

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**SECAGEM DE URUCUM EM CAMADA FINA –
CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DE
TRANSPORTE**

LUCIANNA DA GAMA FERNANDES VIEIRA

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

MARÇO DE 1996

**SECAGEM DE URUCUM EM CAMADA FINA –
CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DE
TRANSPORTE**

LUCIANNA DA GAMA FERNANDES VIEIRA

Dissertação apresentada ao Curso
de Engenharia Química da
Universidade Federal da Paraíba,
em cumprimento às exigências
para obtenção do Grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OPERAÇÕES E PROCESSOS

ORIENTADOR: PROF^a. Dra. ODÉLSIA LEONOR S. DE ALSINA

CO-ORIENTADOR: HÉLIO FRANCISCO BEZERRA

CAMPINA GRANDE - 1996



V658s
1196

Vieira, Lucianna da Gama Fernandes Vieira
Secagem de urucum em camada fina – caracte-
rização de propriedades de transporte / Lucianna
da Gama Fernandes Vieira. – Campina Grande –
PB: UFPB, 1996.
84p.: il.

Dissertação (Mestrado). UFPB / CCT
Inclui bibliografia

1. Urucum 2. Secagem em camada fina 3. Pro-
priedades de transporte I. Título

CDU. 66.047.4/.5



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA PARA ASSUNTOS DO INTERIOR

CPGEQ - COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO DA ALUNA: Lucianna Gama Fernandes Vieira**

**TÍTULO: "Secagem de Urucum em Camada Fina em Leito Fixo-
Caracterização das Propriedades de Transporte"**

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof.^a Odelsia Leonor S. de Alsina/Doutora

Orientadora

Prof. Hélio Francisco Bezerra/Mestre

Co-Orientador

Prof. Sandoval Farias da Mata/Doutor

Examinador

Prof. Sílvio José Rossi/Doutor

Examinador

CONCEITO

Aprovada com distinção

aprovada com distinção

Aprovada com Distinção

aprovado, com distinção

Campina Grande, 03 de abril de 1996

DEDICATÓRIA

À Deus,

A quem devo tudo...

Aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

À professora Dra. Odélsia Leonor Sanchez de Alsina pela paciência e orientação nesse trabalho;

Aos alunos de mestrado em Eng.^a Química, em particular a Oswaldo, Djane, Lígia, Mérgia, Cilene, Miriam, Vera, pessoas com quem me diverti e aprendi tanto nesses anos de convívio; obrigada pelo apoio nas horas de sufoco;

À aluna de iniciação científica Otaciana Romão, pela valiosa ajuda na obtenção dos dados experimentais;

A Nagel, Jose e Vimário;

À Coordenação de pós-graduação em Eng.^a Química, nas pessoas do Prof. Dr. Kepler, D. Maria José e Maricé;

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho;

RESUMO

A cultura do urucum tem grande importância econômica para os produtores nordestinos. As condições climáticas apresentam-se favoráveis ao cultivo desta cultura, obtendo-se índices consideráveis de bixina (2,7%), destacando-se como produto de grande aceitação nos mercados interno e externo. Uma vez que a bixina se degrada quando exposta a luz e calor excessivos, o que acontece na secagem natural, se propõe a secagem convectiva sob condições controladas. O objetivo deste trabalho é estudar algumas propriedades de transporte como difusividade térmica aparente, difusividade mássica efetiva e condutividade térmica aparente, com o intuito de caracterizar melhor a secagem em leito fixo. Além disso, foi estudada a influência da temperatura, da vazão e da umidade inicial nas curvas de cinética de secagem. Os valores de Def encontrados estão entre $0,854 \times 10^{-7}$ e $4,4421 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{min}$, com energia de ativação de 10,37 Kcal/mol, segundo a equação de Arrhenius.

ABSTRACT

The annato seeds (*Bixa Orellana* L.) culture has great economic importance for the producing native of northeastern Brazil. The climatic conditions come favorable to the cultivation of this culture, being obtained considerable indexes of bixine (2,7%), standing out as product of great acceptance in the intern and external markets. Once the bixine is degraded when exposed the light and excessive heat, what happens in the natural dried, intends the convective dried under controllked conditions. The objective of this work is to study some transport properties as apparent thermal diffusivity, mass effective diffusivity and apparent thermal conductivity, with the objective of characterizing the fixed bed dried. Besides it was studied the influence of the temperature and initial humidity in the kinetics dried curves.

NOMENCLATURA

- ε - Porosidade do leito de urucum (%)
- α - Difusividade térmica efetiva (m^2 / s)
- ψ - Esfericidade dos grãos de urucum (%)
- φ - Umidade relativa do ar de secagem (%)
- α_1 - Difusividade térmica efetiva para $r/R= 0.0$ (m / s)
- α_2 - Difusividade térmica efetiva para $r/R= 0.5$ (m / s)
- ρ_f - Densidade do ar (Kg/m^3)
- ρ_s - Densidade real do urucum (Kg/m^3)
- ρ_{sa} - Densidade aparente do urucum (Kg/m^3)
- μ_1 - Raiz característica da equação
- μ_n - Raízes característica da equação
- A e B - Parâmetros das equações 2.7 e 2.9
- a_1, a_2, a_3 - Parâmetros das equações 3.6 e 3.8
- A_n - Parâmetro da equação 2.21
- B_i - Número de Biot
- C_{p_a} - Capacidade calorífica aparente do sólido ($cal/g^\circ C$)
- C_{p_f} - Capacidade calorífica do ar ($cal/g^\circ C$)
- C_{p_s} - Capacidade calorífica dos grãos ($cal/g^\circ C$)
- D_{ef} - Coeficiente de difusividade mássica efetiva (cm^2 / min)
- D_p - Diâmetro do urucum (cm)
- E_a - Energia de ativação (Kcal/mol)
- h - Coeficiente de troca térmica ($W/m^2 \text{ }^\circ C$)
- J_0 - Função de Bessel de ordem zero
- J_1 - Função de Bessel de primeira ordem
- K - Constante de equilíbrio, K^{-1}

K - Parâmetro das equações 2.6 e 2.8
 K_a - Condutividade térmica efetiva ($W/m^{\circ}C$)
 K_{a1} - Condutividade térmica efetiva para $r/R= 0.0$ ($W/m^{\circ}C$)
 K_{a2} - Condutividade térmica efetiva para $r/R= 0.5$ ($W/m^{\circ}C$)
 n - Parâmetro da equação 2.8
 ρ_i ($i=1,2,3$), q_k ($k=1,\dots,5$) - Parâmetros da equação 3.7
 ρ_i ($i=1,2,3$), q_k ($k=1,\dots,5$) - Parâmetros da equação 3.7
 Q - Vazão do ar de secagem (m^3 / h)
 r - Vetor radial da célula (m)
 R - Raio da célula de medida (m)
 S - Transformada de Kirchhoff
 t - Tempo (min)
 T - Temperatura variável ($^{\circ}C$)
 T_{∞} - Temperatura do fluido de aquecimento ($^{\circ}C$)
 T^* - Relação de temperaturas $(T-T_{\infty})/(T_0 - T_{\infty})$
 T_0 - Temperatura inicial do grão ($^{\circ}C$)
 U - Umidade média volum. dos grãos em base seca (dec.)
 U^* - relação de Umidade $(U - U_e)/(U_i - U_e)$
 U_e - umidade de equilíbrio em base seca (dec.)
 U_i - umidade inicial do produto em base seca (%)
 W_f - peso da amostra final (g)
 W_i - peso da amostra inicial (g)

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Fórmula estrutural da bixina e norbixina

FIGURA 2.2 – Mudança de temperatura no centro (curva i), superfície (II), em relação ao tempo no processo de aquecimento de um corpo.

FIGURA 3.1 - Secador de leite fixo.

FIGURA 3.2 – Equipamentos auxiliares da secagem.

FIGURA 3.3 – Esquema dos equipamentos auxiliares da secagem.

FIGURA 3.4 – Célula de medida de condutividade.

FIGURA 4.1 – Algoritmo para determinação da condutividade térmica.

FIGURA 5.1 – Gráfico de reprodutibilidade das medidas experimentais.

FIGURA 5.2a. – Avaliação da influência da vazão na curva de cinética de secagem- temperatura de 75°C.

FIGURA 5.2b – Avaliação da influência da vazão na curva de cinética de secagem- temperatura de 66°C.

FIGURA 5.3 – Influência da umidade inicial nas curvas de secagem.

FIGURA 5.4a – influência da temperatura do ar nas curvas de secagem – $U_i=15\%$ b.s.

FIGURA 5.4b - influência da temperatura do ar nas curvas de secagem – $U_i=16\%$ b.s.

FIGURA 5.5- Evolução da temperatura de aquecimento do urucum – Exp. 01 ($T_\infty = 80^\circ\text{C}$).

FIGURA 5.6 – Aplicação de regressão linear na região de regime regular - Exp. 01 ($T_\infty = 80^\circ\text{C}$).

FIGURA 5.7a - Curvas de secagem de urucum com dados experimentais e calculados analiticamente. Temp. 338 K – Exp. 01.

FIGURA 5.7b - Curvas de secagem de urucum com dados experimentais e calculados analiticamente. Temp. 339K – Exp. 23.

FIGURA 5.7c - Curvas de secagem de urucum com dados experimentais e calculados analiticamente. Temp. 355,8 K – Exp. 14.

FIGURA 5.8 a- Variação do Def com umidade – Temp. 333 K

FIGURA 5.8 b- Variação do Def com umidade – Temp. 343 K

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Consumo e produção mundial de urucum.

TABELA 4.1 – Propriedades físicas do grão de urucum.

TABELA 5.1 – Valores dos parâmetros do ajuste da equação de Roa para urucum.

TABELA 5.2 – Estudo da reprodutibilidade dos resultados.

TABELA 5.3 – Efeito da temperatura do ar de aquecimento.

TABELA 5.4 – Resultados das aplicações do modelo com coeficiente de difusão constante.

TABELA 5.5 – Efeito do teor de umidade do grão sobre o Def (cm^2/s)

ÍNDICE

CAPÍTULO I	01
INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO II	04
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1 – Urucum	04
2.2 – Secagem	08
2.3 - Difusão na secagem de grãos	09
2.4 - Secagem em camada delgada	11
2.5 - Difusividade efetiva dos grãos	14
2.6 - Umidade de equilíbrio	15
2.7 -Condutividade térmica.....	18
2.7.1 - Processo de aquecimento de um corpo	21
CAPÍTULO III	23
EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	23
3.1 -Secador de leito fixo	23
3.2 - Equipamentos auxiliares.....	23
3.3 - Célula de medida de condutividade	27

CAPÍTULO IV	29
MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 -Determinação do teor de umidade.....	29
4.2 - Métodos experimentais	30
4.2.1 -Determinação da umidade de equilíbrio dinâmico	30
4.2.2 - Determinação das umidades relativa e absoluta do ar de secagem.....	31
4.2.3 - Obtenção dos dados experimentais das curvas de secagem.....	31
4.3- Determinação da difusividade e de condutividade térmicas	33
CAPÍTULO V	36
RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1 - Umidade de equilíbrio.....	36
5.2 - Cinética de secagem	37
5.2.1 -Reprodutibilidade dos dados experimentais	37
5.2.2 -Efeito das variáveis operacionais sobre a secagem	38
5.2.3 -Efeito da vazão do ar de secagem	38
5.2.4 -Influência da umidade inicial	40
5.2.5 - Influência da temperatura do ar de secagem	40
5.3 -Condutividade térmica	42
5.4-Coeficiente de difusão efetivo	45
5.4.1 - Modelo com Def constante	45

5.4.2 - Efeito da umidade no Def	48
5.4.3 - Efeito da isothermicidade dos experimentos.....	51
5.4.4 - Efeito da temperatura sobre o Def	52
CONCLUSÕES	54
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
BIBLIOGRAFIA	57
APÊNDICE I TABELAS	63
APÊNDICE II PLANILHA DE CÁLCULO	79
APÊNDICE III PROGRAMA DE CÁLCULO DE DEF APROXIMADO	81
APÊNDICE IV GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA.....	83

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A necessidade de baixa umidade na estocagem e armazenamento de grãos faz da secagem um dos mais importantes processos da época atual para esse fim. Por ser um processo de uso intensivo de energia, estudos para a melhoria de eficiência e da performance dos vários tipos de secadores de grãos têm se destacado pelas conseqüências econômicas, tanto para produtores como para consumidores (Parti, 1990). Além disso, é de suma importância que a qualidade do produto, quando exposto ao meio de secagem, seja mantida para utilizações futuras. Em se tratando de grãos, as características nutricionais e orgânicas devem ser mantidas, o que depende, principalmente, da tecnologia de secagem (Markowski, 1989).

O urucuzeiro (*Bixa Orellana* L.) é uma planta nativa da América Tropical, cujo maior interesse econômico é o de possuir em suas sementes, o urucum, alto teor de substâncias corantes. Seu cultivo tem sido impulsionado pela crescente proibição na utilização de corantes sintéticos, considerados cancerígenos, nas indústrias de alimentos e de cosméticos (Ferreira & Falesi, 1989). Em seu beneficiamento, se não for feito em condições apropriadas, haverá a perda do seu principal corante, a bixina, que acarretará na sua desvalorização econômica. A secagem do urucum é realizada para que a semente possa ser armazenada em boas condições, evitando-se o desenvolvimento de fungos e microorganismos, além de evitar a exposição descontrolada à luz e ao calor, fatores que provocam a degradação da bixina, fato que ocorre na

secagem natural, uma vez que ocorre em camadas expostas ao sol, e portanto, sem controle adequado.

Muitas pesquisas têm sido feitas para descrever o processo de secagem, para determinar o tempo ideal e as condições para uma secagem segura de grãos. O grande desafio para o entendimento desse processo está nas variações da forma e tamanho das partículas, na umidade de equilíbrio, no mecanismo de fluxo de umidade através do sólido e no método de provimento de calor requerido pela vaporização da umidade. Esses fatores impedem um tratamento unificado da secagem. Por causa disso, modelagem matemática e simulação computacional têm sido largamente utilizadas pelos pesquisadores, para projetos de secadores e desenvolvimento mais eficiente e seguro na secagem de grãos, uma vez que esses métodos permitem o acesso a uma maior quantidade de informações em um período de tempo satisfatório (Vasconcelos, 1990). Entretanto, para possuírem capacidade preditiva de precisão adequada, estes métodos requerem a disposição de dados confiáveis acerca das propriedades físicas e dos parâmetros cinéticos que descrevam o comportamento da secagem.

