetros de mercúrio (T) com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Estes foram previamente aferidos contra termômetro com certificado.

Não se detectou variação do valor das temperaturas do ar antes da placa porosa e na saída da câmara de secagem, onde os termômetros eram colocados em diversas posições radiais.

O controle da temperatura de entrada do ar foi feita manualmente por meio de um reostato (TC) inserido em série com as resistências elétricas do trocador de calor.

3.6.6. Medida da umidade do ar - A umidade do ar proveniente do compressor era continuamente medida através de um psicrômetro de bulbo úmido e bulbo seco (F), instalado em uma derivação da linha condutora do ar situada antes do rotâmetro.

A construção desse instrumento é descrita minuciosamente por Torloni (71). A velocidade mínima do ar para seu funcionamento era obtida pelo ajuste da pressão antes da válvula V3; a relação entre esta pressão e a vazão fora obtida previamente. A precisão das medidas foi verificada por comparação com um psicrômetro de ponto de orvalho (E).

3.6.7. Umidade do material - A cada ensaio, foram determinadas a umidade inicial e final do material contido na câmara de secagem. O método adotado foi o de perda de massa do material após 24 horas em estufa a 105°C (72).

3.7. MODO OPERATÓRIO

3.7.1. Preparação das sementes - As sementes foram preparadas da seguinte maneira:

- umectação em câmara aclimatada (veja item §3.3) por um período de 14 horas;
- armazenagem, por um período de 24 horas, para a homogeneização da umidade no seu interior.

Os lotes de sementes assim preparados eram de aproximadamente 500 g cada um.

3.7.2. Ensaio de secagem - As experiências seguiam as seguintes etapas.

- a) Com o compressor ligado e a câmara de secagem vazia, regulavam-se a temperatura e a vazão do ar desejadas na entrada da câmara de secagem e esperava-se atingir o equilíbrio térmico. Esta operação tinha a duração de 1,5 a 2 horas.
- b) Retirava-se, então, a câmara de secagem do conjunto de equipamentos e carregava-se com uma massa de sementes de sorgo pré-determinada (a massa da câmara era conhecida).
- c) Do mesmo lote de material colocado na câmara de secagem, eram retiradas duas amostras para a determinação da umidade inicial das sementes.
- d) Colocava-se a câmara de secagem sobre a placa porosa (veja §3.6.3) e iniciava-se a operação de secagem da seguinte maneira:
 - prendia-se a câmara de secagem no conjunto condutor de ar (veja §3.6.3) por meio das molas;
 - ligava-se o eixo do agitador ao eixo do motor-redutor de velocidade;
 - ligava-se o motor propulsor do agitador;
 - reajustava-se a vazão de ar.Todas essas operações tinham uma duração de, aproximadamente, 30 segundos.
- e) Em intervalos de tempo de 5 minutos no início da secagem e de 10 na parte final, a câmara de secagem, com o material, era retirada do conjunto condutor de ar e pesada em balança Mettler tipo PI200 (capacidade de 1200 g, precisão de 0,1 g).
- f) Antes de retirar a câmara para pesagem (item e), liam-se os valores de temperaturas, vazão e umidade do ar.
- g) Ao final de cada ensaio, retiravam-se duas amostras do material contido na câmara de secagem, para determinar a umidade final.
- h) A duração de cada ensaio de secagem era de, aproximadamente, 3 horas, não considerando os preparativos e a análise dos resultados.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. INTRODUÇÃO

Conforme foi dito no §3.4, realizou-se, inicialmente, uma série de ensaios preliminares. Estes serviram para acertar pormenores do equipamento, melhorar a técnica experimental e verificar que, dentro das faixas de temperatura e vazão de ar a serem utilizadas, a viabilidade das sementes não seria diminuída pela secagem.

Em seguida, realizaram-se 24 ensaios definitivos, sendo estudada a influência das seguintes variáveis: vazão de ar, temperatura do ar na entrada do secador e massa total do leito. Todos esses ensaios foram efetuados com material proveniente de um mesmo lote convenientemente misturado. A umidade do ar na entrada do secador permanecia aproximadamente constante ao longo de cada experimento, pouco variando de um para outro.

Alguns ensaios foram repetidos para verificar sua reprodutibilidade.

O correlacionamento dos dados para determinar uma equação que representasse a velocidade de secagem foi feito adotando-se, como mecanismo de seca, a difusão de água através do sólido; chegou-se a uma equação geral representando a secagem das sementes de sorgo em leito agitado mecanicamente, dentro das condições dos ensaios realizados.

4.2. RESULTADOS DOS TESTES DE VIABILIDADE DAS SEMENTES

Estes testes foram realizados durante os ensaios preliminares de secagem, feitos com material provenientes de um mesmo lote. Resultou que, nesse lote de sementes, antes da secagem, em média, 88% delas era viável.

A figura 4.1 mostra os resultados obtidos com as sementes após secagem nos ensaios preliminares.

Como se observa através desta figura, a secagem não afetou a viabilidade das sementes. Podemos, portanto, concluir que as condições do ar de secagem e da agitação mecânica empregados são adequadas no processo de secagem.

Figura 4.1 - Resultados dos ensaios de viabilidade das sementes realizados após os ensaios preliminares.

4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DEFINITIVOS DE SECAGEM

4.3.1. Reprodutibilidade dos resultados dos ensaios - Com o fito de confirmar sua reprodutibilidade, foram realizados dois ensaios nas mesmas condições de temperatura, vazão e umidade do ar, com a mesma massa e umidades iniciais aproximadamente iguais. Como se pode ver através da figura 4.2, os resultados obtidos são coerentes. As condições empregadas nesses ensaios encontram-se no § 4.3.2.

4.3.2. Resultados dos ensaios de secagem - Os resultados obtidos nos ensaios de secagem encontram-se nas tabelas 4.1 a 4.XXIV e as curvas de secagem estão representadas nas figuras 4.3 a 4.8.

Nestes ensaios, a faixa de variação de cada variável estabelecida com os ensaios preliminares foi a seguinte:

- a) temperatura do ar: de 30 a 45°C;
- b) vazão mássica do ar: de 41 a 123 g/min;
- c) massa do material úmido: de 170 a 500 g; com estas massas, a altura do leito variava de 4 a 11 cm, aproximadamente.

Para dar uma visão global dos ensaios realizados, colocou-se, na tabela XXV, um resumo das condições experimentais.

Figura 4.2 - Reprodutibilidade dos ensaios

Tabela 4.I - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E1		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,1959	
10	0,1862	22,5
15	0,1837	23,5
20	0,1816	23,5
25	0,1794	24,0
30	0,1778	24,5
45	0,1726	25,5
60	0,1683	26
70	0,1656	26
85	0,1613	27
100	0,1586	27
110	0,1567	27
120	0,1548	27,5
132	0,1526	27,5
140	0,1510	27,5
150	0,1483	27
$T_e = 30,0 \text{ C}$		
$m_s = 184,9 \text{ g}$		
$q_M = 41 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0050 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.II - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E2		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,2012	
5	0,1949	22,5
10	0,1922	20,5
15	0,1900	21
20	0,1879	21,5
25	0,1861	22
30	0,1843	22,5
42	0,1805	23,5
50	0,1781	23,5
60	0,1754	24,5
70	0,1729	25
80	0,1706	25
90	0,1684	25,5
100	0,1662	25,5
110	0,1644	25,5
120	0,1626	26
131	0,1605	26
140	0,1590	26
150	0,1572	26,5
160	0,1558	26,5
170	0,1543	27
180	0,1529	27
$T_e = 30,0 \text{ C}$		
$m_s = 277,4 \text{ g}$		
$q_M = 41 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0050 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.III - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E3		
θ (min)	W $(\frac{g H_2O}{g \text{ mat. seca}})$	T_s (°C)
0	0,1963	
5	0,1901	22,5
10	0,1867	
15	0,1836	24,5
20	0,1805	25,5
25	0,1794	26,0
30	0,1772	26,5
40	0,1738	27,0
50	0,1704	27,5
60	0,1676	28,0
70	0,1648	28,5
80	0,1625	28,5
90	0,1603	28,5
100	0,1580	28,0
110	0,1558	28,0
120	0,1541	28,0
130	0,1524	28,5
140	0,1507	28,5
150	0,1493	28,5
160	0,1479	28,5
170	0,1462	28,5
180	0,1451	28,5
$T_e = 30,0 \text{ } ^\circ\text{C}$		
$m_s = 177,9 \text{ g}$		
$q_M = 123 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0060 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.IV - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E4		
θ (min)	W $(\frac{g H_2O}{g \text{ mat. seca}})$	T_s (°C)
0	0,1953	
5	0,1887	22,5
10	0,1851	23,0
15	0,1828	
20	0,1809	24,5
25	0,1788	25,0
30	0,1771	25,0
40	0,1737	25,5
50	0,1703	26,0
60	0,1677	26,5
70	0,1650	27,0
80	0,1628	27,0
90	0,1605	27,0
100	0,1582	27,5
110	0,1563	27,5
120	0,1544	
133	0,1522	27,5
140	0,1508	
150	0,1491	28,0
160	0,1476	28,0
170	0,1461	28,0
180	0,1446	28,0
195	0,1425	28,0
$T_e = 30,0 \text{ } ^\circ\text{C}$		
$m_s = 264,2 \text{ g}$		
$q_M = 82 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0068 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.V - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E5		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,1905	
5	0,1850	23,0
10	0,1825	22,0
20	0,1780	22,0
30	0,1743	23,0
40	0,1710	24,0
50	0,1682	25,0
65	0,1639	25,0
80	0,1602	26,0
90	0,1581	27,0
100	0,1560	28,0
120	0,1517	
131	0,1501	27,0
140	0,1487	27,5
150	0,1468	27,0
160	0,1455	27,5
170	0,1437	27,5
185	0,1419	27,5
$T_e = 30,0^\circ\text{C}$		
$m_s = 425,5 \text{ g}$		
$q_M = 82 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0060 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.VI - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E6		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,2443	
5	0,2314	22,0
10	0,2261	24,0
15	0,2214	25,0
20	0,2173	25,5
25	0,2138	26,0
30	0,2108	26,5
40	0,2050	27,0
50	0,1997	
60	0,1956	27,5
70	0,1911	27,5
80	0,1873	27,5
90	0,1838	28,0
102	0,1800	28,0
110	0,1773	28,0
120	0,1744	28,0
130	0,1717	28,0
140	0,1691	28,0
150	0,1668	28,0
160	0,1644	28,0
$T_e = 30,0^\circ\text{C}$		
$m_s = 170,1 \text{ g}$		
$q_M = 123 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0070 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.VII - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E7		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,2441	
5	0,2348	20,0
10	0,2298	21,5
15	0,2252	23,0
20	0,2218	24,0
25	0,2176	25,0
30	0,2149	25,0
40	0,2092	26,0
50	0,2043	26,0
60	0,1997	26,5
70	0,1955	26,5
80	0,1913	27,0
90	0,1878	27,0
100	0,1844	27,0
110	0,1810	27,0
120	0,1783	27,0
130	0,1752	27,5
140	0,1730	27,5
150	0,1703	27,5
160	0,1680	27,5
170	0,1657	27,5
180	0,1638	27,5
$T_e = 30,0^\circ\text{C}$		
$m_s = 262,0 \text{ g}$		
$q_M = 123 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0072 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.VIII - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E8		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,2530	
5	0,2421	24,5
10	0,2369	23,0
15	0,2323	24,0
21	0,2277	25,0
25	0,2243	25,5
30	0,2208	26,0
40	0,2139	27,5
50	0,2082	28,5
60	0,2024	29,0
70	0,1978	29,5
80	0,1929	30,0
90	0,1886	30,0
100	0,1846	30,5
110	0,1812	31,0
120	0,1774	31,0
130	0,1742	31,5
140	0,1708	31,5
151	0,1673	32,0
170	0,1622	32,5
180	0,1593	33,0
$T_e = 38,0^\circ\text{C}$		
$m_s = 173,9 \text{ g}$		
$q_M = 41 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0060 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.IX - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E9		
θ (min)	W $(\frac{g \text{ H}_2\text{O}}{g \text{ mat. seca}})$	T_s (°C)
0	0,1881	
5	0,1821	26,0
10	0,1792	25,0
15	0,1766	25,5
20	0,1748	
25	0,1726	27,0
30	0,1704	28,0
40	0,1672	
50	0,1639	29,5
60	0,1610	29,5
70	0,1577	30,5
80	0,1548	31,0
90	0,1526	31,5
100	0,1500	31,5
110	0,1478	32,0
120	0,1457	32,0
130	0,1438	32,0
140	0,1420	32,0
150	0,1402	32,0
160	0,1384	32,0
170	0,1369	32,0
180	0,1353	33,0
195	0,1329	33,0
$T_e = 38,0^\circ\text{C}$		
$m_s = 274,4 \text{ g}$		
$q_M = 41 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0080 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.X - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E10		
θ (min)	W $(\frac{g \text{ H}_2\text{O}}{g \text{ mat. seca}})$	T_s (°C)
0	0,2309	
5	0,2193	24,5
10	0,2131	26,5
15	0,2087	28,5
25	0,2006	30,0
30	0,1970	30,5
40	0,1909	31,5
50	0,1853	32,0
60	0,1800	32,5
70	0,1753	33,0
80	0,1711	33,5
90	0,1669	33,5
100	0,1636	33,5
110	0,1602	34,0
120	0,1575	34,0
130	0,1547	34,0
140	0,1519	34,0
150	0,1494	34,0
160	0,1469	34,0
170	0,1449	34,0
180	0,1427	34,0
$T_e = 38,0^\circ\text{C}$		
$m_s = 179,6 \text{ g}$		
$q_M = 82 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0055 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.XI - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E11		
θ (min)	W $(\frac{g H_2O}{g \text{ mat. seca}})$	T_s (°C)
0	0,1954	
5	0,1890	
10	0,1849	26,0
15	0,1815	27,0
20	0,1789	28,0
25	0,1759	29,0
30	0,1729	29,0
40	0,1684	
50	0,1643	31,5
60	0,1606	32,0
70	0,1572	32,0
80	0,1540	32,0
90	0,1508	32,0
100	0,1482	33,0
112	0,1452	33,0
125	0,1422	33,0
140	0,1392	33,0
150	0,1373	33,0
160	0,1355	33,5
170	0,1336	33,5
180	0,1321	
190	0,1306	33,0
$T_e = 38,0^\circ\text{C}$		
$m_s = 267,0 \text{ g}$		
$q_M = 82 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0080 \text{ g } H_2O/\text{g ar seco}$		

Tabela 4.XII - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E12		
θ (min)	W $(\frac{g H_2O}{g \text{ mat. seca}})$	T_s (°C)
0	0,2096	
5	0,2035	
10	0,1996	23,5
20	0,1932	24,0
30	0,1870	26,0
40	0,1816	28,0
50	0,1769	29,0
60	0,1735	29,5
75	0,1675	30,5
90	0,1619	
100	0,1588	32,0
110	0,1560	32,0
120	0,1533	32,0
130	0,1506	32,5
140	0,1483	32,5
150	0,1460	32,5
160	0,1439	32,5
170	0,1417	33,0
180	0,1399	33,0
$T_e = 38,0^\circ\text{C}$		
$m_s = 436,6 \text{ g}$		
$q_M = 82 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0080 \text{ g } H_2O/\text{g ar seco}$		

Tabela 4.XIII - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E13		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,1937	
5	0,1851	27,5
11	0,1793	31,0
15	0,1759	32,0
20	0,1732	32,0
30	0,1665	33,0
40	0,1621	34,0
50	0,1582	34,0
60	0,1543	34,5
70	0,1515	34,5
80	0,1482	35,0
90	0,1454	35,0
100	0,1415	35,0
110	0,1396	35,0
120	0,1373	35,0
130	0,1351	35,0
140	0,1332	35,0
150	0,1310	35,5
160	0,1293	35,5
170	0,1276	35,0
185	0,1254	35,0
$T_e = 38,0^\circ\text{C}$		
$m_s = 180,0 \text{ g}$		
$q_M = 121 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0070 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.XIV - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E14		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,1937	
5	0,1863	24,0
10	0,1813	27,0
15	0,1776	30,0
20	0,1745	31,0
25	0,1717	31,5
30	0,1688	32,0
40	0,1640	33,0
50	0,1601	33,5
60	0,1560	33,5
70	0,1525	34,0
80	0,1494	34,5
90	0,1464	34,5
100	0,1437	34,5
110	0,1411	34,0
120	0,1389	34,5
130	0,1366	34,5
140	0,1347	34,5
150	0,1327	35,0
160	0,1308	35,5
170	0,1290	34,5
180	0,1275	34,5
190	0,1261	35,0
200	0,1247	35,0
$T_e = 38,0^\circ\text{C}$		
$m_s = 281,0 \text{ g}$		
$q_M = 121 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0062 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.XV - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E15		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,2285	
8	0,2154	21,0
16	0,2075	25,0
26	0,2002	27,0
35	0,1940	28,5
45	0,1877	30,0
55	0,1827	31,0
65	0,1777	
75	0,1729	32,0
90	0,1671	33,0
100	0,1631	32,5
110	0,1598	32,5
120	0,1567	33,0
130	0,1539	33,0
140	0,1513	33,5
150	0,1488	33,5
160	0,1464	33,5
170	0,1443	33,5
180	0,1421	33,5
190	0,1402	34,0
205	0,1376	34,0
$T_e = 38,0^\circ\text{C}$		
$m_s = 419,1 \text{ g}$		
$q_M = 123 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0065 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.XVI - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E16		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,1954	
5	0,1886	24,5
15	0,1807	27,5
20	0,1777	
25	0,1747	28,5
30	0,1725	29,0
40	0,1668	
50	0,1624	32,0
60	0,1578	33,0
70	0,1535	34,0
80	0,1496	34,5
90	0,1458	35,0
100	0,1428	35,0
111	0,1393	35,0
120	0,1374	36,0
130	0,1349	36,0
140	0,1325	36,0
150	0,1300	36,0
160	0,1281	36,0
170	0,1262	36,0
180	0,1243	36,0
195	0,1213	36,0
$T_e = 45,0^\circ\text{C}$		
$m_s = 183,5 \text{ g}$		
$q_M = 41 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0060 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.XVII - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E17		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,1938	
5	0,1877	24,0
10	0,1848	
15	0,1816	24,5
20	0,1788	26,0
25	0,1763	27,0
30	0,1741	27,5
40	0,1688	28,0
50	0,1648	30,5
60	0,1605	
70	0,1566	32,0
81	0,1527	32,0
90	0,1498	33,0
101	0,1466	33,0
111	0,1437	33,0
120	0,1412	34,0
130	0,1385	35,0
140	0,1366	35,5
150	0,1341	35,0
160	0,1323	34,5
170	0,1301	35,0
180	0,1287	35,0
$T_e = 44^\circ\text{C}$		
$m_s = 279,6 \text{ g}$		
$q_M = 82 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0075 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.XVIII - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E18		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,1850	
5	0,1805	30,0
10	0,1760	32,0
15	0,1718	34,0
20	0,1681	35,0
25	0,1647	36,0
30	0,1619	36,5
40	0,1563	38,0
60	0,1472	38,5
70	0,1438	39,0
80	0,1405	39,5
90	0,1376	39,5
100	0,1342	39,5
110	0,1320	39,5
120	0,1297	40,5
130	0,1280	40,5
165	0,1207	40,5
$T_e = 45^\circ\text{C}$		
$m_s = 177,4 \text{ g}$		
$q_M = 82 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0075 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.XIX - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E19		
θ (min)	W $(\frac{g H_2O}{g \text{ mat. seca}})$	T_s (°C)
0	0,1929	
5	0,1811	28,0
10	0,1807	28,0
15	0,1743	30,0
20	0,1735	32,0
25	0,1703	
30	0,1682	34,0
40	0,1592	36,0
50	0,1544	36,5
60	0,1502	36,0
70	0,1468	37,0
80	0,1433	38,0
90	0,1394	38,5
100	0,1370	38,0
110	0,1345	38,0
120	0,1321	38,0
130	0,1298	39,0
140	0,1277	39,5
150	0,1255	39,5
160	0,1237	40,0
170	0,1219	39,5
180	0,1205	39,5
$T_e = 45^\circ\text{C}$		
$m_s = 279,0 \text{ g}$		
$q_M = 82 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0080 \text{ g } H_2O/\text{g ar seco}$		

Tabela 4.XX - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E20		
θ (min)	W $(\frac{g H_2O}{g \text{ mat. seca}})$	T_s (°C)
0	0,1953	
5	0,1882	22,0
10	0,1837	26,0
15	0,1800	28,5
20	0,1764	30,0
25	0,1728	32,0
30	0,1696	33,5
40	0,1635	35,0
50	0,1582	36,0
60	0,1535	37,0
70	0,1490	37,0
80	0,1449	38,0
90	0,1421	38,0
100	0,1388	38,0
110	0,1360	38,0
120	0,1331	38,0
130	0,1310	38,0
140	0,1285	39,0
150	0,1263	39,0
158	0,1249	39,0
$T_e = 45^\circ\text{C}$		
$m_s = 279,7 \text{ g}$		
$q_M = 82 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0055 \text{ g } H_2O/\text{g ar seco}$		

Tabela 4.XXI - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E21		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,1992	
5	0,1917	24,0
10	0,1866	27,5
15	0,1820	30,0
20	0,1782	31,0
25	0,1746	32,5
30	0,1711	34,0
40	0,1651	34,5
50	0,1596	36,5
60	0,1545	37,0
70	0,1505	36,5
80	0,1465	36,5
90	0,1432	37,5
100	0,1401	37,5
110	0,1370	37,5
120	0,1341	38,5
130	0,1313	39,0
140	0,1288	38,5
150	0,1268	38,5
160	0,1248	38,5
170	0,1240	38,5
180	0,1213	38,5
$T_e = 45^\circ\text{C}$		
$m_s = 274,1 \text{ g}$		
$q_M = 82 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0065 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.XXII - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E22		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,2480	
5	0,2326	27,0
10	0,2229	31,5
15	0,2155	34,0
20	0,2087	35,0
25	0,2030	36,0
30	0,1979	36,5
40	0,1882	38,0
50	0,1802	38,5
60	0,1731	
70	0,1666	39,5
80	0,1614	39,5
90	0,1563	39,5
100	0,1518	40,0
110	0,1472	40,0
120	0,1441	40,5
130	0,1398	40,5
140	0,1375	40,5
150	0,1347	40,5
160	0,1321	40,5
170	0,1295	40,5
180	0,1273	40,5
$T_e = 45^\circ\text{C}$		
$m_s = 175,6 \text{ g}$		
$q_M = 121 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0080 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.XXIII - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E23		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,2480	
5	0,2350	22,5
10	0,2261	28,0
15	0,2192	31,0
22	0,2113	32,5
30	0,2031	34,5
40	0,1933	36,0
50	0,1855	37,0
60	0,1784	37,0
70	0,1723	37,5
80	0,1667	38,5
90	0,1615	38,0
100	0,1567	38,0
110	0,1526	38,0
120	0,1489	38,0
130	0,1452	38,0
140	0,1418	38,0
150	0,1389	39,0
160	0,1363	39,0
170	0,1337	39,0
180	0,1313	39,0
$T_e = 45^\circ\text{C}$		
$m_s = 269,4 \text{ g}$		
$q_M = 121 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0070 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$		