A caracterização física do urucum se iniciou a partir de um projeto conjunto entre a Empresa São Braz e o Laboratório de Transferência em Meios Porosos e Particulados do DEQ-CCT/UEPB, para a secagem de urucum em leito de jorro. Silva (1991) obteve algumas das características físicas do urucum como diâmetro da partícula, esfericidade, porosidade do leito, capacidade calorífica, densidade do sólido e curvas de equilíbrio higroscópico estático. Lima (1993) obteve ainda a circularidade, ângulo de repouso e outras isotermas de equilíbrio.

Para o coeficiente de difusão efetivo, Silva(1991) obteve uma primeira aproximação considerando este coeficiente constante para secagem de urucum em leito de jorro.

Neste trabalho foi estudada a secagem de urucum em camada fina, em leito fixo, em que o objetivo global foi caracterizar o urucum quanto as propriedades de transporte tais como, difusividade mássica aparente, difusividade térmica aparente e condutividade térmica efetiva. Como objetivo específico foi verificado o efeito das variáveis operacionais como temperatura e vazão do ar e a umidade inicial do produto, nas curvas de cinética de secagem.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

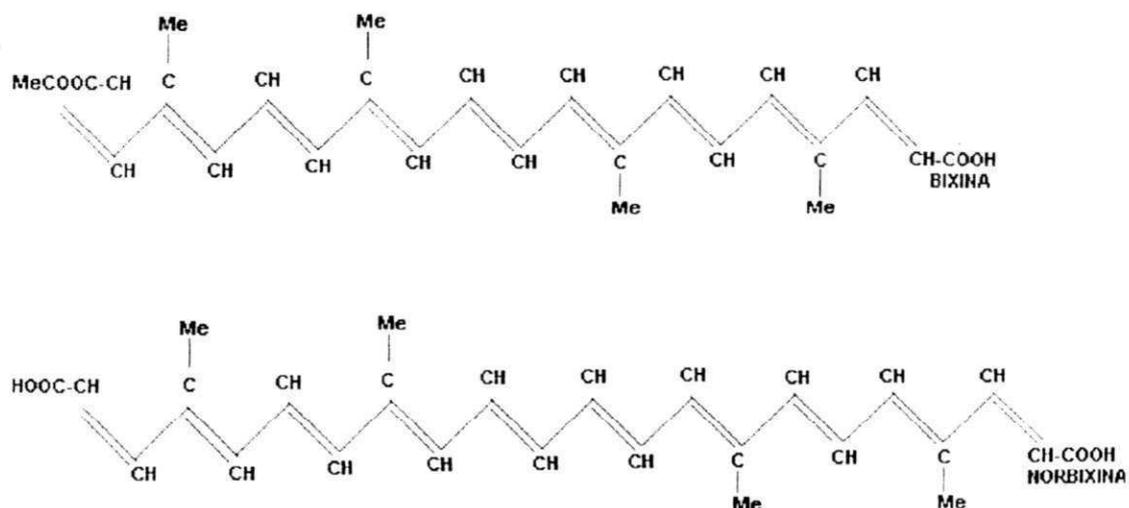
2.1 - Urucum

Entre as três principais características dos alimentos, ou seja, cor, textura e sabor, a cor se apresenta como o atributo mais marcante (Carvalho, 1992). Alguns alimentos apresentam aspectos desagradáveis ao consumidor, tornando necessário uma "maquiagem" que os tornem agradáveis à vista. Para cumprir essa finalidade, é necessário o emprego de corantes.

Inicialmente usado pelos índios para se protegerem dos raios solares e insetos, o princípio corante do urucum tem largo emprego nos dias atuais, principalmente nas indústrias alimentícias, de cosméticos e farmacológicas, em substituição aos corantes artificiais derivados do petróleo e considerados cancerígenos pela Organização Mundial de Saúde. O urucum produz uma coloração entre vermelho-sanguíneo e alaranjado (Guimarães, 1994).

Na semente de urucum, o pigmento de maior concentração é a bixina, cujo teor no grão varia de 1,6 a 5,3 % de acordo com a variedade, localização geográfica, clima e altitude (Carvalho, 1989). Outro corante encontrado no urucum é a norbixina. Estima-se que é a forma de corante mais usada no Brasil (Canto, 1989).

Na figura 2.1 se mostra a estrutura dos corantes, que, do ponto de vista químico, são classificados como carotenóides.



✱ Figura 2.1 - Fórmulas estruturais da bixina e da norbixina

A produção, praticamente extrativista, no mundo, começa a ceder espaço para a de lavouras racionais e com maiores teores de bixina. O mercado de sementes e produtos (extratos) de urucum a nível mundial, excluindo-se os mercados dos países produtores e também consumidores, como Brasil, Peru, Kenya, está avaliado em aproximadamente 9.000 t/ano (Ghiraldini, 1994). Na tabela 2.1 se mostra o consumo e a produção mundiais estimadas do urucum:

Tabela 2.1 - Consumo e produção mundiais de urucum ¹

Região / País	Consumo anual (t de sementes ou extrato em t de sementes equivalente)	Produção anual (t)
Estados Unidos	3.340	-
Reino Unido	1.100	-
França	830	-
Outros países da EEC	700	-
Países do leste Europeu	130	-
Japão	1.920	-
Canadá	215	-
Brasil	3.500	4.300
Peru	50	3.500
Kenya	20	2.800
Resto da América Latina	100	1.500
Resto do mundo	925	730

¹ Ghiraldini, 1994.

O Brasil tem se destacado como maior produtor mundial de urucum e seus derivados, com bom faturamento no mercado. No norte e nordeste brasileiros, o urucum é principalmente encontrado nos estados do Ceará, Paraíba, Piauí, Bahia e Pará. A Paraíba, maior produtor nacional até 1989, chegou a produzir cerca de 50% do total nacional, cuja produção vem caindo de -

vido à baixa qualidade das sementes (Mello & Lima, 1989) e por falta de uma política de apoio à cultura. Atualmente, o estado é o quarto produtor brasileiro (Freitas & Silva, 1994). Os municípios com as maiores produções no estado são Pirpirituba, Guarabira, Bananeiras, Belém, Borborema, quase todos localizados na região do Brejo Paraibano.

Oliveira (1989) cita em seu trabalho que o principal mercado para as sementes de urucum é na área de condimentos, para fabrico de calorífico, o que representa 75-80% do volume comercializado. Hoje, é considerado nobre o mercado de corantes líquidos, pastas e pós, que representa aproximadamente 15-20% do volume comercializado. A exigência básica é a qualidade da matéria prima para se ter um produto final adequado e competitivo no mercado nacional e mundial.

A secagem do urucum se faz necessária para permitir que a semente possa ser armazenada em boas condições, evitando-se o desenvolvimento de fungos e microorganismos. A secagem mecânica permite um melhor controle das condições de operação, além de evitar a exposição descontrolada à luz e ao calor, que é o que acontece na secagem natural, fatores que provocam a degradação dos seus corantes. A temperatura é uma das variáveis que deve ser mais controlada para garantir uma boa qualidade do produto final, ou seja, a perda de bixina deve ser mínima, as propriedades físicas e químicas devem ser mantidas, cheiro, cor e sabor devem ser próprios e os grãos não devem apresentar deformações. Por causa disso, a escolha de temperatura de operação deve resultar de uma otimização, levando em conta tanto a velocidade de secagem como uma possível degradação térmica.

Silva (1991) em seu trabalho, recomenda que a secagem de urucum, para que se mantenham suas características, deva ser feita com temperaturas de até 55°C e que temperaturas na faixa de de 50 a 55°C são as melhores para o trabalho.

2.2 - Secagem

A secagem é um dos mais importantes meios de preservação de grãos. Pela diminuição da atividade da água, a inibição da deterioração microbológica e bioquímica é atingida, fazendo com que a qualidade da semente seja mantida por longos períodos. O processo de secagem pode ser realizado naturalmente, simplesmente retardando a colheita ou expondo o material ao sol. Mas, para possibilitar um maior controle em relação ao teor de umidade e da qualidade final do produto, além de um melhor planejamento da colheita, devido à não dependência das condições meteorológicas, essa operação é efetuada com o auxílio de secadores mecânicos (Barrozo et al., 1994).

Em qualquer parte do mundo, de 3 a 6% do consumo nacional total de energia pode ser atribuída aos processos térmicos de desidratação (Mujumdar, 1986). Por causa disso, os projetos de secadores devem observar, além da preservação da qualidade do grão, a economia de energia.

Sabe-se que, além do conhecimento das reações de degradação que ocorrem no produto durante a secagem, o desenvolvimento de projetos de secadores eficientes requer um completo entendimento dos mecanismos de transferência simultânea de calor e massa envolvidos no processo. Infelizmente, não há uma concordância definitiva nos mecanismos de movimento da umidade interna em materiais biológicos e não há, comumente, modelos teóricos aceitáveis de transferência de calor e massa simultâneos que descrevam este fenômeno. O transporte de água do sólido é um processo complexo que apresentam vários mecanismos diferentes, que podem ocorrer simultaneamente e/ou variar durante o processo de secagem (Simal et al., 1994).

2.3 - Difusão na Secagem de Grãos

Os grãos raramente apresentam o período de secagem a taxa constante, a menos que os mesmos sejam colhidos imaturos ou sofram algum processo de umidificação excessiva (Silva, 1991). Dessa forma, sua secagem ocorre totalmente no período de taxa decrescente (Massarani et al., 1992), (Silva & Alsina, 1991), (Noomhorm & Verma, 1986). Daí a relevância dos mecanismos internos de transferência de umidade na análise do processo de secagem.

Lewis (1921), citado por Teixeira & Tobinaga (1995), foi um dos primeiros autores a interpretar o processo de secagem como um fenômeno difusivo com controle interno. Sherwood (1931) também assumiu que a difusão interna de líquido predomina nos mecanismos internos de transferência de umidade.

Luikov (1966) propôs um grande número de mecanismos físicos para descrever a transferência de umidade em produtos porosos, tais como os movimentos de líquido devido a forças de superfície, difusão líquida, difusão de superfície, difusão de vapor, difusão térmica, fluxo hidrodinâmico.

O modelo difusivo pode ser visto como uma simplificação do modelo de Luikov para a secagem de materiais capilares porosos (Barrozo et al., 1995). A equação teórica que descreve a difusão em fase líquida é conhecida como a 2ª Lei de Fick, cuja forma é:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D_{ef} \frac{\partial U}{\partial r} \right) \quad (2.1)$$

com condições limites:

$$\text{C.I. : } U_{(r,0)} = U_0 \quad (2.2)$$

$$\text{C.C.1: } \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (2.3)$$

$$\text{C.C. 2: } \left. U \right|_{r=R} = U_c \quad (2.4)$$

E com as seguintes hipóteses:

- a) A partícula é homogênea, isotrópica e esférica;
- b) Toda evaporação acontece na superfície da partícula;
- c) A temperatura e a distribuição de umidade são inicialmente uniformes e são simétricas durante o processo de secagem;
- d) A transferência de calor no interior da partícula é por condução e fora da partícula, por convecção;
- e) O encolhimento do grão durante a secagem é desprezível;
- f) A resistência externa à transferência de massa é desprezível;

No caso do urucum, a hipótese a) é apenas uma aproximação porque além de não ser homogênea, por estar constituída fundamentalmente por estruturas biológicas complexas (incluindo uma camada externa, rica em bixina), não é uma partícula esférica, como apresentado na tabela 4.1. Com relação à hipótese e), ainda não foi verificado efeito de encolhimento significativo no caso do urucum.

A solução analítica da equação 2.1 que satisfaz as condições limites acima é apresentada por Crank (1975):

$$U^* = \frac{\bar{U} - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left| \frac{-n^2 \pi^2 D_{ef} t}{R^2} \right| \quad (2.5)$$

Vários pesquisadores têm adotado essa teoria em seus trabalhos: Chu & Hustrulid (1968), Pabis & Henderson (1961), Santos et al. (1993), Souza et al. (1993), Yamaguchi (1992) etc.

2.4 - Secagem em Camada Delgada

Embora haja controversia - outros autores preferem o termo "leito diferencial" - será utilizado neste trabalho o termo "camada delgada" significando um leito fixo constituído de grãos, com espessura suficientemente pequena, de tal modo que o ar em condições constantes de umidade relativa, temperatura e fluxo mássico atravessa uma fina camada de material úmido. Como o tempo de residência do gás é muito curto, o equilíbrio térmico entre as fases pode ser considerada instantânea (Santos et al., 1993).

As equações de transferência de massa e calor podem ser escritas de duas maneiras: o material sólido é considerado como uma fase contínua e é descrito em termos de propriedades de volume como densidade específica, porosidade etc, ou as equações de balanço sendo descritas para um grão individual.

A equação 2.6, semi-empírica, proposta por Simmonds et al. (1953) e citada por Parti (1990), é uma analogia à lei de Newton de resfriamento, é conhecida como Lei Exponencial e assume que a taxa de secagem é proporcional à relação de umidade e o tempo de secagem:

$$U^* = \exp(-Kt) \quad (2.6)$$

Essa equação tem sido frequentemente usada para descrever as curvas de secagem de vários cereais. Parti (1990), em seu trabalho, afirma que as desvantagens da lei exponencial em não descrever o processo de secagem de forma acurada foram reconhecidas e grandes esforços têm sido feitos para corrigi-las.

O modelo exponencial de segunda ordem proposto por Thompson et al. (1968) para secagem de milho é apresentado na equação 2.7:

$$t = A \ln(U^*) + B(\ln(U^*))^2 \quad (2.7)$$

É um modelo empírico, com o tempo como variável dependente e a relação de umidade como variável independente. Este modelo tem sido extensivamente utilizado para descrever a cinética de secagem de outros grãos (Noohmord, 1986). Barrozo et al. (1994) apresenta algumas das principais equações empíricas e semi-empíricas utilizadas na literatura para descrever a cinética de secagem em grãos:

Modelo de Page (1949):

$$U^* = \exp(-Kt^n) \quad (2.8)$$

Modelo de Wang et al. (1978):

$$U^* = 1 + At + Bt^2 \quad (2.9)$$

A principal desvantagem dos modelos empíricos é que eles desprezam os fundamentos do processo de secagem (Parti, 1990).

Os modelos teóricos que usualmente assumem que ocorre difusão em fase líquida no interior do grão são descritos na equação 2.1. A concordância entre os perfis de umidades teóricos e experimentais não é satisfatória quando se utiliza essa equação (Chen & Pei, 1989).