Tabela 4.XXIV - Dados da Secagem
de Sementes de Sorgo

ENSAIO E24		
θ (min)	W $\left(\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g mat. seca}}\right)$	T_s (°C)
0	0,1779	
10	0,1664	27,0
20	0,1586	31,0
30	0,1521	32,5
40	0,1467	35,5
50	0,1418	36,5
62	0,1368	37,0
70	0,1337	37,0
80	0,1299	38,0
90	0,1269	38,5
100	0,1238	38,0
110	0,1211	38,0
120	0,1186	38,0
133	0,1156	39,0
148	0,1125	39,0
160	0,1101	40,0
170	0,1085	40,0
180	0,1067	40,0
$T_e = 45^\circ\text{C}$		
$m_s = 434,9 \text{ g}$		
$q_M = 118 \text{ g/min}$		
$H_G = 0,0075 \text{ g H}_2\text{O/g ar seco}$

Figura 4.3 - Umidade em função do tempo, ensaios E1, E2 e E3

Figura 4.4 - Umidade em função do tempo, ensaios E4, E5, E6 e E7

Figura 4.5 - Unidade em função do tempo, ensaios E8, E9, E10 e E11

Figura 4.6 - Unidade em função do tempo, ensaios E12, E13, E14 e E15

Figura 4.8 - Unidade em função do tempo, ensaios E20, E21, E22, E23 e E24

Figura 4.7 - Unidade em função do tempo, ensaios E16, E17, E18 e E19

Tabela 4.XXV - Tabela geral de condições dos ensaios de secagem e valores da umidade de equilíbrio

Ensaio nº	W_o	m_s (g)	q_M (g/min)	H_G	T_e (°C)	w_e
E1	0,1959	184,9	41	0,0050	30,0	0,0637
E2	0,2012	277,4	41	0,0050	30,0	0,0637
E3	0,1963	177,9	82	0,0060	30,0	0,0701
E4	0,1953	264,2	82	0,0068	30,0	0,0750
E5	0,1905	425,5	82	0,0060	30,0	0,0701
E6	0,2443	170,1	123	0,0070	30,0	0,0761
E7	0,2441	262,0	123	0,0072	30,0	0,0773
E8	0,2530	173,9	41	0,0060	38,0	0,0531
E9	0,1881	274,4	41	0,0080	38,0	0,0615
E10	0,2309	179,6	82	0,0055	38,0	0,0508
E11	0,1954	267,0	82	0,0080	38,0	0,0615
E12	0,2096	436,6	82	0,0080	38,0	0,0615
E13	0,1937	180,0	121	0,0070	38,0	0,0574
E14	0,1937	281,0	121	0,0062	38,0	0,0540
E15	0,2285	419,1	123	0,0065	38,0	0,0553
E16	0,1954	183,5	41	0,0060	45,0	0,0425
E17	0,1938	279,6	41	0,0075	44,0	0,0490
E18	0,1850	177,4	82	0,0075	45,0	0,0475
E19	0,1929	279,0	82	0,0080	45,0	0,0490
E20	0,1953	279,7	82	0,0055	45,0	0,0407
E21	0,1992	274,1	82	0,0065	45,0	0,0442
E22	0,2480	175,6	121	0,0080	45,0	0,0409
E23	0,2480	269,4	121	0,0070	45,0	0,0420
E24	0,1779	434,9	118	0,0075	45,0	0,0460

4.4. APLICAÇÃO DO MODELO DA DIFUSÃO

Como a revisão bibliográfica mostra que o modelo da difusão de água líquida através do sólido parece se aplicar bem no caso de grãos de cereais, supor-se-á, aqui, que seja este o mecanismo que controla a secagem.

4.4.1. Hipóteses - Para a aplicação da teoria da difusão, foi necessário fazer uma série de hipóteses, tanto em relação ao material quanto ao tipo de secador empregado. Dentro das considerações acima, essas hipóteses foram as seguintes:

- a) O secador estudado é de mistura perfeita; esta hipótese baseia-se nos ensaios qualitativos e quantitativos descritos no §3.4.
- b) A resistência predominante na secagem de grãos de cereais é a resistência interna; este fato foi demonstrado por vários autores (15, 21, 26, 32, 33).
- c) A temperatura do ar na saída do secador é igual à temperatura dos grãos no interior do leito; Kunii e Levenspiel (65), ao discutirem como medir a temperatura dos sólidos num secador de leito fluidizado, mostraram que é bastante razoável supor esta temperatura igual à do ar que deixa o leito.
- d) Não há gradientes de temperatura no interior dos grãos de sementes; Kreith (73) comenta que se pode considerar constante a temperatura no interior de um sólido trocando calor com um fluido, se o número de Biot for menor que 0,1. No caso da secagem de grãos de cereais, isto foi suposto por vários autores (15, 31).
- e) A difusividade da água no interior dos grãos é função da temperatura e não da umidade. Esta hipótese foi verificada para o caso de trigo (15), onde a influência desta última variável sobre a difusividade só era apreciável para valores de umidade abaixo de 9% em base seca; esta hipótese é adotada pela maioria dos autores (21, 22, 26, 33, 40).

4.4.2. Análise das possíveis soluções da equação da difusão - Analisando os dados obtidos na secagem (tabelas 4.1 a 4.XXIV), verifica-se que, ao longo do processo, a temperatura dos grãos, igual à temperatura do ar na saída do leito (hipótese c) varia no início da secagem, enquanto que, no período final, tende a um valor razoavelmente constante. De acordo com a hipótese e acima, a difusividade é uma função da temperatura e, portanto, ela só poderia ser considerada constante na parte final da secagem.

Baseando-se no que foi exposto até o momento, definir-se-á a solução da equação de difusão a ser empregada.

A solução proposta por Becker (16) (equações 2.6 e 2.7) não pode ser utilizada, pois os parâmetros necessários a esta correlação, tais como W_s e D ,

são impossíveis de serem avaliados; de fato, era muito difícil criar, principalmente no início da secagem, condições onde a difusividade pudesse permanecer constante.

As soluções de Hustrulid e colaboradores (21, 22), de Baughman e colaboradores (24, 25) e a de Henderson (26) não podem ser usadas, pois supõem a difusividade constante; a de Hustrulid (23), analogamente, não se aplica, pois supõe que a difusividade seja função da umidade e não da temperatura.

A solução proposta por Moon e Spencer (10), que, segundo seus autores, se aplica à secagem de uma maneira geral (equação 2.2), poderia ser adotada, aqui, somente no período final da secagem, mas não no período inicial, onde a difusividade não é constante. No entanto, pode-se contornar este problema, como foi visto no capítulo 2, através da mudança de variável proposta por Crank (12) (equação 2.3) na equação diferencial que representa a 2a. lei de Fick (equação 2.1). A equação diferencial que resulta dessa mudança de variável é a equação 2.5, cuja solução é dada por

$$\frac{W - W_e}{W_o - W_e} = A_o e^{-\xi} + A_1 e^{-B_1 \xi} + \dots \quad (4.1)$$

com

$$\xi = \int_0^\theta B_o D(\theta) d(\theta) = \int_0^\theta K(\theta) d\theta \quad (2.3)$$

A equação 4.1 pode ser aplicada do início ao fim da secagem, pois não supõe difusividade constante.

Diferenciando a equação 4.1 em relação ao tempo, obtêm-se a expressão da velocidade de secagem:

$$\frac{dW}{d\theta} = - (W - W_e) K(\theta) \frac{A_o e^{-\xi} + A_1 B_1 e^{-B_1 \xi} + \dots}{A_o e^{-\xi} + A_1 e^{-B_1 \xi} + \dots} \quad (4.2)$$

Para correlacionar nossos resultados através das expressões 4.1 e 4.2, é necessário obter W_e , $K(\theta)$ e as constantes A_i e B_i .

O método de cálculo da umidade de equilíbrio será visto no §4.4.3. A relação entre K e o tempo será obtida a partir do correlacionamento empírico mostrado no §4.4.4; os cálculos do adimensional de tempo, ξ , e dos parâmetros A_i e B_i são apresentados, respectivamente, nos §4.4.5 e §4.4.6.

4.4.3. Umidade de equilíbrio - Preferiu-se utilizar a umidade de equilíbrio estática, pois ela depende somente do material e das condições de umidade e temperatura do ar.

Os valores da umidade de equilíbrio estática (W_e) podem ser obtidos da literatura (3, 45). Adotaram-se, neste trabalho, as umidades obtidas a partir da equação apresentada por Paulsen e Thompson (45), que relaciona a umidade de equilíbrio estática em função da temperatura e da umidade relativa do ar:

$$W_e = \left[\frac{-\ln(1 - H_r)}{2,71 \times 10^{-5} (1,8 T + 92)} \right]^{0,476} \quad (4.3)$$

e que leva a resultados próximos aos de Brooker (3).

4.4.4. Correlacionamento empírico do coeficiente de secagem K em função da temperatura - Para chegar à relação entre K e o tempo para cada curva de secagem, obtem-se, inicialmente, a expressão da função $K = K(T_s)$. Daí, como, para cada curva, T_s é função de θ (veja tabelas 4.1 a 4.XXIV), resultará a relação desejada.

Para chegar à função $K = K(T_s)$, usaremos os trechos finais das curvas de secagem, pois aí a difusividade é aproximadamente constante e, então, pode-se usar a expressão 2.2; além disto, como se observa em vários casos análogos (veja, por exemplo, a equação 2.8), o segundo termo da série diminui com o tempo muito mais rapidamente que o primeiro. Portanto, pode-se admitir que, no período final da secagem, a equação 2.2 possa ser reduzida apenas à primeira parcela

$$\frac{W - W_e}{W_o - W_e} = A_o e^{-B_o D \theta} \quad (4.4)$$

Então, para obter $K = K(T_s)$, seleciona-se, no período final de cada curva de secagem, o trecho onde a temperatura do ar de saída permanecia aproximadamente constante. Nesses trechos, aplica-se a equação 4.4, ou seja, de gráficos de $\ln(W - W_e)$ em função de θ , obtem-se o coeficiente angular de cada reta. Este coeficiente angular é igual a $B_o D = K$. As figuras 4.9 e 4.10 apresentam as retas correspondentes a todos os ensaios.

Os valores de K, obtidos por este procedimento, encontram-se na figura 4.11. A equação de K em função da temperatura, determinada a partir desses dados, é

$$K = 7,28 \times 10^{-5} T_s - 1,66 \times 10^{-5} \quad (4.5)$$

(T_s em $^{\circ}\text{C}$, K em min^{-1}).

O coeficiente de determinação é $r^2 = 0,8466$. Para avaliar o desvio associado a essa correlação linear, calcularam-se, a partir da distribuição estatística "t de Student" (74), os limites superior e inferior desta correlação, a um nível de confiança de 95%. Estes limites estão indicados na figura 4.11.

Figura 4.9 - $\ln(W - W_e)$ em função do tempo

Figura 4.10 - $\ln(W - W_e)$ em função do tempo

Figura 4.11 - Relação de K com a temperatura

4.4.5. Cálculo de ξ em função do tempo - Para obter, para cada curva de secagem, a função $\xi = \xi(\theta)$, que constitui a variável independente nas equações 4.1 e 4.2, calculou-se, inicialmente, o valor de K para cada valor experimental de $T_s = T_s(\theta)$ pela equação 4.5; com estes valores e as tabelas de 4.1 a 4.XXIV, traçou-se a curva de K em função de θ e, por integração numérica (equação 2.3), obtiveram-se os valores de ξ em função do tempo, para cada curva.

Um exemplo da curva de K em função de θ é apresentado para um dos ensaios (EII) na figura 4.12.

Figura 4.12 - Relação de K em função do tempo

4.4.6. Correlacionamento geral - Apresentam-se, na figura 4.13, os valores da umidade reduzida em função do ξ , para todos os ensaios realizados.

A partir desses dados, obtém-se a equação 4.6, pela imposição do modelo teórico representado pela equação 4.1. Neste procedimento, foram adotados somente os dois primeiros termos da série representada na equação 4.1, devido à sua rápida convergência. O método utilizado no cálculo dos parâmetros A_0 , A_1 e B_1 é o que minimiza os quadrados dos desvios da equação imposta, em relação aos dados experimentais. A equação que pode representar o fenômeno de acordo com o exposto é

Figura 4.13 - Correlação geral

$$\frac{W - W_e}{W_o - W_e} = 0,7897 e^{-\xi} + 0,1766 e^{-10,8\xi} \quad (4.6)$$

e a equação da velocidade de secagem é dada por

$$\frac{dW}{d\theta} = - (W - W_e) K(\theta) \frac{0,7897 e^{-\xi} + 1,907 e^{-10,8\xi}}{0,7897 e^{-\xi} + 0,1766 e^{-10,8\xi}} \quad (4.7)$$

O desvio do modelo apresentado pela equação 4.6 em relação aos dados experimentais pode ser observado através da figura 4.13. Para uma melhor interpretação desses desvios, verificar-se-ã o que eles representam em relação ao tempo de secagem. A partir da teoria da propagação dos erros, demonstra-se que os desvios da equação 2.3 podem ser representados pela seguinte relação

$$\Delta\xi = K\Delta\theta \quad (4.8)$$

A título de exemplo, considere o caso de $W_r = 0,6$. O valor de ξ obtido através do modelo é, aproximadamente, 0,300. Na figura 4.13, observa-se uma dispersão da ordem de $\Delta\xi = \pm 0,050$, ou seja, $\xi = 0,300 \pm 0,050$. Para T_s igual a 30°C, resulta $K = 2,167 \times 10^{-3} \text{ (min}^{-1}\text{)}$ e, portanto, $\Delta\theta = \pm 23 \text{ min}$.

A tabela 4.XXVI traz alguns valores de $\Delta\theta$ para outros valores de ξ e de T_s .

Tabela 4. XXVI - Desvios da equação 4.6

T_s (°C)	$K \times 10^3$ (min ⁻¹)	$W_r = 0,6$ $\Delta\xi = \pm 0,050$	$W_r = 0,7$ $\Delta\xi = \pm 0,030$	$W_r = 0,8$ $\Delta\xi = \pm 0,020$
		$\Delta\theta$ (min)	$\Delta\theta$ (min)	$\Delta\theta$ (min)
30,0	2,167	± 23	± 14	± 9
35,0	2,530	± 20	± 12	± 8
40,0	2,895	± 17	± 10	± 7

CAPÍTULO 5

MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo mostrar-se-á como, a partir da cinética de secagem representada pela equação 4.7, podem-se prever curvas de secagem de sementes de sorgo.

A modelagem do sistema baseia-se na equação que descreve a cinética de secagem de grãos de sorgo e no balanço diferencial de energia; usando o modelo obtido, simularam-se, a seguir, as curvas de seca e os valores da temperatura de saída do ar em função do tempo para todos os ensaios e estes foram comparados com os valores experimentais.

A previsão da curva de secagem, para qualquer situação dentro do intervalo experimental, é realizada a partir das seguintes informações: umidade inicial do material, umidade de equilíbrio, massa de sólido, temperatura ambiente, vazão e temperatura do ar.

5.2. MODELO MATEMÁTICO

O conjunto de equações diferenciais que formam o modelo matemático para a simulação do sistema consiste em: a equação 5.1, que descreve o balanço diferencial de energia, e a equação 4.7, relativa à cinética de secagem.

O balanço diferencial de energia é dado por

$$\left[\begin{array}{c} \text{calor cedido} \\ \text{pela corrente} \\ \text{de ar} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{calor utilizado} \\ \text{para aquecer} \\ \text{o sólido} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{calor necessário} \\ \text{para vaporizar a} \\ \text{água} \end{array} \right] + \text{perdas} \quad (5.1)$$

cujas formalizações fornece, por unidade de tempo,

$$q_M C_{pa} (T_e - T_s) = m_s C_{ps} \frac{dT_s}{d\theta} + m_s \lambda \frac{dW}{d\theta} + Q \quad (5.2)$$

A equação cinética de secagem, como vimos no §4.4.3, é representada por

$$\frac{dW}{d\theta} = - (W - W_e) K(\theta) \frac{0,7897 e^{-\xi} + 1,907 e^{-10,8\xi}}{0,7897 e^{-\xi} + 0,1766 e^{-10,8\xi}} \quad (4.7)$$

onde

$$\xi = \int_0^\theta K(\theta) d\theta \quad (4.2)$$

e

$$K = 7,28 \times 10^{-5} T_s - 1,66 \times 10^{-5} \quad (4.5)$$

O conjunto de equações diferenciais 4.8 e 5.2 pode ser resolvido pelo método numérico de Runge-Kutta (75).

As condições de contorno para a sua solução são:

$$\theta = 0 \quad \text{para} \quad T_s = T_a$$

$$\theta = 0 \quad \text{para} \quad W = W_o$$

O programa de computação para a solução desse sistema é apresentado no anexo 1.

5.3. PROPRIEDADES FÍSICAS DO GRÃO DE SORGO E DO AR

No balanço diferencial de energia da equação 5.2, algumas propriedades físicas tanto do grão de sorgo como do ar são necessárias. Apresentamos abaixo essas propriedades, obtidas da literatura.

Calor específico do grão de sorgo - foi determinado em função da umidade do material por Sharma e Thompson (76):

$$C_{ps} = 1,37 \times 10^{-3} - 3,31 \times 10^{-5} W / (1 + W) \quad (\text{em J/kg.K}) \quad (5.3)$$

A influência da temperatura não foi considerada no cálculo do calor específico, pois é desprezível (77), dentro da faixa empregada na secagem.

Calor latente de vaporização da água - é apresentada por Paulsen e Thompson (45) como sendo também uma função somente da umidade do material. A expressão resultante é

$$\lambda = \lambda_a [1 + 12,1 \exp - 0,408 W / (1 + W)] \quad (5.4)$$

Calor específico do ar - foi tomado um valor médio (78), dentro das condições dos ensaios de secagem realizados: $C_{pa} = 1,08 \times 10^{-3}$ (J/kg.K).

5.4. ESTIMATIVA DA PERDA DE CALOR

A principal perda de calor no sistema formado pela câmara de secagem e flange de fixação ocorre exatamente nesta flange, pois é de ferro e difícil de isolar (veja §3.6.3). Ela funciona como uma aleta. Estimou-se, então, a perda de calor através de cálculo convencional de transmissão de calor em aletas cilíndricas (79), supondo que a perda de energia para o ar exterior ocorresse por convecção natural e a temperatura da parede interna do tubo que a sustenta fosse igual à temperatura do ar na entrada do secador.

A expressão do fluxo total de calor é

$$Q = 2L_1bk(T_e - T_a) \frac{I_1(L_2\sqrt{\beta})K_1(L_1\sqrt{\beta}) - K_1(L_2\sqrt{\beta})I_1(L_1\sqrt{\beta})}{I_1(L_2\sqrt{\beta})K_0(L_1\sqrt{\beta}) + K_1(L_2\sqrt{\beta})I_0(L_1\sqrt{\beta})} \quad (5.5)$$

onde $\beta = 2h/kb$ e I_0 , I_1 , K_0 e K_1 são funções de Bessel modificadas.

Os parâmetros L_1 , L_2 e b representam as dimensões geométricas da aleta, conforme mostra a figura 5.1. Os valores do coeficiente de convecção natural, h , e da condutividade térmica do ferro adotados foram: $8,5 \text{ J}/(\text{s.m}^2.\text{K})$ e $59 \text{ J}/(\text{s.m.K})$.

Substituindo os valores acima, resulta

$$Q = 0,42 (T_e - T_a) \quad (5.6)$$

onde Q é dado em joules por segundo e as temperaturas em graus Celsius

Figura 5.1 - Esquema da flange de fixação

5.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DA SIMULAÇÃO

Os resultados da simulação das curvas de secagem e das curvas de temperatura de saída do ar são apresentados na tabela 5.1. As figuras 5.2 e 5.3 mostram estes dados para um ensaio típico.

Ao simular as curvas de secagem, tendo como uma das condições iniciais a umidade real do sólido, observamos que os desvios existentes entre as curvas calculadas e as experimentais apresentam um erro sistemático. O tempo previsto no final da secagem apresenta desvios variando entre -20 e +50 min em relação aos valores experimentais e o desvio médio de todos os ensaios é de cerca de +15 min. Quanto à simulação da temperatura do ar na saída do leito em função do tempo, observamos que, no período final da secagem, a diferença entre a temperatura medida e a calculada atinge valores apreciáveis (até cerca de 4°C) nos ensaios correspondentes à menor vazão de ar (41 g/min). Nos demais ensaios, essas diferenças são da ordem de 1°C.

Analizamos estes resultados procurando determinar os fatores que levam aos desvios discutidos acima. Entre as possíveis causas, citamos: a irregularidade inicial do processo de secagem, a incerteza na expressão do coeficiente de secagem e o cálculo das perdas no balanço de energia (equação 5.2).

Ao examinar as curvas experimentais de secagem, observa-se que o seu andamento é anormal na parte inicial; isto poderia ocorrer pelo fato de não estar ainda estabelecido um regime térmico: ao começar o ensaio, a câmara de seca está em equilíbrio com o ar de secagem (§3.7.2) e o material sólido, com o ar ambiente. Após um certo tempo, o sistema todo entra em equilíbrio térmico e daí em diante a curva de seca normalizava-se. Se essa curva "normal" fosse extrapolada para o tempo inicial, teríamos uma umidade diferente da real. Com a alteração do valor de W_0 no conjunto de equações diferenciais (4.7 e 5.2), o desvio sistemático verificado anteriormente desaparece e a média dos desvios no final da secagem reduz-se a +2 minutos. Essa alteração pouco afeta a temperatura calculada do ar na saída do leito. Os valores resultantes da simulação das curvas de secagem com essa definição de W_0 são apresentados na tabela 5.1 e exemplos, nas figuras 5.2 e 5.3.

Para verificar a influência da incerteza da expressão do K no cálculo das curvas de secagem, estabeleceram-se duas novas equações, dentro dos limites de confiança de 95% (veja figura 4.11):

$$K = 8,88 \times 10^{-5} T_s - 5,48 \times 10^{-4} \quad (5.7)$$

e

$$K = 7,28 \times 10^{-5} T_s - 7,76 \times 10^{-5} \quad (5.8)$$

Estas modificações não levaram a mudanças perceptíveis nas curvas simuladas de secagem e na temperatura do ar na saída do leito.

Os desvios apresentados pelas curvas de temperatura, poderiam ser explicados pelo fato de, ao se calcular a perda de calor, admitir-se que a temperatura da parede onde se situava a flange de fixação (veja §5.4) fosse igual à do ar de entrada no secador; desprezava-se, dessa maneira, a resistência à troca de calor entre a parede e o ar, importante, principalmente, para baixas vazões. Considerando-se essa resistência, a perda de calor calculada seria menor, o que ocasionaria um aumento da temperatura simulada do ar na saída do leito, diminuindo, pois, o desvio observado.

Dentro dessas considerações, podemos concluir que, para uma dada condição de temperatura e vazão de ar na entrada do secador e uma dada massa de material, o principal fator que influencia o cálculo das curvas de secagem é a umidade inicial empregada na simulação.

No entanto, a utilização desse modelo, mesmo usando como umidade inicial a real, o que leva a um tempo de secagem maior que o necessário, é conveniente, pois garante a secagem das sementes.