Nenhuma das equações de secagem representa o processo de secagem de grãos em sua totalidade de forma acurada, desde a umidade inicial até a umidade de equilíbrio (Brooker et al., 1974).

Os modelos clássicos de secagem em camada fina não descrevem isoladamente os processos de transferências de calor e massa em camada espessa, uma vez que os balanços de massa e energia da fase gasosa não são considerados. Entretanto, estes estudos são indispensáveis na predição das equações para a taxa de secagem utilizadas na modelagem dos fenômenos de transferência em leitos de camada espessa (Barrozo et al., 1995).

É muito comum encontrar na literatura a cinética em camada fina representada pela equação 2.1. Nesta aproximação, considera-se que as pro-

priedades médias dos grãos são válidas para toda a camada fina, o que seria um elemento de volume dos leitos espessos.

2.5 - Difusividade Mássica Efetiva dos Grãos

O coeficiente D_{ef} que aparece na 2ª Lei de Fick (equação 2.1) é o tensor de difusividade de massa efetivo, que depende da textura do material (tortuosidade, distribuição de porosidade, anisotropia), da umidade contida e das condições experimentais (Bories, 1989). É considerado efetivo por levar em conta todos estes parâmetros (Simal et al., 1994). Além de incluir efeitos de outros solutos não determinados presentes no produto (Zorrila & Rubiolo, 1994).

É uma importante propriedade de transporte (Pinto & Tobinaga, 1993; Zorrila & Rubiolo, 1995), sendo útil na análise das operações de processamentos de produtos alimentícios como a secagem. Porém, devido à composição e à estrutura física dos alimentos, não são conseguidas estimativas precisas desta propriedade. É uma propriedade difícil de ser determinada experimentalmente e as soluções para as equações de transferência de massa são complicadas, requerendo um longo tempo e demanda de esforços. Por isso, o coeficiente de difusão é geralmente considerado constante. Esta simplificação pode ser usada com segurança em muitas situações práticas, mas este comportamento não é sempre observado em processos com forte anisotropia, em produtos que sofrem mudanças estruturais significativas e quando ocorrem interações entre solutos (Teixeira & Tobinaga, 1995).

Algumas tentativas têm sido feitas para estabelecer predições confiáveis nas taxas de secagem de alguns experimentos e determinar a difusividade mássica mais facilmente. Um dos métodos para determinar o coeficiente de difusão durante a secagem é comparando soluções numéricas, dadas

pela equação de difusão, com curvas de secagem experimental. Este método tem algumas desvantagens, como o uso de equações com parâmetros inadequados para descrever a relação funcional entre coeficiente de difusão e umidade, e se essa dependência pode ser escrita por modelos simples. Outra desvantagem é que o método não é muito exato (Ketelaars et al., 1995). Além disso, quando a difusividade varia substancialmente com a umidade, o método numérico para a resolução da equação 2.1 pode apresentar instabilidade (Crank, 1975). Uma das formas utilizadas pelos pesquisadores para a resolução desse problema é aplicando a transformada de Kirchhoff (equação 2.10) à umidade, na relação de dependência.

$$S = \int_0^{U^*} D(s) ds \quad (2.10)$$

A transformada de Kirchhoff de U^* é um operador que visa substituir um meio real, cuja difusividade é dependente da umidade, por um meio fictício, onde essa propriedade é mantida constante (Teixeira & Tobinaga, 1995).

2.6 - Umidade de Equilíbrio

Umidade de equilíbrio de um grão é definida como o conteúdo de umidade do material, depois de ter sido exposto a condições controladas de temperatura ambiente e umidade, por um período de tempo suficientemente longo. Na prática, toma-se um tempo no qual as variações do teor de umidade do grão são imperceptíveis, considerando-se atingido o equilíbrio.

A quantidade de água adsorvida ou desorvida pelo produto é controlada pela pressão de vapor de água do ar ambiente, pela temperatura do produto e outras características físicas do material. A relação entre pressão de

vapor e umidade de equilíbrio é descrita por curvas de equilíbrio higroscópico ou isotermas de equilíbrio.

Uma isoterma de adsorção é uma relação da umidade de equilíbrio com a umidade relativa a uma dada temperatura, para um produto exposto a um ambiente úmido. Uma curva de desorção é similar, só que o produto num ambiente seco. Em alguns materiais, o teor de umidade de equilíbrio é mais alto durante a desorção do que na adsorção, numa dada umidade relativa e temperatura. Esse fenômeno é chamado de histerese, implicando que a umidade de equilíbrio é também dependente da história do produto (Gustafson & Hall, 1974).

O estabelecimento de curvas de equilíbrio higroscópico é de grande interesse teórico e prático. Elas podem ser aplicadas para definir limites de desidratação de produtos, para estimar as trocas de umidade sob determinadas condições de temperatura e umidade relativa, para avaliar variáveis de processamento etc. (Rockland, (1979), citado por Silva, (1991)).

Comumente, dois métodos são usados para determinar as curvas de umidade de equilíbrio: o método estático e o método dinâmico. Experimentos para determinar a umidade de equilíbrio contida no grão, pelo método estático, usualmente requerem muitos dias para que um valor final de umidade seja obtido. No método estático, a umidade de equilíbrio entre o produto e o ar circundante é atingida sem movimentação do ar. No método dinâmico, o ar ou o grão é movimentado até que o equilíbrio seja atingido. Outros métodos estáticos rápidos têm sido desenvolvidos (Roa & Rossi, 1979). Além disso, tem sido crescente o uso de equipamentos como o Novacine e o Decagon, que permitem medir a atividade da água em poucos minutos (Alsina, 1996).

Diversos autores têm determinado essas curvas para vários produtos, utilizando um método ou outro para obtenção dos dados experimentais. Vários modelos matemáticos empíricos têm sido propostos, dentre eles:

1 - Modelo de Henderson - Thompson:

$$1 - \phi = \exp(-a_1(T + a_2)) U_{cq}^{a_3} \quad (2.11)$$

2 - Modelo de Roa :

$$U_{cq} = (p_1\phi + p_2\phi^2 + p_3\phi^3) \exp((q_0 + q_1\phi + q_2\phi^2 + q_3\phi^3 + q_4\phi^4) \times (T + q_5)) \quad (2.12)$$

3 - Modelo de Chung - Pfof :

$$\ln \phi = \frac{-a_1}{R(T + a_2)} \exp(-a_3 U_{cq}) \quad (2.13)$$

4 - Modelo de Hankins e Jura :

$$\ln \phi = a_2 - \frac{a_1}{U_{cq}^2} \quad (2.14)$$

5 - Modelo de Smith:

$$U_{cq} = a_1 - a_2 \ln(1 - \phi) \quad (2.15)$$

Nenhum modelo teórico ou empírico foi ainda capaz de atingir a precisão necessária, para todos os produtos, e cobrir largas faixas de variação de umidade relativa e de temperatura do ar.

2.7 - Condutividade Térmica

No projeto de equipamentos de transferência de calor, é necessário o conhecimento das propriedades térmicas dos produtos envolvidos. O valor da condutividade térmica é um parâmetro fundamental para qualquer processo térmico, tanto no que diz respeito ao dimensionamento de equipamentos, sua otimização e conservação de energia, quanto à caracterização de substâncias. Se constitui numa importante propriedade de transporte (Pietrobon et al., 1987) e é fortemente dependente da água contida no material (Sweat & Haugh, 1974).

A determinação de propriedades térmicas apresenta grandes dificuldades (Silva & Alsina, 1995). Os métodos existentes podem ser divididos em dois grupos: os de regime permanente, onde o fluxo de calor que passa através do corpo permanece constante em magnitude e direção e o campo de temperatura é estacionário, e os de regime transitório. No regime permanente, Gubulin (1984) estudou a condutividade térmica aparente para materiais sólidos como arenito, calcáreo, brita. Silva & Alsina (1987) determinaram a condutividade térmica na estagnação para o sistema ar/feijão pelo método de perfil radial em regime permanente. São experimentos com longa duração e feitos com aparelhos de medida muito complexos (Luikov, 1966). Pela simplificação experimental, muitos experimentos são realizados em regime transitório, den-

tre os quais citam-se os trabalhos de Silva & Alsina (1995), Corrêa & Freire (1987), Pietrobon et al. (1987) etc.

Neste trabalho, foram realizados experimentos no regime transitório, em que há aquecimento do material. Foi considerado que a transferência de calor se dá em uma fase pseudo-homogênea, ou seja, que a fase sólida e a fase fluida são uma única pseudo-fase e que as temperaturas de ambas as fases são iguais. O valor da condutividade térmica estimado é considerado efetivo entre o sólido e o fluido (Freire & Gubulin, 1986).

Em geometria cilíndrica, considerando fluxo de calor apenas na direção radial e desprezando-se a resistência térmica do material que constitui a célula de medida, o balanço de energia em regime transitório é dado por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.16)$$

cujas condições inicial e de contorno são:

$$\text{C.I. : } T_{(r,0)} = T_0 \quad (2.17)$$

$$\text{C.C.1: } - \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (2.18)$$

$$\text{C.C.2: } -K \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = h(T(R,t) - T_\infty) \quad (2.19)$$

A solução, mostrada em Luikov (1966), para essas condições limites é:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 J_1(\mu_n) \cdot J_0(\mu_n \cdot r/R)}{\mu_n (J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n))} \exp \left| \frac{-\mu_n^2 \alpha t}{R^2} \right| \quad (2.20)$$

Que pode ser ainda representada como:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot J_0(\mu_n \cdot r/R) \exp \left| \frac{-\mu_n^2 \alpha t}{R^2} \right| \quad (2.21)$$

O valor da raiz característica sucessiva μ_i , mostrado em tabelas por Luikov (1966), é sempre maior do que o valor que a precede, isto é:

$$\mu_1 < \mu_2 < \mu_3 < \dots < \mu_n$$

Observando que μ_n^2 é um expoente da curva exponencial, o valor da série descrita na equação 2.16, para tempo suficientemente longo, será pequeno em comparação com o valor do primeiro termo. Por causa disso, a estimativa do valor da condutividade térmica, tomando-se só esse primeiro termo da equação 2.16, não apresentará erros consideráveis, podendo ser escrita:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = A_1 \cdot J_0(\mu_1 \cdot r/R) \exp \left| \frac{-\mu_1^2 \alpha t}{R^2} \right| \quad (2.22)$$

A mudança de temperatura com o tempo será descrita por uma curva exponencial simples e se diz que se desenvolve o regime regular.

2.7.1 - Processo de Aquecimento de um Corpo

Luikov (1966), em seu trabalho, afirma que todos os processos de aquecimento podem ser divididos em 3 estágios. Os dois primeiros estágios estão representadas na figura 2.2, onde estão graficados $\ln T^* = f(t)$, para o centro e para a superfície do corpo.

O primeiro estágio é caracterizado pelo fato de que a distribuição inicial de temperatura compreende um importante período. Cada irregularidade na distribuição inicial será refletida na distribuição de temperatura nos instantes seguintes. A relação entre T^* e o tempo t é descrita pela série mostrada na equação 2.20. As camadas mais próximas à superfície são aquecidas mais rapidamente do que aquelas próximas ao centro e, por essa razão, nesse estágio, a curva que representa o aquecimento do centro do corpo tem concavidade voltada para baixo na figura 2.2. A curva da superfície apresenta concavidade para cima, no mesmo gráfico.

O segundo estágio é conhecido como regime regular. A relação entre T^* e t é descrita por uma curva exponencial simples e que na figura 2.2 aparece como linha reta.

O terceiro estágio corresponde ao estado estacionário ($Fo \rightarrow \infty$) em que a temperatura de todos os pontos do corpo é igual à do meio de aquecimento.

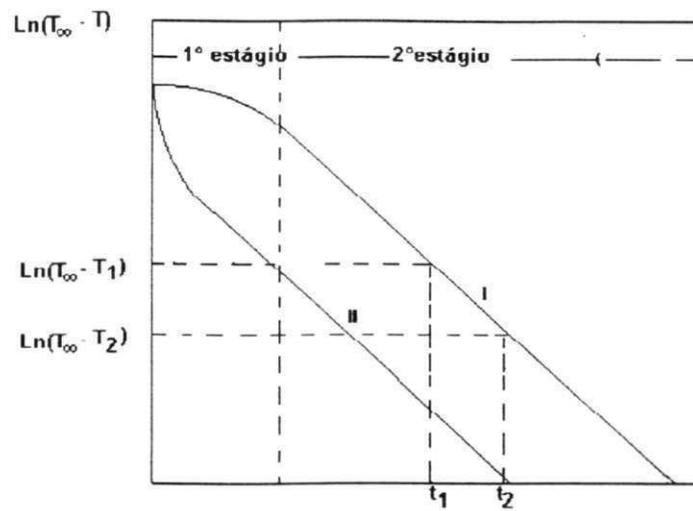


Figura 2.2 - Mudança de temperatura no centro (curva I) e na superfície(curva II), em relação ao tempo, no processo de aquecimento de um corpo (Luikov, 1966).

CAPÍTULO III

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.1 - Secador de Leite Fixo

A câmara de secagem, como mostra a figura 3.1, consiste de uma coluna cilíndrica de 17,80 cm de diâmetro e 60 cm de altura. Possui uma seção transversal tronco-cônica que funciona como um distribuidor de ar, onde são colocadas esferas de vidro, para permitir que o ar de secagem seja uniforme em todo o leito. A coluna é isolada termicamente com uma camada de amianto de 1,5 cm de espessura. Nas suas laterais existem furos onde são colocados termopares, para medição das temperaturas de bulbo seco do ar anterior e posterior ao leito. No fundo da seção cônica está inserido um outro termopar, que serve para enviar sinal para o controlador de temperatura do ar de secagem. Todas as medições de temperatura são lidas em um milivoltímetro e são distingüidas por meio de uma chave seletora.

3.2 - Equipamentos Auxiliares na Secagem

Um esquema da aparelhagem utilizada no processo de secagem é mostrado nas figuras 3.2 e 3.3. Consiste de um compressor radial, rotâmetro, aquecedor de ar elétrico, chaves seletoras para termopares, controlador de temperatura e um milivoltímetro como auxiliar nas medições de temperatura.