Figura 5.2 - Exemplo da simulação da curva de secagem

Figura 5.3 - Exemplo da simulação da temperatura do ar na saída do leito

Tabela 5.1 - Resultados da simulação: W_0 real

ENSAIO E 1			ENSAIO E 2		
θ (MIN)	W	TS (C)	θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1959	25.0	0.	0.2012	24.5
10.	0.1902	22.1	10.	0.1960	20.8
20.	0.1853	22.3	20.	0.1918	20.6
30.	0.1809	22.7	30.	0.1880	20.9
40.	0.1769	23.1	40.	0.1844	21.3
50.	0.1733	23.4	50.	0.1811	21.7
60.	0.1699	23.7	60.	0.1779	22.0
70.	0.1668	24.0	70.	0.1750	22.3
80.	0.1640	24.3	80.	0.1722	22.6
90.	0.1614	24.5	90.	0.1696	22.8
100.	0.1589	24.7	100.	0.1672	23.1
110.	0.1566	24.8	110.	0.1649	23.3
120.	0.1545	25.0	120.	0.1627	23.5
130.	0.1524	25.1	130.	0.1606	23.7
140.	0.1505	25.2	140.	0.1586	23.8
150.	0.1486	25.3	150.	0.1567	24.0
160.	0.1469	25.3	160.	0.1549	24.1
170.	0.1451	25.4	170.	0.1532	24.2
180.	0.1435	25.5	180.	0.1515	24.3

ENSAIO E 3			ENSAIO E 4		
θ (MIN)	W	TS (C)	θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1963	24.5	0.	0.1953	24.5
10.	0.1901	27.0	10.	0.1898	24.5
20.	0.1845	27.2	20.	0.1849	25.0
30.	0.1797	27.5	30.	0.1805	25.3
40.	0.1754	27.6	40.	0.1766	25.6
50.	0.1716	27.6	50.	0.1731	25.9
60.	0.1682	27.9	60.	0.1699	26.2
70.	0.1651	28.0	70.	0.1670	26.4
80.	0.1623	28.1	80.	0.1644	26.5
90.	0.1597	28.1	90.	0.1619	26.7
100.	0.1573	28.2	100.	0.1597	26.8
110.	0.1551	28.2	110.	0.1575	26.9
120.	0.1530	28.3	120.	0.1555	27.0
130.	0.1510	28.3	130.	0.1536	27.1
140.	0.1491	28.4	140.	0.1519	27.1
150.	0.1473	28.4	150.	0.1501	27.2
160.	0.1456	28.4	160.	0.1485	27.3
170.	0.1439	28.4	170.	0.1469	27.3
180.	0.1423	28.4	180.	0.1454	27.3

Tabela 5.1 (continuação)

ENSAIO E 5		
θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1905	25.0
10.	0.1851	23.0
20.	0.1806	23.2
30.	0.1764	23.7
40.	0.1727	24.1
50.	0.1692	24.5
60.	0.1661	24.9
70.	0.1633	25.2
80.	0.1606	25.5
90.	0.1582	25.7
100.	0.1559	25.9
110.	0.1538	26.1
120.	0.1518	26.2
130.	0.1499	26.4
140.	0.1481	26.5
150.	0.1463	26.6
160.	0.1447	26.6
170.	0.1431	26.7
180.	0.1416	26.8

ENSAIO E 6		
θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2443	24.0
10.	0.2366	26.5
20.	0.2296	26.8
30.	0.2235	27.0
40.	0.2180	27.2
50.	0.2130	27.4
60.	0.2086	27.5
70.	0.2046	27.6
80.	0.2009	27.7
90.	0.1974	27.8
100.	0.1943	27.9
110.	0.1913	28.0
120.	0.1886	28.0
130.	0.1860	28.1
140.	0.1835	28.1
150.	0.1811	28.1
160.	0.1788	28.2
170.	0.1766	28.2
180.	0.1745	28.2

ENSAIO E 7		
θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2441	24.0
10.	0.2368	25.4
20.	0.2302	25.8
30.	0.2243	26.1
40.	0.2190	26.4
50.	0.2142	26.6
60.	0.2098	26.8
70.	0.2058	27.0
80.	0.2021	27.1
90.	0.1988	27.3
100.	0.1956	27.4
110.	0.1927	27.5
120.	0.1899	27.6
130.	0.1873	27.6
140.	0.1849	27.7
150.	0.1825	27.7
160.	0.1802	27.8
170.	0.1781	27.8
180.	0.1760	27.9

ENSAIO E 8		
θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2530	26.0
10.	0.2446	23.8
20.	0.2373	24.2
30.	0.2306	24.8
40.	0.2244	25.3
50.	0.2187	25.8
60.	0.2135	26.2
70.	0.2087	26.6
80.	0.2043	26.9
90.	0.2001	27.2
100.	0.1962	27.5
110.	0.1926	27.7
120.	0.1892	27.9
130.	0.1859	28.1
140.	0.1829	28.2
150.	0.1799	28.4
160.	0.1771	28.5
170.	0.1744	28.6
180.	0.1718	28.7

Tabela 5.1 (continuação)

ENSAIO E 9		
θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1881	28.5
10.	0.1819	24.9
20.	0.1768	25.0
30.	0.1722	25.6
40.	0.1681	26.2
50.	0.1643	26.8
60.	0.1609	27.3
70.	0.1578	27.7
80.	0.1549	28.1
90.	0.1522	28.5
100.	0.1497	28.7
110.	0.1474	29.0
120.	0.1452	29.2
130.	0.1431	29.4
140.	0.1411	29.6
150.	0.1392	29.7
160.	0.1374	29.8
170.	0.1356	29.9
180.	0.1339	30.0

ENSAIO E10		
θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2309	26.0
10.	0.2213	29.9
20.	0.2127	30.5
30.	0.2052	31.0
40.	0.1986	31.4
50.	0.1927	31.8
60.	0.1875	32.1
70.	0.1828	32.3
80.	0.1786	32.5
90.	0.1747	32.7
100.	0.1710	32.8
110.	0.1676	32.9
120.	0.1644	33.0
130.	0.1614	33.1
140.	0.1585	33.2
150.	0.1557	33.2
160.	0.1531	33.3
170.	0.1505	33.3
180.	0.1481	33.4

ENSAIO E11		
θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1954	24.0
10.	0.1886	28.7
20.	0.1824	29.5
30.	0.1769	30.1
40.	0.1721	30.5
50.	0.1678	30.9
60.	0.1639	31.2
70.	0.1604	31.5
80.	0.1573	31.7
90.	0.1543	31.9
100.	0.1517	32.1
110.	0.1491	32.2
120.	0.1468	32.3
130.	0.1445	32.4
140.	0.1424	32.5
150.	0.1403	32.5
160.	0.1384	32.6
170.	0.1365	32.6
180.	0.1346	32.7

ENSAIO E12		
θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2096	26.0
10.	0.2024	26.1
20.	0.1961	26.9
30.	0.1904	27.6
40.	0.1853	28.3
50.	0.1806	29.0
60.	0.1764	29.5
70.	0.1726	29.9
80.	0.1691	30.3
90.	0.1659	30.7
100.	0.1629	30.9
110.	0.1601	31.2
120.	0.1574	31.4
130.	0.1549	31.6
140.	0.1526	31.7
150.	0.1503	31.8
160.	0.1481	31.9
170.	0.1460	32.0
180.	0.1439	32.1

Tabela 5.1 (continuação)

ENSAIO E13			ENSAIO E14		
θ (MIN)	W	TS (C)	θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1937	24.0	0.	0.1937	24.0
10.	0.1859	32.7	10.	0.1861	31.2
20.	0.1789	33.1	20.	0.1792	31.8
30.	0.1730	33.4	30.	0.1732	32.3
40.	0.1678	33.7	40.	0.1680	32.7
50.	0.1633	33.9	50.	0.1634	33.0
60.	0.1593	34.0	60.	0.1593	33.2
70.	0.1557	34.1	70.	0.1556	33.4
80.	0.1525	34.2	80.	0.1523	33.6
90.	0.1495	34.3	90.	0.1492	33.7
100.	0.1467	34.4	100.	0.1463	33.8
110.	0.1441	34.5	110.	0.1437	33.9
120.	0.1417	34.5	120.	0.1412	34.0
130.	0.1394	34.5	130.	0.1388	34.1
140.	0.1372	34.6	140.	0.1366	34.1
150.	0.1351	34.6	150.	0.1344	34.2
160.	0.1331	34.6	160.	0.1323	34.2
170.	0.1311	34.7	170.	0.1303	34.3
180.	0.1292	34.7	180.	0.1284	34.3

ENSAIO E15			ENSAIO E16		
θ (MIN)	W	TS (C)	θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2285	25.0	0.	0.1954	25.0
10.	0.2197	28.6	10.	0.1875	29.1
20.	0.2117	29.5	20.	0.1803	30.1
30.	0.2046	30.2	30.	0.1740	30.8
40.	0.1983	30.8	40.	0.1683	31.4
50.	0.1927	31.3	50.	0.1633	31.8
60.	0.1876	31.7	60.	0.1589	32.3
70.	0.1831	32.1	70.	0.1548	32.6
80.	0.1789	32.4	80.	0.1511	32.9
90.	0.1751	32.6	90.	0.1478	33.1
100.	0.1715	32.8	100.	0.1446	33.3
110.	0.1682	33.0	110.	0.1417	33.5
120.	0.1651	33.2	120.	0.1389	33.6
130.	0.1622	33.3	130.	0.1363	33.7
140.	0.1593	33.4	140.	0.1338	33.8
150.	0.1566	33.5	150.	0.1314	33.9
160.	0.1541	33.6	160.	0.1291	34.0
170.	0.1516	33.6	170.	0.1269	34.1
180.	0.1491	33.7	180.	0.1248	34.1

Tabela 5.1 (continuação)

ENSAIO E17		
θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1938	25.0
10.	0.1858	32.5
20.	0.1783	33.6
30.	0.1718	34.4
40.	0.1661	35.0
50.	0.1612	35.5
60.	0.1567	36.0
70.	0.1528	36.3
80.	0.1492	36.6
90.	0.1459	36.8
100.	0.1428	37.0
110.	0.1399	37.1
120.	0.1372	37.2
130.	0.1346	37.3
140.	0.1322	37.4
150.	0.1298	37.5
160.	0.1276	37.6
170.	0.1254	37.6
180.	0.1233	37.7

ENSAIO E18		
θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1850	26.5
10.	0.1766	35.6
20.	0.1691	36.2
30.	0.1627	36.8
40.	0.1572	37.2
50.	0.1524	37.5
60.	0.1482	37.8
70.	0.1444	38.0
80.	0.1410	38.1
90.	0.1379	38.2
100.	0.1350	38.3
110.	0.1323	38.4
120.	0.1297	38.5
130.	0.1273	38.6
140.	0.1249	38.6
150.	0.1227	38.7
160.	0.1205	38.7
170.	0.1185	38.7
180.	0.1165	38.8

ENSAIO E19		
θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1929	27.0
10.	0.1847	33.1
20.	0.1772	34.2
30.	0.1707	35.0
40.	0.1650	35.6
50.	0.1600	36.1
60.	0.1556	36.5
70.	0.1517	36.9
80.	0.1481	37.2
90.	0.1448	37.4
100.	0.1417	37.6
110.	0.1388	37.7
120.	0.1361	37.8
130.	0.1336	37.9
140.	0.1311	38.0
150.	0.1288	38.1
160.	0.1265	38.2
170.	0.1243	38.2
180.	0.1222	38.3

ENSAIO E20		
θ (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1953	22.5
10.	0.1871	31.5
20.	0.1793	32.6
30.	0.1725	33.4
40.	0.1665	34.1
50.	0.1612	34.6
60.	0.1565	35.0
70.	0.1523	35.4
80.	0.1485	35.7
90.	0.1450	35.9
100.	0.1417	36.1
110.	0.1386	36.3
120.	0.1358	36.4
130.	0.1330	36.5
140.	0.1304	36.6
150.	0.1279	36.7
160.	0.1255	36.8
170.	0.1232	36.8
180.	0.1210	36.9

Tabela 5.1 (continuação)

ENSAIO E21		
B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1992	25.0
10.	0.1907	32.3
20.	0.1827	33.4
30.	0.1758	34.2
40.	0.1697	34.8
50.	0.1644	35.4
60.	0.1597	35.8
70.	0.1554	36.2
80.	0.1516	36.4
90.	0.1480	36.7
100.	0.1447	36.9
110.	0.1417	37.0
120.	0.1388	37.1
130.	0.1360	37.3
140.	0.1334	37.3
150.	0.1309	37.4
160.	0.1285	37.5
170.	0.1261	37.6
180.	0.1239	37.6

ENSAIO E22		
B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2480	24.0
10.	0.2349	36.6
20.	0.2231	37.3
30.	0.2131	37.9
40.	0.2046	38.3
50.	0.1972	38.6
60.	0.1907	38.9
70.	0.1849	39.1
80.	0.1796	39.3
90.	0.1748	39.4
100.	0.1703	39.5
110.	0.1661	39.6
120.	0.1621	39.7
130.	0.1583	39.7
140.	0.1547	39.8
150.	0.1512	39.8
160.	0.1479	39.9
170.	0.1447	39.9
180.	0.1415	39.9

ENSAIO E23		
B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2480	24.5
10.	0.2359	34.7
20.	0.2247	35.6
30.	0.2150	36.4
40.	0.2066	37.0
50.	0.1993	37.5
60.	0.1928	37.9
70.	0.1870	38.2
80.	0.1817	38.5
90.	0.1768	38.7
100.	0.1724	38.8
110.	0.1681	39.0
120.	0.1642	39.1
130.	0.1604	39.2
140.	0.1568	39.3
150.	0.1533	39.3
160.	0.1500	39.4
170.	0.1468	39.5
180.	0.1436	39.5

ENSAIO E24		
B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1779	25.0
10.	0.1704	33.8
20.	0.1634	35.2
30.	0.1572	36.0
40.	0.1520	36.7
50.	0.1473	37.2
60.	0.1432	37.7
70.	0.1395	38.0
80.	0.1362	38.3
90.	0.1331	38.5
100.	0.1303	38.7
110.	0.1276	38.8
120.	0.1251	39.0
130.	0.1227	39.1
140.	0.1205	39.2
150.	0.1183	39.2
160.	0.1162	39.3
170.	0.1142	39.4
180.	0.1122	39.4

Tabela 5.11 - Resultados da simulação: W_0 extrapolado

ENSAIO E 1			ENSAIO E 2		
B (MIN)	W	TS (°C)	B (MIN)	W	TS (°C)
0.	0.1959	25.0	0.	0.1980	24.5
10.	0.1902	22.1	10.	0.1924	20.4
20.	0.1853	22.3	20.	0.1879	20.1
30.	0.1809	22.7	30.	0.1838	20.5
40.	0.1769	23.1	40.	0.1800	21.0
50.	0.1733	23.4	50.	0.1765	21.4
60.	0.1699	23.7	60.	0.1732	21.8
70.	0.1668	24.0	70.	0.1702	22.2
80.	0.1640	24.3	80.	0.1674	22.5
90.	0.1614	24.5	90.	0.1648	22.8
100.	0.1589	24.7	100.	0.1623	23.0
110.	0.1566	24.8	110.	0.1600	23.3
120.	0.1545	25.0	120.	0.1578	23.5
130.	0.1524	25.1	130.	0.1557	23.7
140.	0.1505	25.2	140.	0.1538	23.8
150.	0.1486	25.3	150.	0.1519	24.0
160.	0.1469	25.3	160.	0.1501	24.1
170.	0.1451	25.4	170.	0.1484	24.2
180.	0.1435	25.5	180.	0.1467	24.3

ENSAIO E 3			ENSAIO E 4		
B (MIN)	W	TS (°C)	B (MIN)	W	TS (°C)
0.	0.1950	24.5	0.	0.1930	24.5
10.	0.1888	27.0	10.	0.1876	24.6
20.	0.1834	27.3	20.	0.1828	25.0
30.	0.1786	27.5	30.	0.1785	25.4
40.	0.1743	27.6	40.	0.1747	25.7
50.	0.1706	27.8	50.	0.1712	26.0
60.	0.1672	27.9	60.	0.1681	26.2
70.	0.1641	28.0	70.	0.1652	26.4
80.	0.1614	28.1	80.	0.1626	26.6
90.	0.1588	28.1	90.	0.1602	26.7
100.	0.1564	28.2	100.	0.1580	26.8
110.	0.1542	28.3	110.	0.1559	26.9
120.	0.1521	28.3	120.	0.1540	27.0
130.	0.1502	28.3	130.	0.1521	27.1
140.	0.1483	28.4	140.	0.1503	27.2
150.	0.1465	28.4	150.	0.1487	27.2
160.	0.1448	28.4	160.	0.1471	27.3
170.	0.1432	28.4	170.	0.1455	27.3
180.	0.1416	28.4	180.	0.1440	27.4

Tabela 5.11 (continuação)

ENSAIO E 5		
B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1870	25.0
10.	0.1818	23.1
20.	0.1773	23.4
30.	0.1733	23.8
40.	0.1696	24.3
50.	0.1663	24.7
60.	0.1633	25.0
70.	0.1605	25.3
80.	0.1579	25.6
90.	0.1555	25.8
100.	0.1533	26.0
110.	0.1513	26.1
120.	0.1493	26.3
130.	0.1475	26.4
140.	0.1457	26.5
150.	0.1440	26.6
160.	0.1424	26.7
170.	0.1409	26.8
180.	0.1394	26.8

ENSAIO E 6		
B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2350	24.0
10.	0.2273	26.5
20.	0.2204	26.8
30.	0.2144	27.1
40.	0.2090	27.3
50.	0.2043	27.4
60.	0.2000	27.6
70.	0.1961	27.7
80.	0.1926	27.8
90.	0.1893	27.9
100.	0.1863	27.9
110.	0.1835	28.0
120.	0.1808	28.1
130.	0.1783	28.1
140.	0.1760	28.1
150.	0.1737	28.2
160.	0.1715	28.2
170.	0.1694	28.2
180.	0.1674	28.2

ENSAIO E 7		
B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2300	24.0
10.	0.2228	25.5
20.	0.2164	25.9
30.	0.2108	26.2
40.	0.2057	26.5
50.	0.2012	26.8
60.	0.1971	27.0
70.	0.1934	27.1
80.	0.1900	27.3
90.	0.1868	27.4
100.	0.1839	27.5
110.	0.1812	27.6
120.	0.1787	27.7
130.	0.1763	27.7
140.	0.1740	27.8
150.	0.1718	27.8
160.	0.1697	27.9
170.	0.1677	27.9
180.	0.1658	27.9

ENSAIO E 8		
B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2420	26.0
10.	0.2334	23.6
20.	0.2260	24.1
30.	0.2193	24.8
40.	0.2132	25.4
50.	0.2077	25.9
60.	0.2026	26.3
70.	0.1980	26.7
80.	0.1937	27.1
90.	0.1897	27.4
100.	0.1861	27.7
110.	0.1826	27.9
120.	0.1794	28.1
130.	0.1763	28.2
140.	0.1734	28.4
150.	0.1706	28.5
160.	0.1679	28.6
170.	0.1653	28.7
180.	0.1628	28.8

Tabela 5.11 (continuação)

ENSAIO E 9			ENSAIO E10		
B (MIN)	W	TS (°C)	B (MIN)	W	TS (°C)
0.	0.1850	28.5	0.	0.2240	26.0
10.	0.1789	25.1	10.	0.2147	30.0
20.	0.1739	25.1	20.	0.2064	30.6
30.	0.1694	25.7	30.	0.1992	31.1
40.	0.1654	26.3	40.	0.1928	31.6
50.	0.1617	26.9	50.	0.1872	31.9
60.	0.1584	27.4	60.	0.1822	32.2
70.	0.1553	27.8	70.	0.1777	32.4
80.	0.1525	28.2	80.	0.1736	32.6
90.	0.1499	28.6	90.	0.1698	32.8
100.	0.1474	28.8	100.	0.1663	32.9
110.	0.1452	29.1	110.	0.1630	33.0
120.	0.1430	29.3	120.	0.1600	33.1
130.	0.1410	29.5	130.	0.1570	33.2
140.	0.1390	29.6	140.	0.1543	33.2
150.	0.1372	29.8	150.	0.1516	33.3
160.	0.1354	29.9	160.	0.1491	33.3
170.	0.1337	30.0	170.	0.1466	33.4
180.	0.1320	30.1	180.	0.1442	33.4

ENSAIO E11			ENSAIO E12		
B (MIN)	W	TS (°C)	B (MIN)	W	TS (°C)
0.	0.1910	24.0	0.	0.2050	26.0
10.	0.1844	28.9	10.	0.1980	26.3
20.	0.1784	29.6	20.	0.1918	27.1
30.	0.1731	30.2	30.	0.1863	27.8
40.	0.1684	30.6	40.	0.1813	28.5
50.	0.1642	31.0	50.	0.1768	29.1
60.	0.1605	31.3	60.	0.1727	29.6
70.	0.1571	31.6	70.	0.1690	30.1
80.	0.1540	31.8	80.	0.1656	30.5
90.	0.1512	32.0	90.	0.1625	30.8
100.	0.1486	32.1	100.	0.1596	31.1
110.	0.1462	32.2	110.	0.1569	31.3
120.	0.1439	32.3	120.	0.1543	31.5
130.	0.1417	32.4	130.	0.1519	31.7
140.	0.1396	32.5	140.	0.1496	31.8
150.	0.1377	32.6	150.	0.1474	31.9
160.	0.1358	32.6	160.	0.1453	32.0
170.	0.1339	32.7	170.	0.1432	32.1
180.	0.1322	32.7	180.	0.1412	32.2

Tabela 5.11 (continuaçã)

ENSAIO E13		
B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1900	24.0
10.	0.1824	32.8
20.	0.1756	33.2
30.	0.1698	33.5
40.	0.1648	33.7
50.	0.1604	33.9
60.	0.1565	34.1
70.	0.1530	34.2
80.	0.1498	34.3
90.	0.1469	34.4
100.	0.1443	34.4
110.	0.1418	34.5
120.	0.1394	34.5
130.	0.1371	34.6
140.	0.1350	34.6
150.	0.1330	34.6
160.	0.1310	34.6
170.	0.1291	34.7
180.	0.1273	34.7

ENSAIO E14		
B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1900	24.0
10.	0.1826	31.3
20.	0.1759	31.9
30.	0.1700	32.4
40.	0.1649	32.7
50.	0.1604	33.0
60.	0.1564	33.3
70.	0.1529	33.5
80.	0.1496	33.6
90.	0.1466	33.8
100.	0.1439	33.9
110.	0.1413	34.0
120.	0.1388	34.0
130.	0.1365	34.1
140.	0.1343	34.2
150.	0.1322	34.2
160.	0.1302	34.3
170.	0.1283	34.3
180.	0.1264	34.3

ENSAIO E15		
B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2210	25.0
10.	0.2125	28.8
20.	0.2048	29.7
30.	0.1980	30.4
40.	0.1919	31.0
50.	0.1865	31.5
60.	0.1817	31.9
70.	0.1774	32.2
80.	0.1734	32.5
90.	0.1697	32.8
100.	0.1663	33.0
110.	0.1632	33.1
120.	0.1602	33.3
130.	0.1574	33.4
140.	0.1547	33.5
150.	0.1521	33.6
160.	0.1496	33.6
170.	0.1472	33.7
180.	0.1449	33.8

ENSAIO E16		
B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1930	25.0
10.	0.1853	29.2
20.	0.1781	30.1
30.	0.1719	30.8
40.	0.1663	31.4
50.	0.1614	31.9
60.	0.1570	32.3
70.	0.1530	32.7
80.	0.1494	32.9
90.	0.1461	33.2
100.	0.1430	33.4
110.	0.1401	33.5
120.	0.1374	33.7
130.	0.1348	33.8
140.	0.1323	33.9
150.	0.1300	34.0
160.	0.1277	34.0
170.	0.1255	34.1
180.	0.1234	34.2

Tabela 5.11 (continuação)