Figura 3.1- Secador de leito fixo

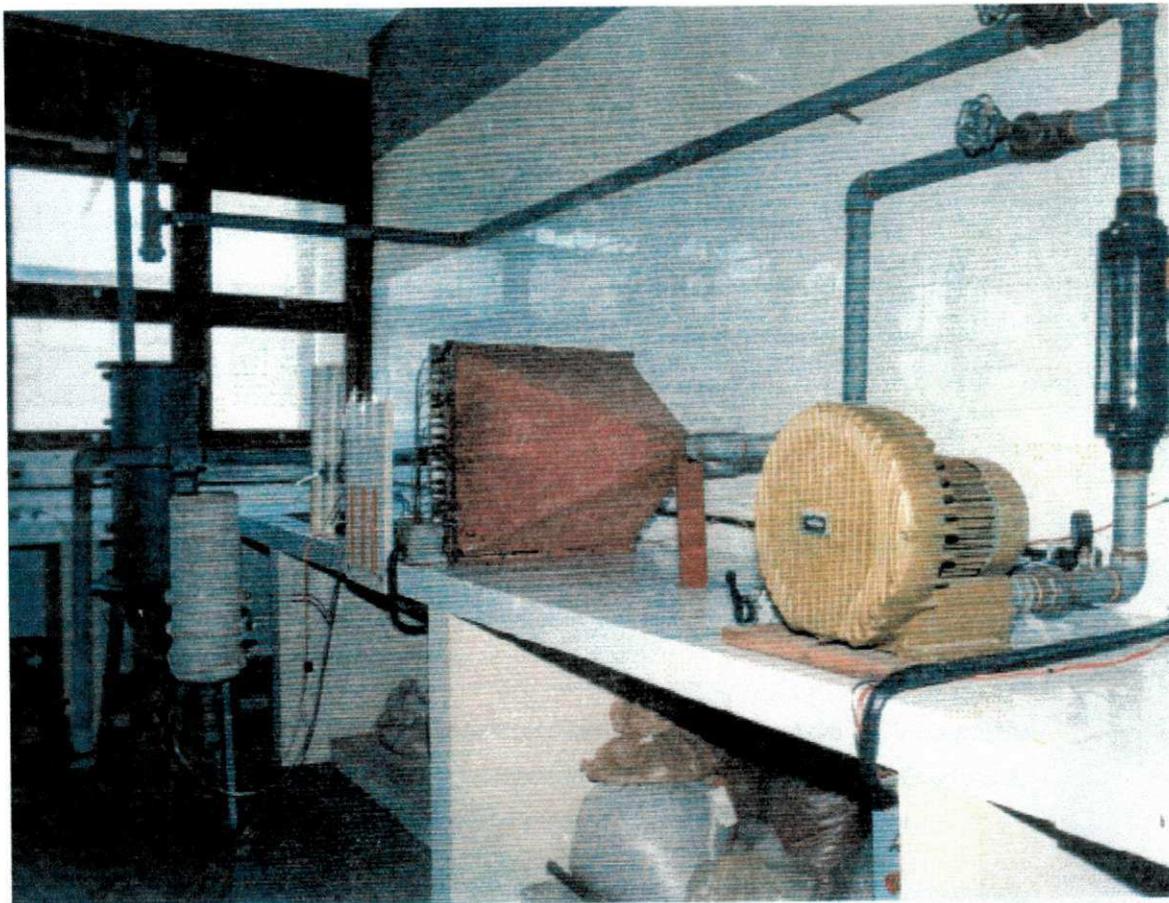


Figura 3.2 - Equipamentos auxiliares da secagem

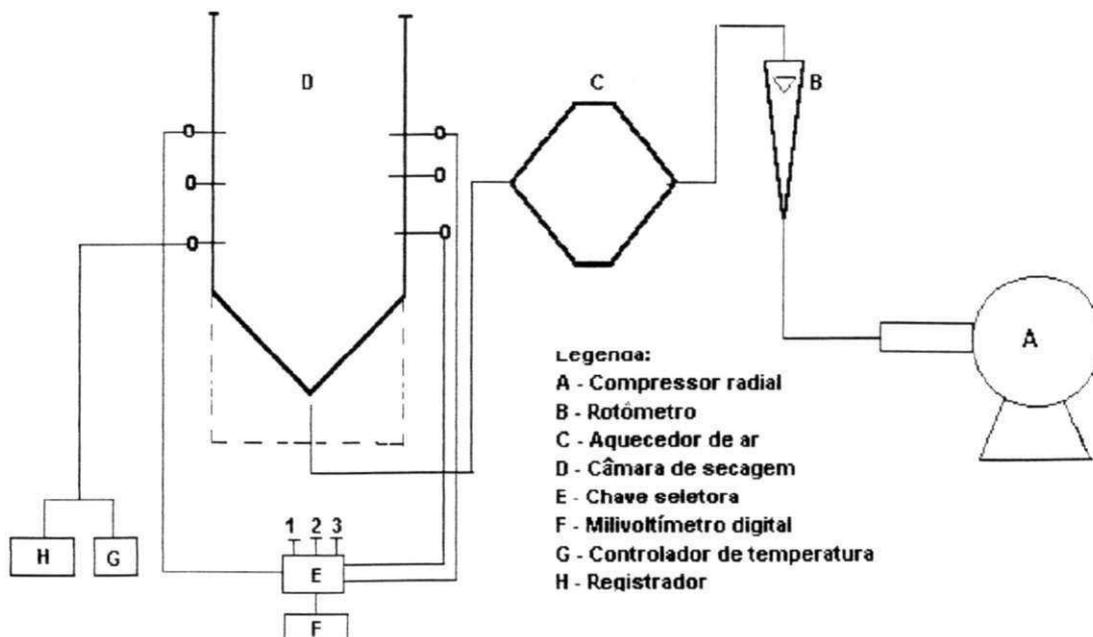


Figura 3.3 - Esquema dos equipamentos auxiliares da secagem

A descrição destes equipamentos e de outros utilizados durante a secagem encontra-se abaixo:

- 1-Compressor Radial: Eberle, motor assíncrono trifásico com 4 CV de potência e 2929 RPM. O motor foi fabricado pela Metalúrgica Abramo Eberle S.A. - Caxias do Sul - RS. Função: Fornecer fluxo de ar para o secador.
- 2-Aquecedor de ar: Composto de nove resistências elétricas, 22,5 kw instalados. Tipo RM2560-9 fabricado pela PALLEY. No presente trabalho, devido às temperaturas moderadas utilizadas, apenas tres resistências foram suficientes.
- 3-Rotâmetro: Tipo R2-V.C. HASTE, com fundo de escala de 400 m³ /h, fabricado pela OMEL S.A.. Função: Medir a vazão de ar para o secador.

4-Controlador de temperatura On-Off : Tipo P300, fabricado pela EURO-CONTROL; opera entre 20-200°C.

5-Milivoltímetro: Tipo MD-045, fabricado pela Equipamentos Científicos do Brasil. Função: Medição do sinal elétrico emitido pelos termopares.

6-Termopares: Elementos de medida das temperaturas no secador; tipo Ferro-Constantan.

8-Estufa de Secagem e Esterilização: Modelo 315-SE fabricado pela FANEM. Usada na obtenção do peso seco das amostras de urucum.

9-Cronômetro, marca GALLENKAMP - Suíça.

10-Balança METTLER, tipo PC 440, capacidade de 440 gramas e precisão de leitura de 0,001g. Fabricada pela Mettler Instrument AG - Suíça.

11-Higrômetro/termômetro digital, modelo HT-3003, fabricado pela LUTRON. Serve para medir a temperatura e a umidade relativa do ambiente com precisão de 0,1 %.

3.3 - Célula de Medida da Condutividade

A célula de medida de condutividade (figura 3.4) foi desenvolvida pelo Laboratório de Transferência em Meios Porosos e Particulados do DEQ/CCT - Campus II- UFPb . Consiste de um cilindro de alumínio, com diâmetro de 6 cm e altura de 24.7 cm, com espessura de parede suficientemente fina, de tal modo que se possa desprezar a resistência térmica da mesma. As extremidades são fechadas com borrachas isolantes. Numa das extremidades a borracha apresenta dois orifícios: um no centro e outro na metade do raio, para inserção dos termopares de ferro-constantan. A célula de medida possui ainda alças de sustentação que permitem sua introdução na câmara de secagem para obtenção dos dados experimentais. O material é introduzido na célula sem compactação. O sistema utilizado para a medida de condutividade é mostrada na figura 3.4.

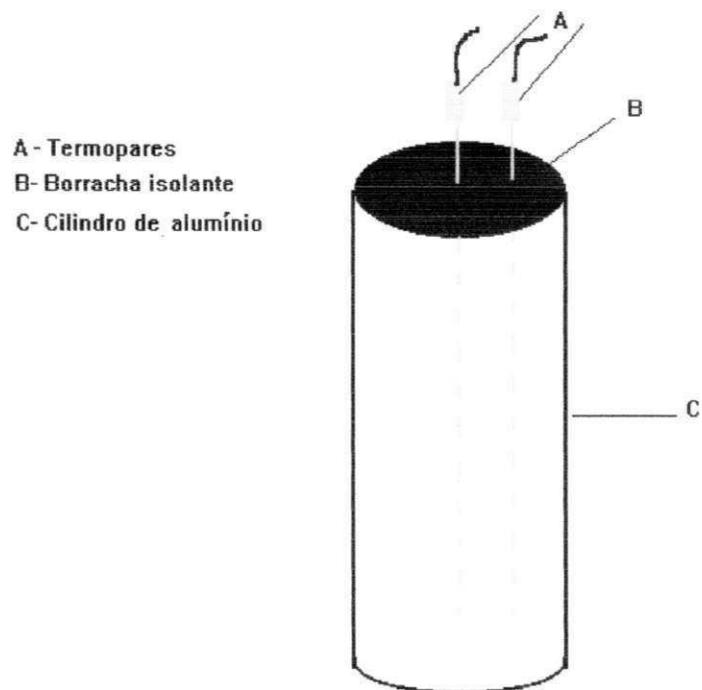


Figura 3.4 - Célula de medida de condutividade

CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - Materiais Utilizados

O material utilizado para o estudo da secagem em camada fina, em leito fixo, foi o urucum da região nordeste. A umidade inicial do grão natural estava na faixa de 12% a 22,0%. As propriedades físicas dos grãos estão representadas na tabela 4.1. Os dados de densidade, esfericidade, porosidade, capacidade calorífica e diâmetro médio do grão foram obtidos por Silva, 1991.

Tabela 4.1 - Propriedades físicas de grãos de urucum.

PROPRIEDADE	VALOR	MÉTODO DE DETERMINAÇÃO
Esfericidade, φ (%)	69,7	-
Densidade do sólido, ρ_s (g/cm ³)	1,487	Picnometria de comparação a ar
Diâmetro, D_p (cm)	0,346	Esfera de igual volume
Capacidade calorífica, C_{p_s} (cal/g°C)	0,513	Misturas calorimétricas
Porosidade do leito, ε (%)	55,0	Picnometria de comparação a ar

Fonte: Silva (1991)

4.2 - Métodos Experimentais

4.2.1 - Determinação do Teor de Umidade

As curvas de secagem deste trabalho utilizavam as umidades em base seca (g de água/g de sólido seco), e para se determinar as umidades iniciais do produto, duas amostras do material eram retiradas antes de cada corrida de secagem.

As amostras retiradas eram pesadas numa balança Mettler PC40 com precisão de leitura de 0,001 g. Dessa forma eram obtidos os pesos iniciais, W_i . Após isso, as amostras eram colocadas numa estufa durante 24 horas, numa temperatura de +/- 105°C. Novas pesagens eram realizadas e daí se obtinham os pesos finais, W_f .

As umidades na base seca foram calculadas de acordo com a fórmula abaixo:

$$W_{BS} = \frac{W_i - W_f}{W_f} \quad (4.1)$$

4.2.2- Determinação da umidade de equilíbrio dinâmica

No presente trabalho se determinou a umidade de equilíbrio pelo método dinâmico, obtidas a partir da secagem de urucum em camada fina, em leito fixo.

As amostras eram colocadas numa cestinha de material metálico, pesadas inicialmente e postas no secador a temperatura e vazão do ar controladas. Em cima do material na cestinha era colocada uma tela, para evitar perda de material durante a secagem. De tempos em tempos, a cestinha era

retirada do secador e feita a pesagem das amostras rapidamente. A cestinha era recolocada no secador imediatamente após a pesagem, para que não houvesse adsorção de umidade pelo grão. Este procedimento não requeria mais que 30 segundos e era repetido até que a massa das amostras não mais se modificava, o que significava que a umidade de equilíbrio havia sido atingida, para aquelas condições de umidade relativa e temperatura do ar de secagem. Após ser atingido o equilíbrio, amostras eram retiradas do material seco e colocadas na estufa para se determinar o teor de umidade na amostra.

4.2.3 - Determinação das umidades relativa e absoluta do ar de secagem

Durante os experimentos de secagem eram medidas as temperaturas ambiente e do ar de secagem, além da umidade relativa do ambiente. A temperatura e a umidade relativa do ambiente foram medidas através de um higrômetro e termômetro digital. A temperatura do ar de secagem foi medida a partir de termopares inseridos no secador. Esses termopares mandam sinais para um milivoltímetro. Com esses dados se pôde determinar as umidades relativas do ar de secagem, através de programas computacionais de determinação de propriedades psicrométricas (Silva, 1991)

4.2.4 - Obtenção dos dados experimentais das curvas de secagem

Para a determinação das curvas de secagem e da umidade de equilíbrio, os dados experimentais foram obtidos conforme o seguinte procedimento:

- 1- Determinação da umidade inicial do grão pelo método descrito no item 4.2.1.

2 - Pesagem da amostra para secagem, considerando que esta deva ser feita em camada fina.

3 - Ajuste da vazão e temperatura do ar desejadas para a secagem.

4 - O compressor e o aquecedor são ligados . A temperatura do ar de secagem deverá estar estabilizada para se iniciar a secagem.

5 - Colocação da cestinha com a amostra já pesada na câmara de secagem. Aciona-se o cronômetro.

6 - Em intervalos regulares, a cestinha é retirada do secador , pesada e recolada na câmara de secagem rapidamente. São registradas as temperaturas do ar na entrada e saída do leito. Esse procedimento é repetido até que o tempo de secagem desejado tenha sido atingido, o que significa que não haverá variação de massa na amostra muito significativa.

7 - Após o fim da secagem, retira-se amostras que são colocadas na estufa para determinação do teor de umidade final, como já foi descrito no item 4.2.1.

As pesagens foram feitas com precisão de leitura de 0,001 g. O peso seco foi determinado pela fórmula:

$$W_r = \frac{W_i}{1 + U_i} \quad (4.2)$$

O cálculo da evolução da umidade com o tempo foi determinado pela equação 4.1.