ENSAIO E17		
θ (MIN)	W	TS (°C)
0.	0.1940	25.0
10.	0.1860	32.5
20.	0.1785	33.6
30.	0.1720	34.4
40.	0.1663	35.0
50.	0.1613	35.5
60.	0.1569	35.9
70.	0.1529	36.3
80.	0.1493	36.6
90.	0.1460	36.8
100.	0.1429	37.0
110.	0.1401	37.1
120.	0.1373	37.2
130.	0.1348	37.3
140.	0.1323	37.4
150.	0.1300	37.5
160.	0.1277	37.6
170.	0.1255	37.6
180.	0.1234	37.7

ENSAIO E18		
θ (MIN)	W	TS (°C)
0.	0.1840	26.5
10.	0.1757	35.6
20.	0.1682	36.3
30.	0.1619	36.8
40.	0.1564	37.2
50.	0.1516	37.5
60.	0.1475	37.8
70.	0.1437	38.0
80.	0.1403	38.1
90.	0.1372	38.3
100.	0.1343	38.4
110.	0.1316	38.4
120.	0.1291	38.5
130.	0.1267	38.6
140.	0.1244	38.6
150.	0.1221	38.7
160.	0.1200	38.7
170.	0.1179	38.7
180.	0.1159	38.8

ENSAIO E19		
θ (MIN)	W	TS (°C)
0.	0.1850	27.0
10.	0.1772	33.4
20.	0.1700	34.5
30.	0.1639	35.2
40.	0.1585	35.8
50.	0.1538	36.3
60.	0.1496	36.7
70.	0.1459	37.0
80.	0.1425	37.3
90.	0.1394	37.5
100.	0.1365	37.7
110.	0.1338	37.8
120.	0.1312	37.9
130.	0.1288	38.0
140.	0.1265	38.1
150.	0.1243	38.2
160.	0.1221	38.2
170.	0.1201	38.3
180.	0.1181	38.4

ENSAIO E20		
θ (MIN)	W	TS (°C)
0.	0.1920	22.5
10.	0.1840	31.6
20.	0.1763	32.8
30.	0.1696	33.5
40.	0.1637	34.2
50.	0.1586	34.7
60.	0.1540	35.1
70.	0.1499	35.5
80.	0.1461	35.7
90.	0.1427	36.0
100.	0.1395	36.2
110.	0.1365	36.3
120.	0.1337	36.4
130.	0.1310	36.6
140.	0.1285	36.6
150.	0.1260	36.7
160.	0.1237	36.8
170.	0.1214	36.9
180.	0.1192	36.9

Tabela 5.11 (continuação)

ENSAIO E21			ENSAIO E22		
B (MIN)	W	TS (C)	B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.1940	22.5	0.	0.2240	24.0
10.	0.1860	31.8	10.	0.2124	37.2
20.	0.1784	32.9	20.	0.2020	37.6
30.	0.1717	33.7	30.	0.1933	38.3
40.	0.1659	34.3	40.	0.1859	38.6
50.	0.1608	34.8	50.	0.1794	38.9
60.	0.1563	35.2	60.	0.1738	39.2
70.	0.1522	35.6	70.	0.1687	39.4
80.	0.1485	35.8	80.	0.1641	39.5
90.	0.1450	36.1	90.	0.1599	39.6
100.	0.1419	36.2	100.	0.1560	39.7
110.	0.1389	36.4	110.	0.1523	39.8
120.	0.1361	36.5	120.	0.1489	39.8
130.	0.1335	36.6	130.	0.1456	39.9
140.	0.1310	36.7	140.	0.1425	39.9
150.	0.1286	36.8	150.	0.1394	40.0
160.	0.1262	36.9	160.	0.1365	40.0
170.	0.1240	36.9	170.	0.1337	40.0
180.	0.1218	37.0	180.	0.1310	40.1

ENSAIO E23			ENSAIO E24		
B (MIN)	W	TS (C)	B (MIN)	W	TS (C)
0.	0.2300	24.5	0.	0.1730	25.0
10.	0.2188	35.2	10.	0.1658	34.0
20.	0.2085	36.1	20.	0.1589	35.4
30.	0.1997	36.8	30.	0.1530	36.2
40.	0.1922	37.4	40.	0.1479	36.8
50.	0.1856	37.9	50.	0.1435	37.4
60.	0.1797	38.2	60.	0.1395	37.8
70.	0.1745	38.5	70.	0.1360	38.1
80.	0.1698	38.7	80.	0.1328	38.4
90.	0.1654	38.9	90.	0.1298	38.6
100.	0.1614	39.1	100.	0.1271	38.8
110.	0.1576	39.2	110.	0.1245	38.9
120.	0.1541	39.3	120.	0.1221	39.0
130.	0.1507	39.4	130.	0.1198	39.1
140.	0.1474	39.4	140.	0.1176	39.2
150.	0.1443	39.5	150.	0.1155	39.3
160.	0.1413	39.6	160.	0.1135	39.4
170.	0.1385	39.6	170.	0.1115	39.4
180.	0.1357	39.7	180.	0.1097	39.5

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Realizaram-se ensaios de secagem de sementes de sorgo nas seguintes condições:

- temperatura do ar na entrada do secador: de 30 a 45°C;
- vazão mássica de ar de secagem: 41 a 123 g/min;
- massa do material: de 170 a 500 g;
- umidade inicial: de 18 a 25%, em base seca.

Dentro das condições experimentais acima, é possível secar sementes de grãos de sorgo utilizando a técnica de leito com agitação mecânica do material sólido, pois os ensaios mostraram que a viabilidade das sementes não é afetada.

A partir dos dados experimentais, obteve-se uma equação que representa a cinética de secagem de grãos de sorgo, utilizando como base teórica a 2ª lei de Fick, pois considerou-se que a difusão da umidade no interior dos grãos seja o mecanismo controlador da secagem. A equação da cinética de secagem resultante é

$$\frac{dW}{d\theta} = - (W - W_e) K(\theta) \frac{0,7897 e^{-\xi} + 1,907 e^{-10,8\xi}}{0,7897 e^{-\xi} + 0,1766 e^{-10,8\xi}} \quad (4.7)$$

onde

$$K = 7,28 \times 10^{-5} T_s - 1,66 \times 10^{-5} \quad (4.5)$$

e

$$\xi = \int_0^\theta K(\theta) d\theta \quad (4.2)$$

Usando esta equação e o balanço diferencial de energia do sistema, foi possível simular matematicamente o processo, isto é, calcular as curvas de secagem e da temperatura do ar na saída do secador. Há uma concordância razoável com os resultados experimentais.

Concluiu-se, ainda, que o método empregado para a simulação é bastante sensível à umidade inicial utilizada no cálculo das curvas de secagem; adotan

do-se a umidade inicial extrapolada em lugar da real, obtêm-se resultados mais precisos, quando comparados com os dados experimentais.

Finalmente, pode-se admitir que as hipóteses empregadas no estabelecimento do modelo de cálculo das curvas de secagem levaram a resultados satisfatórios dentro dos padrões observados normalmente em trabalhos de pesquisa neste campo.

ANEXO 1

PROGRAMA DE COMPUTADOR UTILIZADO NA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM

C SECAGEM DE SEMENTES DE SORGO EM SECADOR DE LEITO AGITADO
C MECANICAMENTE; MODELAGEM MATEMATICA
C W=UMIDADE DO MATERIAL, BASE SECA; WE=UMIDADE DE EQUILIBRIO
C TE=TEMPERATURA DO AR NA ENTRADA DO SECADOR; T= TEMPERATURA INICIAL
C MB=MASSA DO MATERIAL SECO; MAR=VAZAO DO AR; K=NO DO ENSAIO
C CPSO=CALOR ESPECIFICO DO SOLIDO; CLAT=CALOR LATENTE DE
C VAPORIZACAO

READ(5,100)AA,AB,CLAK, CPAR

DO 8 J=1,24
READ(5,20)W,WE,T,TE,MB,MAR,TA,K
WRITE(6,70)K

WRITE(6,80)
WRITE(6,90)
100 FORMAT(4F20.10)
20 FORMAT(7F10.5,I2)
70 FORMAT(1H1,14H ENSAIO E,I2)
80 FORMAT(1X,19H 0 W TS,1X)
90 FORMAT(20H(4IN) (C),1X)
B1=10.791
A1=.17659
AD=.7897
TETA=.00001
DTETA=1.
FI=0.
10 AK=.00008876*T-.000548
CPSO=AA-AB*W/(1.-W)
CLAT=CLAK*(1.+(12.1*EXP(-.408*W/(1.+W))))
FIA=AK
FI=FI+FIA
GG=EXP(-FI)
XX=EXP(-B1*FI)
DW=-(W-WE)*AK*(AD*GG+A1*B1*XX)/(AD*GG+A1*XX)
DT=MAR*CPAR*(TE-T)/MB/CPSO+CLAT*DW/CPSO-6.00*(TE-TA)/MB/CPSO
CALL PRNTE(10.,180.,NF,TPRNT,TETA,W,T)
GO TO(5,8)NF
5 CALL INTI(TETA,DTETA,1)
CALL INT(T,DT)
CALL INT(W,DW)
GO TO 10
8 CONTINUE
STOP
END

=====

```
SUBROUTINE PRNTE(PRI,FNR,NF,TPRNT,A,B,C)
COMMON/CINT/T,DT,JS,JN,DXA(500),XA(500),IO,JS4
COMMON/CPR/NPR
100 FORMAT(1F5.0,1F9.4,1F7.1)
NPR=0

IF(TPRNT.LT.PRI) GO TO 4
W1=FNR-DT/2.
W2=TPRNT-DT/2.
IF((T.GE.W1).AND.((JS.EQ.2).OR.(JS4.EQ.4))) GO TO 6
IF((T.GE.W2).AND.((JS.EQ.2).OR.(JS4.EQ.4))) GO TO 5
RETURN
4 NF=1
5 TPRNT=TPRNT+PRI
8 PRINT 100,A,B,C
NPR=1
RETURN
6 T=0.
TPRNT=0.
NF=2
DO 7 J=1,500
7 XA(J)=0.
GO TO 8
END
```

=====

```
SUBROUTINE INTI(TD,DTD,100)
COMMON/CINT/T,DT,JS,JN,DXA(500),XA(500),IO,JS4
IO=JOD
JN=0
GO TO (6,5,1,1),IO
6 JS=2
GO TO 7
5 JS=JS+1
IF(JS.EQ.2)RETURN
IF(JS.EQ.3)JS=1
7 DT=DTD
3 TD=TD+DT
T=TD
RETURN
1 JS4=JS4+1
IF(JS4.EQ.5)JS4=1
IF(JS4.EQ.1) GO TO 2
IF(JS4.EQ.3) GO TO 4
RETURN
2 DT=DTD/2.
GO TO 3
4 TD=TD+DT
DT=2.*DT
T=TD
RETURN
END
```

=====

```
SUBROUTINE INT(X,DX)
COMMON/CINT/T,DT,JS,JN,LXA(500),XA(500),IO,JS4
JN=JN+1
GO TO (9,8,3,3),IO
9 X=X+DX*DT
RETURN

8 GO TO (1,2),JS
1 DXA(JN)=DX
X=X+DX*DT
RETURN
2 X=X+(DX-UXA(JN))*DT/2.
RETURN
3 GO TO (4,5,6,7),JS4
4 XA(JN)=X
DXA(JN)=DX
X=X+DX*DT
RETURN
X=XA(JN)+DX*DT
5 DXA(JN)=DXA(JN)+2.*DX
RETURN
X=XA(JN)+DX*DT
RETURN
7 DXA(JN)=(DXA(JN)+DX)/6.
6 DXA(JN)=DXA(JN)+2.*DX
X=XA(JN)+DXA(JN)*DT
RETURN
STOP
END
```

BIBLIOGRAFIA

- 1) BRANDEMBURG, N.R.; SIMONS, J.W.; SMITH, L.L. Seeds, the year book of agriculture - why and how seeds are dried. Washington, The USA Department of Agriculture, 1961.
- 2) ZINK, E. Immediate and latent effects of mechanical abuse of the germination of soybean seed. Ph.D. thesis, Faculty of Mississippi State University, 1966.
- 3) BROOKER, D.B. Drying cereal grains. Westport, Connecticut, The Avi Publishing Company, 1974.
- 4) LEWIS, W.K. The rate of drying of solid materials. The Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 13 (5), 427-438, 1921.
- 5) SHERWOOD, T.K. The drying of solids I. Industrial and Engineering Chemistry, 21 (1), 12-16, 1929.
- 6) _____. The drying of solids III. Industrial and Engineering Chemistry, 22 (2), 132-136, 1930.
- 7) _____. The drying of solids IV. Application of diffusion equations. Industrial and Engineering Chemistry, 24 (3), 307-310, 1932.
- 8) SHERWOOD, T.K. & COMINGS, E.W. The drying of solids V. Mechanism of drying of clays. Industrial and Engineering Chemistry, 25 (3), 311-316, 1933.
- 9) _____. The drying of solids VII. Industrial and Engineering Chemistry, 26 (10), 1096-1098, 1934.
- 10) MOON, P. & SPENCER, D.E. Field theory handbook. Berlin, Springer-Verlag, 1961.
- 11) HOUGEN, O.A.; McCAULEY, H.J.; MARSHALL Jr., W.R. Limitations of diffusion equations in drying. Transactions of American Institute of Chemical Engineering, 36: 183-209, 1940.
- 12) CRANK, J. The mathematics of diffusion. Oxford, Oxford University Press, 1967.
- 13) LUIKOV, A.V. & MIKHAILOV, Y.A. Theory of energy and mass transfer. Oxford,

Pergamon Press, 1965.

- 14) KAMEI, S. & SHIOMI, S. Drying of solid substances - moisture distribution in the course of drying. Journal of The Society of Chemical Industry, Supplementary Binding, Japan, 40:257-263, 1937.
- 15) BECKER, H.A. & SALLANS, H.R. A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. Separata de Cereal Chemistry, 32 (3):212-226, 1955.
- 16) BECKER, H.A. A study of diffusion in solids of arbitrary shape, with application to the drying of the wheat kernel. Separata de Journal of Applied Polymer Science, 1 (2):212-226, 1959.
- 17) BECKER, H.A. & SALLANS, H.R. Drying wheat in a spouted bed. Separata de Chemical Engineering Science, 13:97-112, 1961.
- 18) BECKER, H.A. & ISAACSON, R.A. Wheat drying in well-stirred batch and continuous-moving bed dryers Separata de The Canadian Journal of Chemical Engineering, 48: 560-567, 1970.
- 19) BECKER, H.A.; GUPTA, K.L.; ELLSWORTH, J.H. Simulation of deep bed grain drying. International Congress on the Use of Electronic Computers in Chemical Engineering, Paris, 1973.
- 20) SPENCER, H.B. A mathematical simulation of grain drying. Journal of Agricultural Engineering Research, 14 (3):226-235, 1969.
- 21) CHITTENDEN, D.H. & HUSTRULID, A. Determining Drying constants for shelled corn. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 9 (1): 52-55, 1966.
- 22) HUSTRULID, A. & FLIKKE, A.M. Theoretical drying curve for shelled corn. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2 (1): 112-114, 1959.
- 23) CHU, S.T. & HUSTRULID, A. Numerical solution of diffusion equation. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 11 (5):705-708, 1968.
- 24) BAUGHMAN, G.R.; HAMDY, M.Y.; BARRE, H.J. Experimental study and simulation of concurrent flow dryers. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 16 (5):890-894, 1973.
- 25) _____. Analog computer simulation of deep-bed drying of grain. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 14 (6):1058-1060, 1971.

- 26) HENDERSON, S.M. Progress in developing the thin layer drying equation. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 17 (6):1167-1168, 1974.
- 27) ROWE, R.J. & GUNKEL, W.W. Simulation of temperature and moisture content of alfafa during thin-layer drying. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 15 (5):805-810, 1972.
- 28) DELLA NINA, G. Contribuição ao estudo de secagem pela técnica de leito com jorro: aplicação ao malte verde de cevada. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1972.
- 29) BRUNELLO, G.; PECK, R.E.; DELLA NINA, G. The drying of barley malt in the spouted bed dryer. Separata de The Canadian Journal of Chemical Engineering, 52:201-205, 1974.
- 30) BRUNELLO, G.; DELLA NINA, G.; NASCIMENTO, C.A.O.; SHIMIZU, Priscila A. Verificação de novo modelo aplicável à secagem de cereais: secagem de milho em leito com jorro. 1º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, 1977.
- 31) BRUNELLO, G. & NASCIMENTO, C.A.O. Secagem de sorgo em leito fluidizado. Estudo de trocas térmicas. 2º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, 1977.
- 32) _____. Drying of cereal grains: two internal resistances model. The Second Pacific Chemical Engineering Congress (Pachec'77), Denver, 1977.
- 33) SIMMONDS, W.H.C.; WARD, G.T.; McEWEN, E. The drying of wheatgrain part I: the mechanism of drying. Transactions of Institute of Chemical Engineers, 31:265-278, 1953.
- 34) _____. The drying of wheatgrain part II: through-drying of deep-beds. Transactions of Institute of Chemical Engineers, 31:279-288, 1953.
- 35) _____. The drying of wheatgrain part III: interpretation in terms of its biological structure. Transactions of Institute of Chemical Engineers, 32:115-120, 1954.
- 36) _____. The drying of wheatgrain part IV: the resistance to air flow of beds of agricultural products. Experimental work. Transactions of Institute of Chemical Engineers, 32, 121-129, 1954.
- 37) _____. The drying of wheatgrain part V: resistances to air flow of beds of agricultural products. A correlation of results. Transactions of Institute of Chemical Engineers, 32: 130-140, 1954.
- 38) McEWEN, E. & O'CALLAGHAN, J.R. The effect of air humidity on through drying of wheat grain. Transactions of Institute of Chemical Engineers, 33:139-154,

1955.

- 39) BARRE, H.J., BAUGHMAN, G.R.; HAMDY, M.Y. Application of the logarithmic model to cross flow deep-bed grain drying. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 14 (6): 1061-1064, 1971.
- 40) BRUNELLO, G.; NASCIMENTO, C.A.O.; SAGRADI, M. Secagem de sementes de arroz em secador a vácuo. Não publicado, 1979.
- 41) _____. Secagem de sementes de milho em secador a vácuo. Não publicado, 1979.
- 42) VAN REST, D.J. & ISAAES, G.W. Exposed layer drying rates of grain. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 11 (2) : 236-239, 1968.
- 43) CHEN, C.S. & JOHNSON, W.H. Kinetics of moisture movement in hygroscopic materials I. Theoretical consideration of drying phenomena. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 12 (1): 109-113, 1969.
- 44) THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying - a new model. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 11 (4): 582-586, 1968.
- 45) PAULSEN, M.R. & THOMPSON, T.L. A drying analysis of grain sorghum. 1972 Winter Meeting, American Society of Agricultural Engineers, Chicago, Paper nº 72-819, 1972.
- 46) ROBERTS, D.E. & BROOKER, D.B. Grain drying with a recirculator. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 18 (1): 181-184, 1975.
- 47) CHIEN, K.S.; MATHES, R.K.; VERMA, B.P. Dimensional analysis of seed - moisture. Movement in deep-bed drying. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 14 (2): 277-281, 1971.
- 48) TROEGER, J.M. & HUKILL, W.V. Mathematical description of the drying rate of fully exposed corn. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 14 (6): 1153-1156, 1971.
- 49) HUKILL, W.V. & SCHMIDT, J.L. Drying rate of fully exposed grain kernels. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 3 (2): 71-77 e 80, 1960.
- 50) HUKILL, W.V. Basic principles in drying corn and grain sorghum. Agricultural Engineering, 28 (8): 335-338, 1947.
- 51) YOUNG, J.H. & DICKENS, J.W. Evaluation of costs for drying grain in batch or cross flow systems. Transactions of the American Society of Agricultural

Engineers, 18 (4): 734-739, 1975.

- 52) ROA, M. & MACEDO, I.C. Drying of "carioca" dry beans with solar energy in a stationary bin. 1976 Annual Meeting - American Society of Agricultural Engineers, Nebraska, Paper nº 76-3021, 1976.
- 53) BAKKER-ARKEMA, F.W.; LEREW, L.E.; DE BOER, S.F.; ROTH, M.G. Grain dryer simulation. Research Report, Michigan State University, Jan. 1974.
- 54) BOYCE, D.S. Grain moisture and temperature with position and time during through drying. Journal of Agricultural Engineers Research, 10 (4): 333-341, 1965.
- 55) HAMDY, M.Y. & BARRE, H.J. Analysis and hybrid simulation of deep-bed drying of grain. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 13 (6): 752-757, 1970.
- 56) WHITE, G.M.; ROSS, I.J.; WESTERMAN, P.W.. Drying rate and quality of white shelled corn as influenced by dew-point temperature. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 16 (1): 118-120, 1973.
- 57) NELLIST, M.E. Exposed layer drying of ryegrass seeds. Journal of Agricultural Engineering Research, 21: 49-66, 1976.
- 58) LUIKOV, A.V. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies, London, Pergamon Press, 1966.
- 59) _____. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (Review). International Journal of Heat and Mass Transfer, 18: 1-14, 1975.
- 60) PECK, R.E.; MAX, D.A.; AHLUWALIA, M.S.. Predicting drying times for thin materials. Chemical Engineering Science, 26: 389-403 (1971).
- 61) PECK, R.E. & WASAN, D.T. Advances in chemical engineering, London, Academic Press, v. 9, 1974.
- 62) KISAKUREK, B. The preparation of generalized drying curves for porous solids. Ph.D. Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago, 1973.
- 63) VYAS, K.C. The drying of thick porous materials. Ph.D. Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago, 1974.
- 64) VANECEK, V; MARKVART, M.; DRBOHLAV, R. Fluidized bed drying. London, Leonard Hill, 1966.
- 65) KUNII, D. & LEVENSPIEL, O. Fluidization engineering. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1969.
- 66) MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. Regras para análise de sementes. Escritório de

- 67) TECHNICAL BULLETIN - MISSISSIPPI STATE UNIVERSITY. The tetrazolium test for seed viability; EUA. Agricultural Experimental Station, v. 51, 1962.
- 68) GRABE, D.F. Tetrazolium testing handbook for agricultural seeds Association of Official Seed Analysts, 1970.
- 69) SHIMIZU, Priscila Aya - Comunicação pessoal.
- 70) CHATTERJEE, A. Effect of particle diameter and apparent particle density on internal solid circulation rate in air-spouted beds. Industrial & Engineering Chemistry - Process Design and Development, 9 (4): 531-536, 1970.
- 71) TORLONI, M. Dados práticos sobre construção e utilização de psicrômetros. Boletim do Departamento de Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, nº 15, 1960.
- 72) BACCHI, O., Regras para análise de sementes. Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, 1963.
- 73) KREITH, F., Principles of heat transfer. Pennsylvania, International Text-book Company, 1965.
- 74) HIMMELBLAU, D.M. Process analysis by statistical methods, New York, John Wiley & Sons, 1970.
- 75) MICKLEY, H.S.; SHERWOOD, T.K.; REED, C.E. Applied mathematics in chemical engineering. New York, Mc Graw-Hill Book Company, 1957.
- 76) SHARMA, D.K. & THOMPSON, T.L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 16 (1): 114-117, 1973.
- 77) HALL, C.W. Drying farm crops. Ohio, Agricultural Consulting Associates, 1957.
- 78) PERRY, J.H. Chemical engineers' handbook. New York, McGraw-Hill Company, 1963, 4a. ed.
- 79) ECKERT, E.R.G.; DRAKE, R.M. Heat and mass transfer. New York, McGraw-Hill Company, 1959.