4.2.5 - Determinação da difusividade e condutividade térmica

O sistema utilizado para obtenção dos dados de aquecimento de urucum para cálculo da condutividade é mostrado na figura 3.4. A célula de medida descrita na figura 3.3 é enchida com grãos de urucum após a inserção dos termopares na posição central e na metade do raio, tomando-se cuidado para que estes não saiam de suas posições. Após a estabilização da temperatura do ar de aquecimento, a célula de medida é inserida cuidadosamente na coluna de aquecimento e de tempos e tempos são lidas as temperaturas dos dois termopares, para construção do gráfico de evolução da temperatura no tempo, como mostrada na figura 2.2.

Para obtenção dos valores da condutividade térmica foram seguidas as seguintes etapas:

1 - Construção do gráfico ($\ln T^*$ versus t), e aplicação de regressão linear dos pontos para ambas as curvas do gráfico na região de regime regular.

2- Observando a equação 2.17, temos:

$$\frac{-\mu^2 \cdot \alpha}{R^2} = \text{inclinação} \quad (4.3)$$

$$\ln (A_1 \cdot J_0(\mu_1 \cdot r/R)) = \text{intersecção} \quad (4.4)$$

2.1 - Quando $r/R = 0$, ou seja, a medida no centro da célula, temos:

$$\ln A_1 = \text{intersecção} \quad (4.5)$$

2.1.a- Com o valor de A_1 , a partir das raízes características tabeladas por Luikov (1966), calcula-se Bi_1 e daí se encontra μ_1 .

2.1.b- Com o valor de μ_1 , encontra-se a partir da equação 4.3, o valor da difusividade térmica aparente α_1 .

2.1.c- Sabendo-se que :

$$\alpha_1 = \frac{K_{a1}}{\rho_a C_{p_a}} \quad (4.6)$$

se pôde calcular a condutividade térmica efetiva K_{a1} entre o meio sólido e o fluido.

Para cálculo das condutividades térmicas aparentes, foram utilizados os valores de capacidade calorífica e densidade aparentes correlacionadas pelas seguintes fórmulas, respectivamente:

$$C_{p_a} = \varepsilon C_{p_f} + (1-\varepsilon)C_{p_s} \quad (4.7)$$

$$\rho_a = \varepsilon \rho_f + (1-\varepsilon)\rho_s \quad (4.8)$$

2.2 - quando $r/R = 0.5$, ou seja, a medida de temperatura se dá na metade do raio da célula, a obtenção de A_1 e conseqüentemente μ_1 se faz de forma iterativa, de tal modo que a diferença dos valores de μ_1 proposto e calculado seja menor que uma tolerância pré-fixada. A partir daí, se calcula α_2 e K_{a2} como descrito nos itens 2.1.b e 2.1.c.

Essas etapas podem ser resumidas no algoritmo proposto por Silva e Alsina (1995), apresentado na figura 4.1:

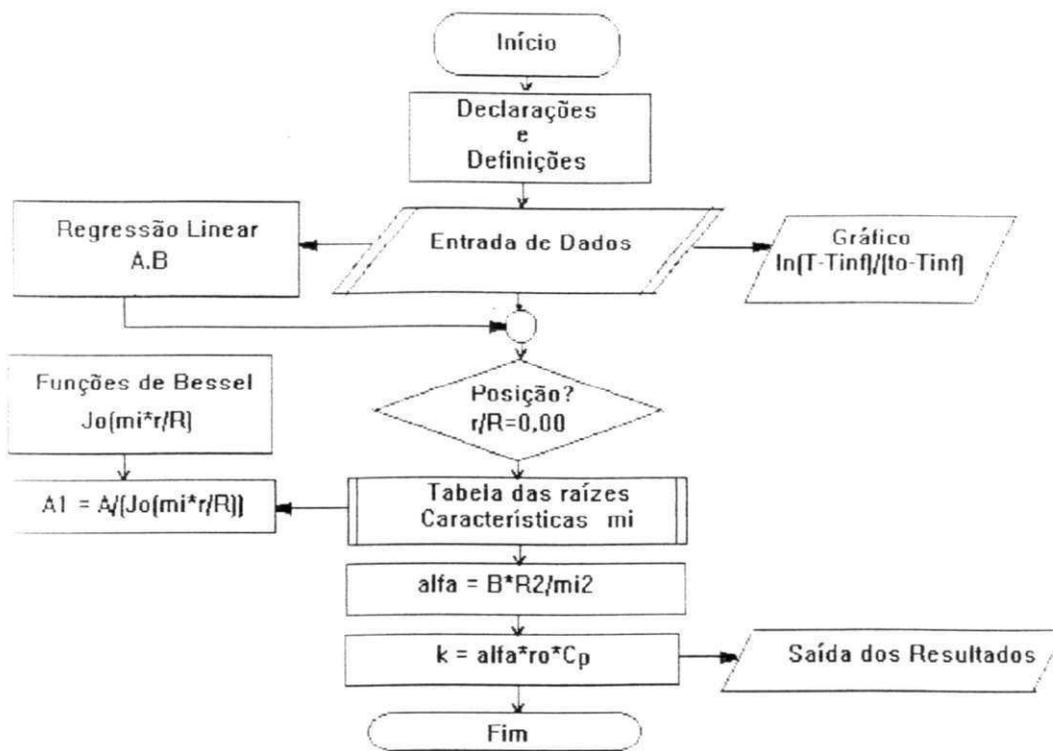


Figura 4.1 - Algoritmo para determinação da condutividade térmica

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A secagem em camada fina em leito fixo foi estudada nesse trabalho, com o objetivo principal de caracterizar o urucum quanto às propriedades de transporte, tais como: difusividade térmica aparente, difusividade mássica aparente e condutividade térmica efetiva. Além disso, foi verificado o efeito das variáveis operacionais como temperatura e vazão do ar e umidade inicial nas curvas de cinética de secagem.

5.1 - Umidade de Equilíbrio

As umidades de equilíbrio utilizadas neste trabalho, foram ajustadas pela equação de Roa (equação 2.12). Foram usados dados de higroscopicidade do urucum de Silva (1991), Lima (1993) e Queiroz et al. (1990), todos pelo método estático e alguns dados de umidade pelo método dinâmico, descrito na seção 4.2.2, nas temperaturas de 45°C a 83°C. Os valores dos parâmetros da equação 2.12 estão na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores dos parâmetros do ajuste da equação de ROA para urucum.

Parâmetro	p_1 $\cdot 10^9$	$p_2 \cdot 10^9$	$p_3 \cdot 10^9$	$q_0 \cdot 10^{-2}$	$q_1 \cdot 10^{-2}$	$q_2 \cdot 10^{-3}$	$q_3 \cdot 10^{-3}$	$q_4 \cdot 10^{-3}$	$q_5 \cdot 10^{-4}$
Valor	0,26	-0,894	0,771	0,152	-0,185	0,899	-0,159	0,127	1,649

O ajuste apresentou desvio padrão de 0,01 e erro médio de 16%, que pode ser justificado pelas diferenças nos lotes de grãos de urucum e nos métodos utilizados. Quando se tentou ajustar dados de higroscopicidade nas temperaturas de 15 , 30 e 40°C, o erro médio foi de 62%, o que nos levou a desconsiderá-las, uma vez que as temperaturas de secagem utilizadas neste trabalho foram acima de 50°C.

5.2 - Cinética de Secagem

5.2.1 - Reprodutibilidade dos Dados Experimentais

Para verificação da reprodutibilidade das medidas experimentais, foram feitas três experiências, cujo gráfico de U^* versus o tempo se apresenta na figura 5.1. As corridas foram realizadas com grãos do mesmo lote. A temperatura de secagem foi de 65°C e a vazão de 190 m³/h.

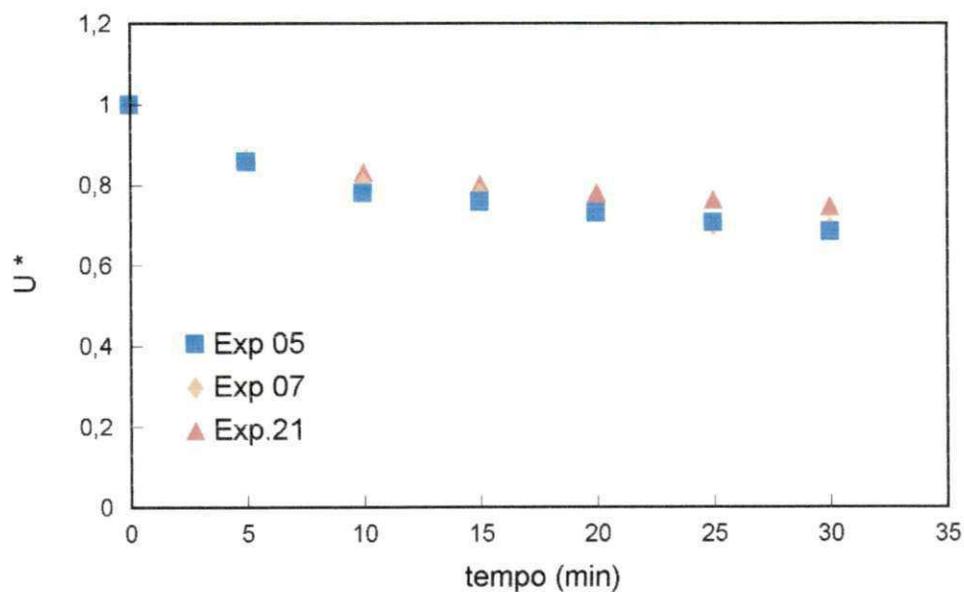


Figura 5.1 - Gráfico de reprodutibilidade das medidas experimentais

Pode-se observar, que houve boa reprodutibilidade dos dados, uma vez que todas as curvas se sobrepõem, levando a concluir que os dados experimentais são confiáveis.

5.2.2 - Efeito das Variáveis Operacionais sobre as Curvas de Secagem

As experiências na secagem em camada fina foram feitas variando-se as condições operacionais. A temperatura de entrada do ar variou de 54 a 82°C, a umidade inicial de 12 a 22% e a vazão do ar de 50 a 220 m³ /h, o que corresponde a velocidades de 0,55 a 2,4 m /s.

O comportamento das curvas de cinética de secagem de urucum é mostrado nas figuras 5.1 a 5.4. Observa-se que a evolução da umidade do urucum quando exposto ao ar de secagem foi predominantemente à taxa decrescente, uma vez que a taxa de secagem diminui com o tempo. Essa observação está de acordo com outros autores, como Massarani et al. (1992), Silva (1991) e Silva & Alsina (1991), que, na secagem de urucum, não encontraram o período de taxa constante.

5.2.3 - Efeito da Vazão do Ar de Secagem

As figuras 5.2a e 5.2b mostram as representações para as curvas de secagem em experimentos com as mesmas temperaturas (76°C e 65°C, respectivamente) e diferentes vazões do ar de secagem.

Nas figuras se observa que as vazões de ar não exercem influência na taxa de secagem dentro da faixa experimental utilizada que foi de 50 m³/h até 190 m³ /h, uma vez que as curvas são coincidentes. Dessa forma, pode-se concluir que o controle de transferência de massa é

predominantemente difusional interno, ou seja, a resistência externa à transferência de massa é desprezível.

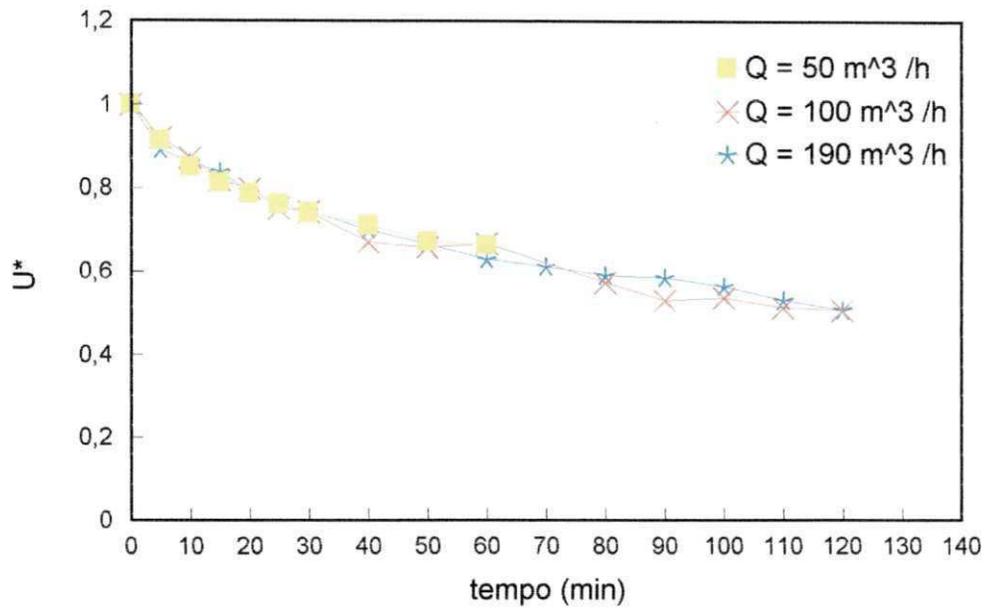


Figura 5.2a - Avaliação da influência da vazão na curva de cinética de secagem - Temp. 76°C

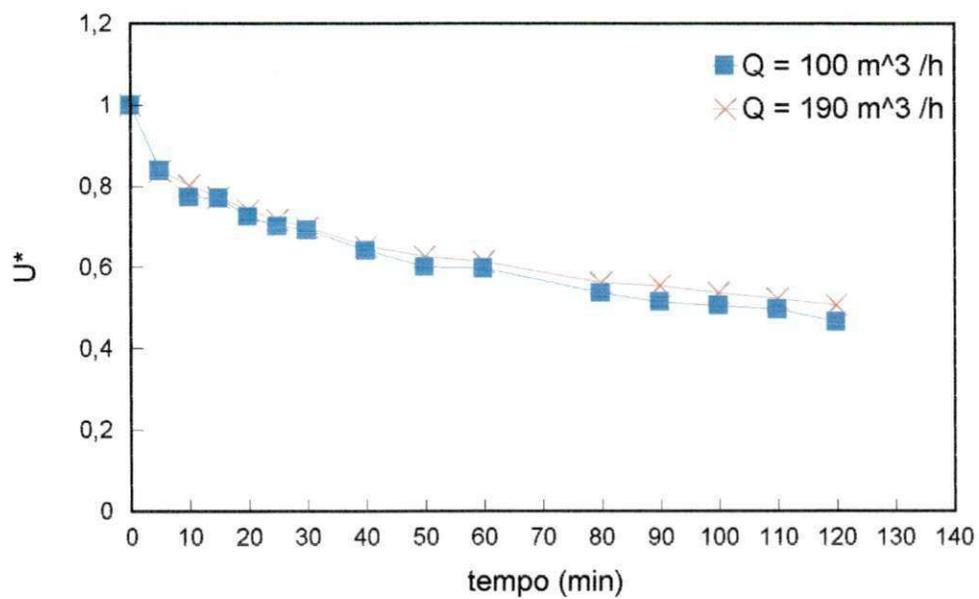


Figura 5.2b - Avaliação da influência da vazão na curva de cinética de secagem - Temp. 65°C

5.2.4 - Influência da Umidade Inicial

Com o objetivo de se estudar qual o efeito da umidade inicial nas curvas de secagem, foram realizados três experimentos, na temperatura de 65°C, com umidades iniciais que variaram de 12% a 22% b.s.. As curvas são mostradas na figura 5.3.

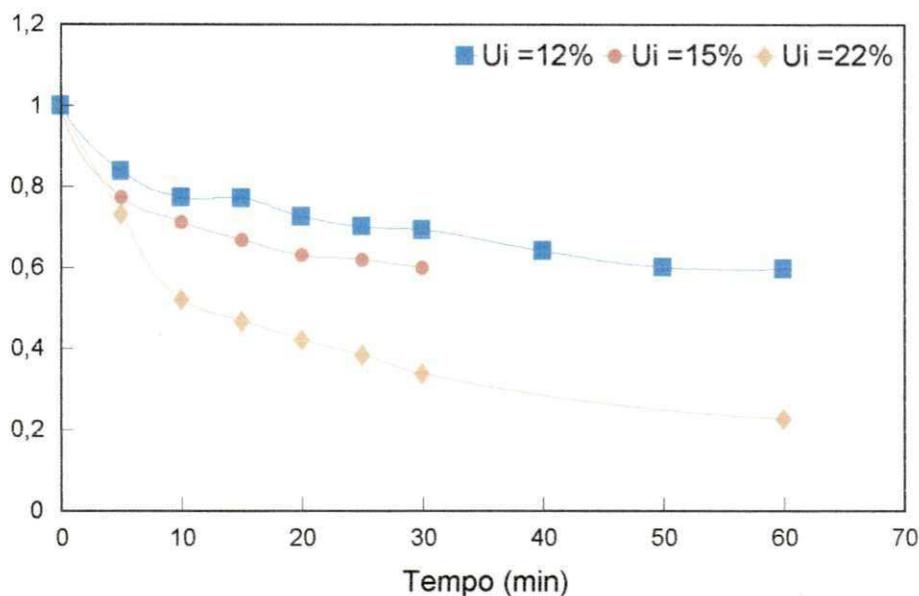


Figura 5.3 - Influência da umidade inicial nas curvas de secagem.

Quanto maior a umidade inicial do grão maior é a taxa de secagem. Isto pode dever-se ao fato de haver maior quantidade de água fracamente ligada à matriz sólida do grão ou ao efeito da concentração de água no sólido sobre o coeficiente de difusão efetivo. Resultado parecido foi mostrado por Silva (1991).

5.2.5- Influência da Temperatura do Ar de Secagem

Nas figuras 5.4a e 5.4b são mostrados os resultados obtidos dos experimentos quando realizados com a mesma umidade inicial, mas em temperaturas diferentes. Para a umidade inicial de 15% b.s., são mostrados

experimentos com temperaturas de 60°C, 70°C e 82°C, e, na umidade inicial de 16% b.s., experimentos realizados com temperaturas de 54°C e 76°C.

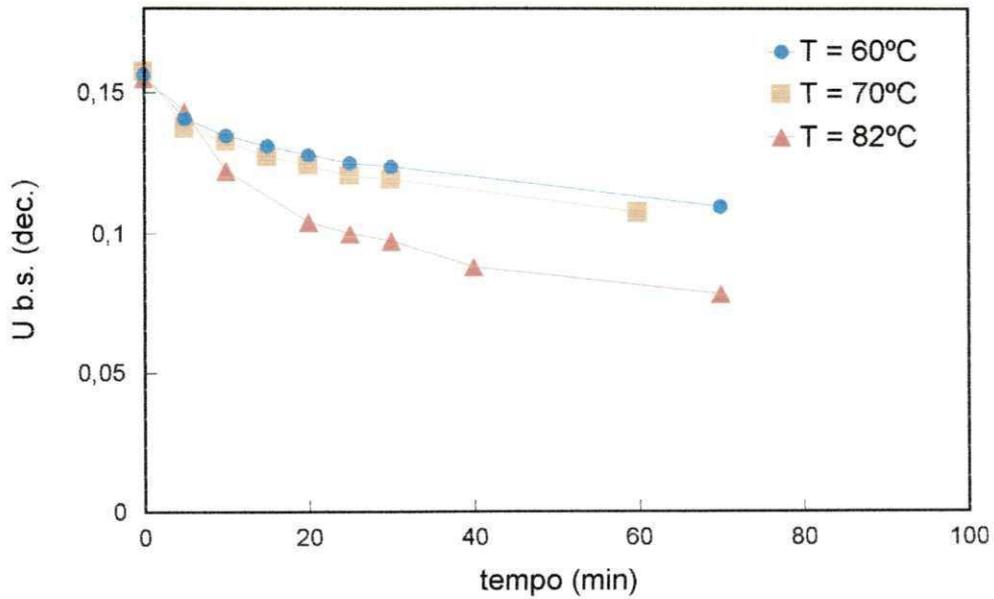


Figura 5.4a - Influência da temperatura do ar nas curvas de secagem - $U_i = 15\%$ b.s

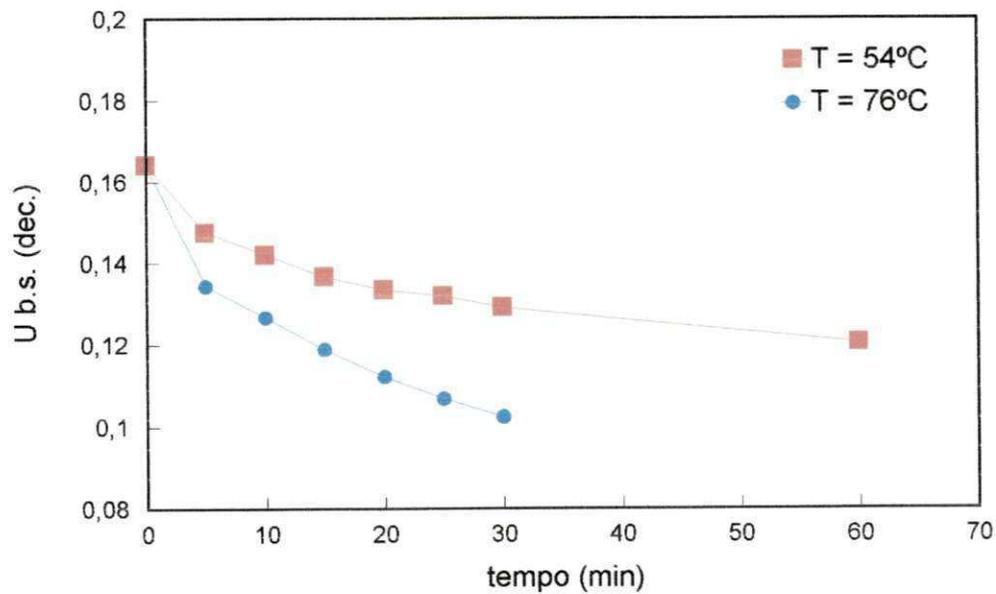


Figura 5.4b - Influência da temperatura do ar nas curvas de secagem - $U_i = 16\%$ b.s

O que se pode verificar é que a temperatura tem uma grande influência na taxa de secagem. Quanto maior a temperatura, maior a taxa de evaporação da umidade. Como referenciado na seção 2.1, a temperatura é um parâmetro que deve ser bem controlado para garantir uma boa qualidade do produto final.

5.3 - Condutividade Térmica

Foram realizadas experiências na célula de condutividade nas temperaturas de 65°C, 75°C e 80°C, para determinação da condutividade térmica efetiva do urucum. A vazão do ar de aquecimento na coluna foi de 200 m³/h em todos os ensaios.

Para cálculo da condutividade, foram feitos gráficos de Ln de T* versus tempo como mostra a figura 5.5 para o experimento 01. Para os outros experimentos, as figuras estão no apêndice II.

Tanto as curvas para as temperaturas medidas no centro como as medidas tomadas na metade do raio estão de acordo com a figura genérica mostrada na seção 2.7.1, apresentando uma região de regime regular bem definida.

A figura 5.6 mostra resultados do ajuste por regressão linear na região do regime regular para o caso mostrado na figura 5.5. Nela, podemos constatar um bom ajuste do modelo, com coeficiente de correlação 0,99 e desvios padrões menores que 0,2.

As curvas obtidas para as outras temperaturas apresentaram comportamento semelhante. De acordo com o método de identificação

paramétrica de trabalho descrito no item 4.2.5, foi determinada a condutividade térmica efetiva do urucum.

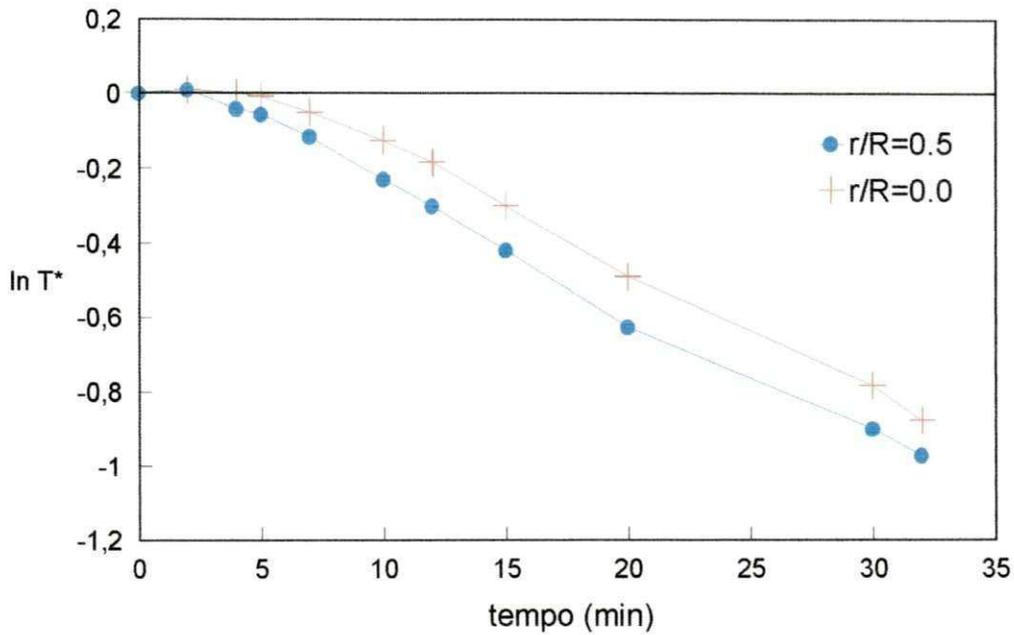


Figura 5.5 - Evolução da temperatura de aquecimento do urucum
- Exp. 01 ($T_\infty = 80^\circ\text{C}$)

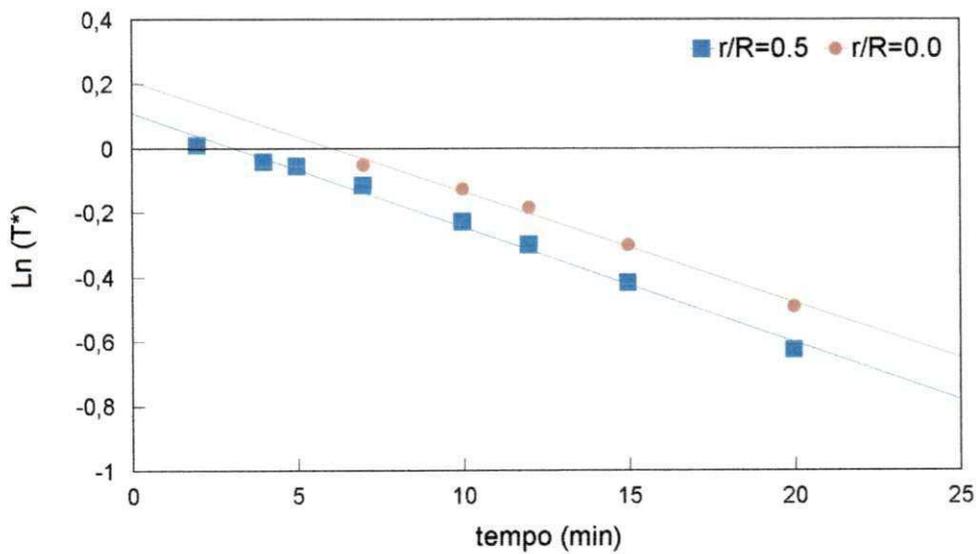


Figura 5.6 - Aplicação de regressão linear na região de regime regular
Exp. 01 - $T_\infty = 80^\circ\text{C}$

Para a análise da reprodutibilidade dos resultados obtidos, foram realizados dois experimentos na temperatura de 80°C, na mesma vazão. Não foi observada a umidade inicial do urucum utilizado nos experimentos, mas por terem sido realizados no mesmo dia e com material do mesmo lote, pode-se considerar que ambos os experimentos utilizavam urucum com a mesma umidade inicial. Os resultados se encontram na tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Estudo da reprodutibilidade dos resultados para a determinação da condutividade térmica do urucum:

Ensaio	T (°C)	Q (m ³ /h)	$\alpha_1 \cdot 10^7$ (m ² /s)	$\alpha_2 \cdot 10^7$ (m ² /s)	$K_{a1} \cdot 10^1$ (W/m°C)	$K_{a2} \cdot 10^1$ (W/m°C)	R ²
01	80	200	3,06	2,79	3,140	2,86	0,995
02	80	200	3,02	2,98	3,103	3,06	0,991

¹ determinado a partir de medidas em $r/R=0.0$

² determinado a partir de medidas em $r/R=0.5$

Pode-se observar que os resultados foram bem reproduzidos, tendo em vista a complexidade do modelo empregado. O desvio médio na condutividade térmica entre os dois experimentos, com medidas de temperatura no centro do cilindro ($r/R=0,0$), foi na ordem de 1%. Quando se compara os resultados dos experimentos realizados com medidas na metade do raio ($r/R=0,5$), observa-se que esse desvio sobe para 6,5%. A explicação para essa diferença se deve ao fato de que quando se está enchendo a célula de medida com os grãos, ou mesmo quando se vai inserir a célula na coluna de aquecimento, os termopares tendem a se deslocar no interior da célula. Isso leva a erros de medida e, conseqüentemente, a erros de cálculo, o que provoca desvios entre os valores. Considerando-se que os erros são maiores nas medidas feitas com o termopar na metade do raio, pode-se concluir que essa medida é menos confiável, o que nos levou a desconsiderá-la, sem prejuízo

para o cálculo da condutividade térmica do material em estudo. O efeito da temperatura na condutividade térmica está resumido na tabela 5.3:

Tabela 5.3 - Efeito da temperatura do ar de aquecimento

Ensaio	T (°C)	Q (m ³ /h)	$\alpha_1 \cdot 10^7$ (m ² /s)	$K_{a1} \cdot 10^1$ (W/m°C)
01	80	200	3,02	3,10
02	75	200	3,88	3,98
03	65	200	2,09	3,57

Dentro da faixa observada, pode-se afirmar que a temperatura pouco influencia na condutividade, resultado também obtido por Silva & Alsina (1986) e Silva & Alsina (1995), nas medidas de condutividade de feijão preto, para uma faixa de temperaturas semelhante.

5.4 - Coeficiente de Difusão Efetivo

5.4.1 - Modelo com Def Constante

Com o objetivo de se proporem equações semi-empíricas que representem teoricamente as curvas de secagem de urucum, foi feita modelagem matemática a partir da solução analítica dada pela equação 2.5 para coeficientes de difusão efetivo constante. No ajuste, foi utilizado método de identificação paramétrica por regressão não-linear, utilizando o Marquard.

Na tabela 5.4 são mostrados os resultados para algumas condições experimentais.

Tabela 5.4 - Resultados das aplicações do modelo com coeficiente de difusão constante

Experimentos	U_{inicial} (dec)	Temperatura (K)	D_{ef} (cm^2/s) x 10^{+7}	Erro médio (%)
01	0,2248	338	10,910	3,582
02	0,1453	343	3,350	3,684
03	0,1532	330,65	2,385	0,846
07	0,1554	338	1,756	0,551
09	0,1642	327	1,487	0,889
10	0,1642	349	4,881	0,651
11	0,1551	355	4,411	4,195
12	0,1586	346	3,850	0,973
14	0,1442	355,8	4,027	6,148
24	0,1298	339	1,614	2,461

Os resultados dos dados experimentais juntamente com os dados simulados pela forma explicada acima, estão plotados nas figuras 5.7a , 5.7b e 5.7.

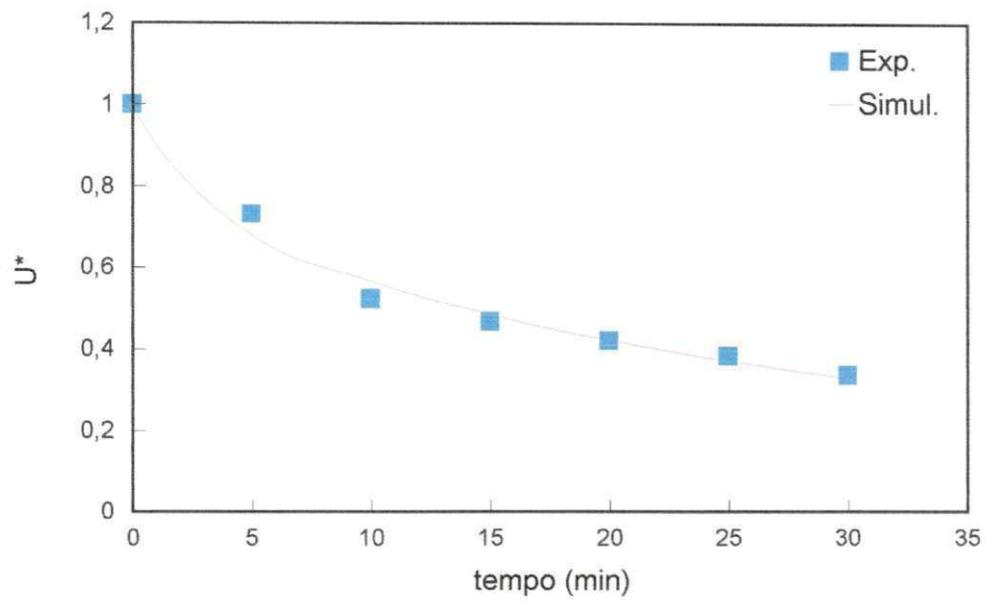


Figura5 .7a - Curvas de secagem de urucum com dados experimentais e calculados analiticamente - Temp. 338K - Exp. 01

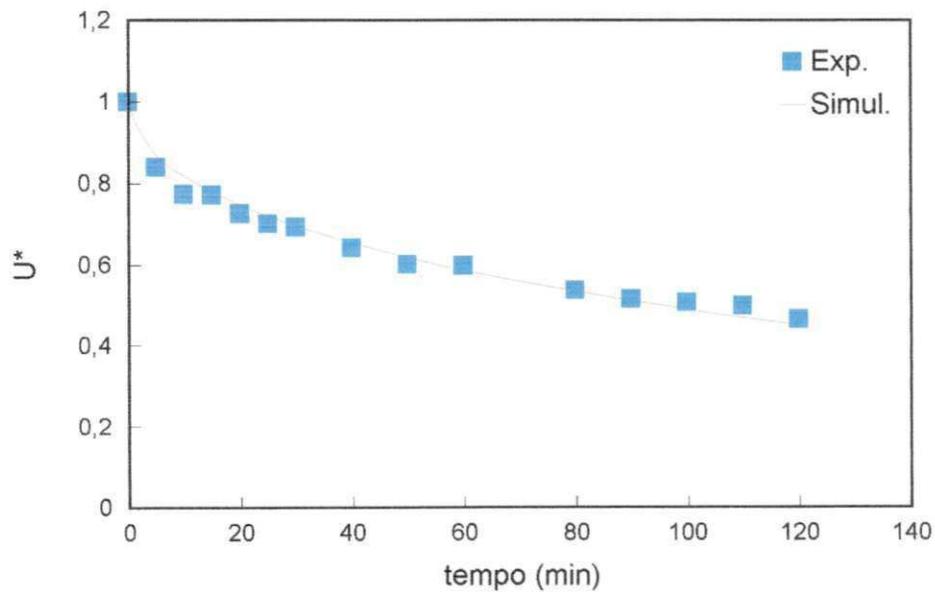


Figura 5.7b - Curvas de secagem de urucum com dados experimentais e calculados analiticamente - Temp.339K - Exp. 24

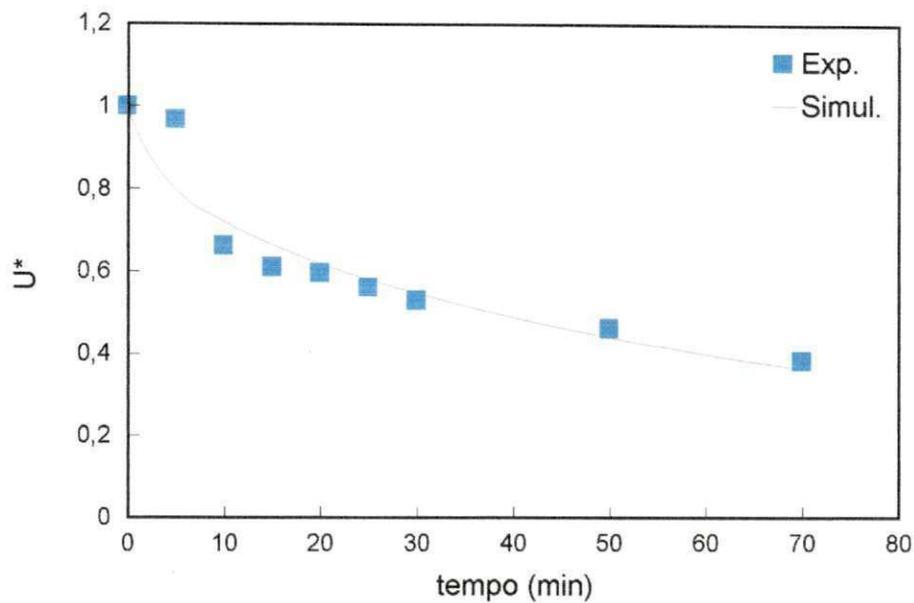


Figura 5.7c - Curvas de secagem de urucum com dados experimentais e calculados analiticamente - Temp.355.8 K - Exp. 14

O que se pode observar é que houve um bom ajuste entre os dados e o modelo, visto que os erros médios são na sua maioria menores que 4%.

5.4.2 - Efeito da Umidade no Coeficiente de Difusão Mássico Efetivo

Apesar dos resultados com Def constante serem satisfatórios, foram propostos modelos para se tentar ajustar o efeito do teor de umidade do grão sobre o coeficiente de difusão efetivo. Para obtenção desse coeficiente em função da umidade, foi feita uma abordagem simplificada aplicando a equação 2.5 a períodos discretos de tempo (programa computacional no apêndice IV). Os resultados se encontram nas figuras 5.8a e 5.8b:

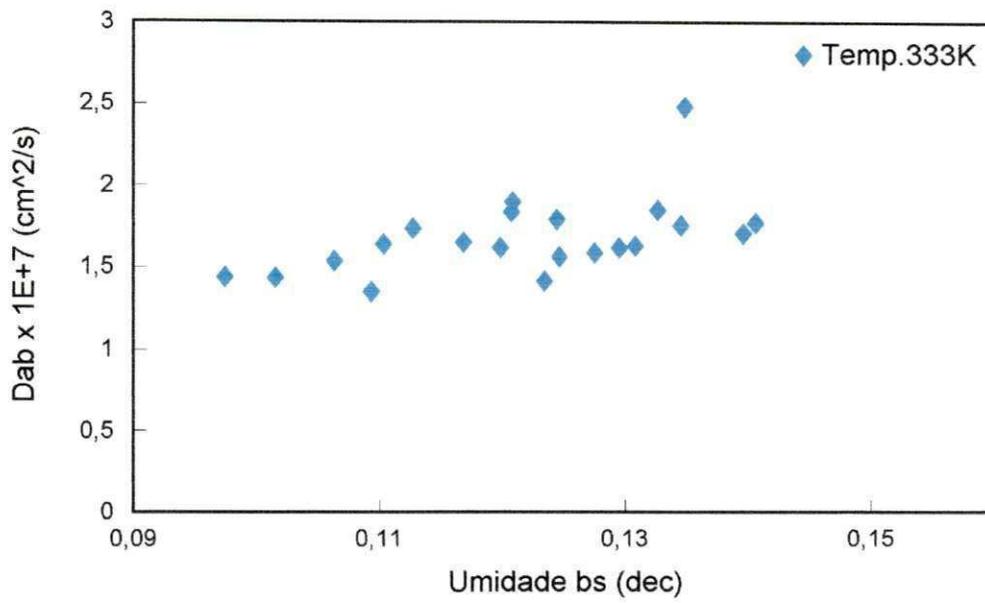


Figura 5.8a - Variação do Def com umidade

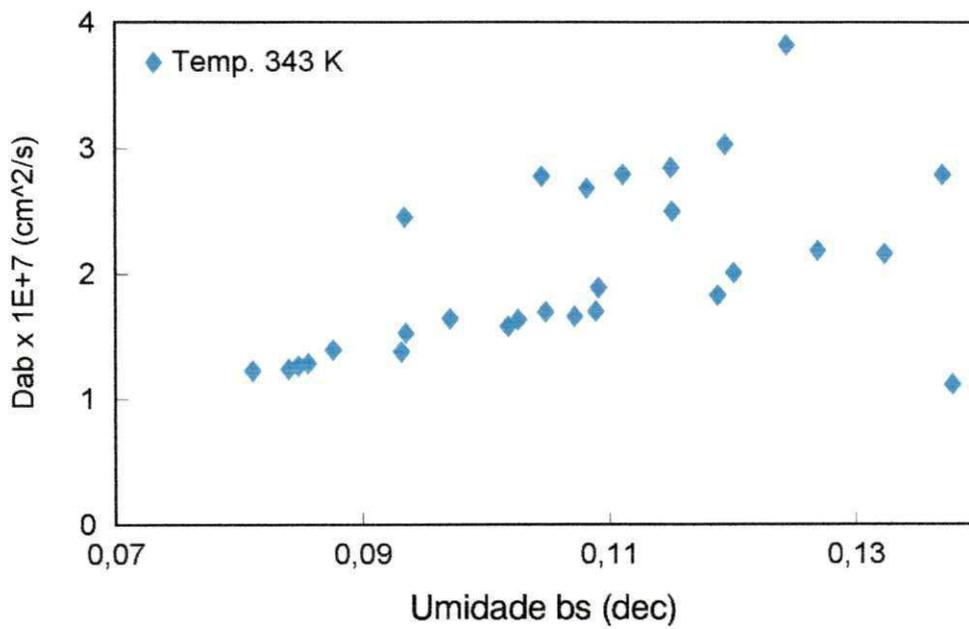


Figura 5.8b : Variação do Def com umidade

Para o ajuste foi aplicado regressões linear e exponencial a essas curvas, cujos resultados se encontram na tabela 5.5:

Tabela 5.5 - Efeito do teor de umidade do grão sobre o Def (cm²/s)

Temperatura	Modelo linear		Modelo exponencial		R
	α	β	α	β	
333	$4,23 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$8,0 \times 10^{-8}$	6,012	0,53
343	$-3,81 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-6}$	$5,8 \times 10^{-8}$	10,98	0,52

Observa-se na tabela 5.5 que esses modelos ajustam de forma apenas razoável, com coeficiente de correlação extremamente baixo, e praticamente coincidente para ambos os modelos. Esse fato em parte pode ser explicado pelo modelo simplificado utilizado para obtenção dos coeficientes de difusão efetivo a partir das umidades, como também pela baixa sensibilidade paramétrica do coeficiente de difusão efetivo.

O modelo linear, embora mais simples para efeitos numéricos tem sua faixa de aplicação limitada para a temperatura de 343 K, devido ao termo independente negativo, onde a extrapolação para baixas umidades perde o sentido físico.

De posse desses modelos, ensaiou-se aplicá-los na equação de difusão (2.1). Para a resolução dessa equação foi usado um pacote computacional discretizador (PDEONE), juntamente com um integrador (GEAR). O integrador apresentou instabilidade, o que nos levou a desvios consideráveis (de até 95%) entre os valores experimentais e os preditos pelo modelo. Conforme assinalado na seção 2.5, alguns autores recomendam a utilização de uma transformada de Kirchhoff, como medida para resolver o problema nessas situações, o que será levado em conta nas sugestões para trabalhos futuros.

5.4.3 - Verificação da Isotermicidade dos Experimentos

Para a verificação da hipótese de secagem isotérmica, foi aplicado um modelo simplificado de transferência de calor ao grão, com as seguintes suposições:

- a) partículas esféricas;
- b) o coeficiente de transferência de calor é constante;
- c) ρ_s , K e Cp_s são independentes da temperatura e da umidade do sólido ;
- d) a resistência interna ao fluxo de calor é desprezível;

Esta última suposição está suportada pelo cálculo do número de Biot :

$$Bi = \frac{h \cdot D_p}{K_s} \quad (5.1)$$

onde o valor de K_s é calculado a partir do valor da condutividade aparente apresentada na secção 5.3, pela fórmula:

$$Kp_a = \varepsilon Kp_f + (1-\varepsilon)Kp_s \quad (5.2)$$

obtendo-se o valor do Biot aproximadamente igual a 0,25 para todos os experimentos.

Com as suposições acima e com a condição inicial $T(0) = T_0$, a equação para a evolução de temperatura do grão é:

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \text{Exp} \left| \frac{-h \Lambda t}{\rho_s Cp_s V} \right| \quad (5.2)$$

Após os cálculos , pode-se considerar que o grão atinge a temperatura do ar de secagem em aproximadamente dois minutos, o que comprova que a secagem do grão é isotérmica nas condições operacionais utilizadas.

5.4.4 - Efeito da Temperatura sobre o Coeficiente de Difusão Mássico Efetivo

Com o intuito de se analisar o efeito da temperatura sobre o coeficiente de difusão efetivo, obtido através do modelo com D_{ef} constante, cujos resultados estão resumidos na tabela 5.4, foi feito um ajuste do tipo Arrhenius.

Foram escolhidos os experimentos que apresentavam umidades iniciais próximas (em torno de 15%). O ajuste apresentou a seguinte equação resultante:

$$D_{ef} = 0,0019 \times \text{EXP} (-2961/T) \quad (5.3)$$

que está melhor representado na figura 5.9:

A energia de ativação do urucum calculado a partir desse ajuste foi de 5,88 Kcal/mol. Esse resultado está na mesma ordem de grandeza da energia de ativação para soja que é de 7,2 kcal/mol, apresentada por Kitic (1982).

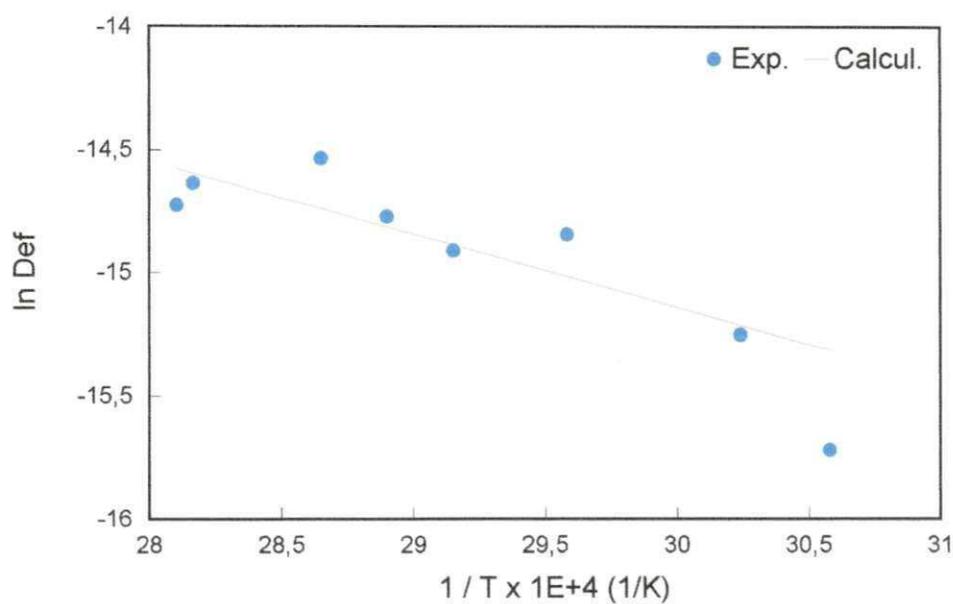


Figura 5.9 - Verificação do efeito da temperatura no coeficiente de difusão

mássico efetivo

Como se pode verificar, o ajuste do coeficiente de difusão com a temperatura foi satisfatório, com erro médio em torno de 14% e desvios na ordem de $5,6 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao presente trabalho, que é o estudo da secagem de urucum em camada fina, se propõe:

Em relação à caracterização das propriedades de transporte:

- Determinar o calor isostérico de sorção;
- Ensaaiar outros modelos usando teoria da mistura, além do linear utilizado neste trabalho, para cálculo da condutividade e difusividade térmica do urucum;
- Verificar o efeito da umidade sobre os parâmetros de Arrhenius D_0 e E_a ;

Quanto à cinética em camada fina:

- Observar o comportamento para tempos longos;
- Observar o efeito de reumidificação sobre as curvas de secagem;
- Ensaaiar a secagem em outras faixas operacionais;

- Quanto à modelagem:

- Fazer a modelagem matemática para coeficiente de difusão em função da umidade, utilizando a transformada de Kirchhoff.
- Resolução simultânea do sistema acoplado das equações de energia e massa, levando em conta a variação de K , ρ , C_p e De com a umidade e a temperatura;

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, podem ser apresentadas as seguintes conclusões:

- As umidades de equilíbrio próprias e de outros autores, obtidas pelo método estático e dinâmico, podem ser representadas pela equação de Roa, com erro médio de 22% e desvio padrão de 0,01. Foram utilizadas no ajuste, valores de umidade obtidas com temperaturas de 40°C a 82°C e umidades relativas de até 70%.
- A secagem ocorre no período de taxa decrescente, com controle interno à transferência de massa, pois nas condições de operação usada na vazão não afeta as curvas de secagem.
- Nas condições utilizadas com temperaturas variando de 54°C a 82°C e umidade inicial de 12% a 22%, a taxa de secagem aumenta com o aumento da temperatura de operação e da umidade inicial.
- A difusividade térmica aparente determinada pelo método do regime regular foi de $3,06 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{min}$ na temperatura de 80°C, o que corresponde a condutividade térmica aparente de 0,314 W/m°C com erros de reprodutibilidade na ordem de 1%, com medidas no termopar central.
- O modelo de Def constante teve resultados satisfatórios com desvios médios inferiores a 5%.
- Quando ensaiados os modelos de variação de Def com umidade na equação de difusão, o integrador utilizado apresentou instabilidade devido em parte à baixa sensibilidade paramétrica do coeficiente de difusão efetivo, ou ainda pela utilização de um modelo simplificado para obtenção

desta dependência, não sendo possível a resolução da equação de difusão dentro dos desvios esperados.

- Os experimentos realizados em camada fina nas condições do presente trabalho são compatíveis com a hipótese de condições isotérmicas, uma vez que o grão atinge a temperatura do ar de secagem em 2 minutos.
- A aplicação de um modelo do tipo Arrhenius para se analisar o efeito da temperatura sobre o coeficiente de difusão, apresentou bom ajuste com erro médio de 9%. A energia de ativação encontrada para o urucum foi de 10,37 kcal/mol.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao presente trabalho, que é o estudo da secagem de urucum em camada fina, se propõe:

Em relação à caracterização das propriedades de transporte:

- Determinar o calor isostérico de sorção;
- Ensaaiar outros modelos usando teoria da mistura, além do linear utilizado neste trabalho, para cálculo da condutividade e difusividade térmica do urucum;
- Verificar o efeito da umidade sobre os parâmetros de Arrhenius D_0 e E_a ;

Quanto à cinética em camada fina:

- Observar o comportamento para tempos longos;
 - Observar o efeito de reumidificação sobre as curvas de secagem;
 - Ensaaiar a secagem em outras faixas operacionais;
- Quanto à modelagem:
- Fazer a modelagem matemática para coeficiente de difusão em função da umidade, utilizando a transformada de Kirchhoff.
 - Resolução simultânea do sistema acoplado das equações de energia e massa, levando em conta a variação de K , ρ , C_p e De com a umidade e a temperatura;

BIBLIOGRAFIA

- ALSINA, O.L.S., Comunicação pessoal, 1996.
- BARROZO, M.A.S., SARTORI, D.J.M., FREIRE, J.T., Estudo da Cinética de Secagem de Sementes de Soja em Camada Fina nos Leitos Fixos e Deslizantes, Anais do XXIII ENEMP, Maringá, Pr, 1995, no prelo.
- BARROZO, M.A.S., SARTORI, D.J.M., FREIRE, J.T., Discriminação de Equações de equilíbrio utilizando medidas de não linearidade, Anais do XXIII ENEMP, Maringá, Pr, 1995, no prelo.
- BARROZO, M.A.S., SARTORI, D.J.M., FREIRE, J. T., Secagem de Grãos em Camada Fina. Um Estudo Sobre as Equações de Secagem, Revista Brasileira de Engenharia Química, Agosto, 1994.
- BORIES, S., Recent advances in modelisation of coupled heat and mass transfer en capillary-porous bodies, Drying 89, 1989.
- BROOKER, D.B., BAKER-ARKEMAR, F.W. & HALL, C. W., Drying cereal, Westport, Cown, Avi, 1974.
- CANTO, W.L., Mercado brasileiro de urucum, trabalho apresentado na Sociedade Brasileira de Urucum, Fortaleza, novembro, 1989.
- * CARVALHO, P.R.N., Potencialidade dos corantes naturais, Rev. Bras. Cor. Nat., 1(1) : 244-245, Viçosa, 1992.
- * CARVALHO, P.R.N., Extração do corante de urucum, Seminário de corantes naturais para alimentos, ITAL, Campinas, Setembro, 1989.

CARVALHO, P.R.N., Extração do corante de urucum, Seminário de corantes naturais para alimentos, ITAL, Campinas, Setembro, 1989.

CHEN, P. , PEI ,D.C.T. , A mathematical model of drying process, Int. J. Heat-Mass Transfer , vol.32, nº2, pp. 297-340, Inglaterra, 1989.

CHU, S.T., HUSTRULID, A. , Numerical solution of diffusion equations, Transaction of the ASAE, vol. 9-1, 1966.

CORRÊA, R.G., FREIRE, J.T., Determinação da condutibilidade térmica II. Análise numérica, Anais do XV ENEMP, vol. 1, 172-179, Uberlândia , Mg.

CRANK, J., The mathematics of diffusion, Oxford University Press, London, 1975.

FERREIRA, W.A., FALESI, I.C., Características nutricionais do fruto e teor de bixina em urucum, EMBRAPA - CPATU - Boletim de Pesquisa, Belém, 1989.

FREITAS, G.B., SILVA, F.C.P., Aspectos econômicos da cultura do urucum no estado da Paraíba, Resumos do Congresso brasileiro de corantes naturais, Belém, 1995.

GHIRALDINI, J.E., Mercado e aplicações do urucum, Resumos do Congresso brasileiro de corantes naturais, Belém, 1995.

GUBULIN, J.C., Transferência de calor em meios porosos: Condutividade térmica efetiva na estagnação, Anais do XII ENEMP, vol. II, pag. 259-265, Maringá-Pr, 1984.

- GUIMARÃES, I.S.S., Corantes naturais: Os sucedâneos do artificialismo, Resumos do Congresso brasileiro de corantes naturais, Belém, 1994.
- GUSTAFSON, R.J., HALL, G.E., Equilibrium moisture content of shelled corn from 50 to 155 F, Transaction of the ASAE, 1974.
- KETELAARS, A.A.J. , COUMANS, W.J., Drying shrinkage and stresses, Drying technology ,1992.
- KETELAARS, A.A.J. , PEL, L., COUMANS, W.J., KERKHOF, P.J.A.M., Drying kinetics: A comparison of diffusion coefficients from moisture concentration profiles and drying curves, Chemical Engineering Science, vol. 50, Nº 7, pp. 1187-1191, Inglaterra, 1995.
- LIMA, V.E., Determinação das propriedades físicas e secagem em leito de jorro das sementes de urucum, relatório de estágio apresentado no DEQ/CCT-Campus II, Campina Grande, 1993.
- LUIKOV, A.V., Heat and mass transfer in capillary porous bodies, Pergamon Press, Nova York, 1966.
- MARKOWSKI, A.S., Drying of bio-products in jet spouted bed dryers With inert Bodies, Drying Tecnology, 1989.
- MASSARANI, G., PASSOS, M.L. , BARRETO, D.W., Production of annato concentrates in spouted beds, Can. Journal of Chem. Engin., 70, 954-959, 1992.
- MELLO, A.A.A., LIMA, L.C.F., Urucum - Situação atual e perspectivas região Norte e Nordeste, Seminário de corantes naturais para alimentos, ITAL, Campinas, Setembro, 1989.

- NOOMHORM, A., VERMA, L.R., Generalized single-layer rice drying models, Transaction of the ASAE, vol. 29, nº02, 1986.
- OLIVEIRA, V.P., Urucum - Situação atual e perspectivas região Sul e Sudeste, Seminário de corantes naturais para alimentos, ITAL, Campinas, Setembro, 1989.
- PABIS, S., HENDERSON, S.M., Grain drying theory - II - A critical analysis of drying curve for shelled maize, journal of Agric. Eng. Research, vol.6, 1961.
- PARTI, M., A Theoretical model for thin-layer grain drying, Drying Tecnology, 8(1),101-122, 1990.
- PIETROBON, C.L.R., PEREIRA, N.C., FREIRE, J.T., Determinação da condutividade térmica I. Análise experimental, Anais do XV ENEMP, vol. I, pag. 150-161, Uberlândia-Mg, 1987.
- QUEIROZ, D.S., FONSECA, M.G., URTIGA, R., ALSINA, O.L.S., Higroscopicidade de sementes de urucum, trabalho apresentado no XVIII ENEMP, Nova Friburgo, 1990.
- ROA, G., ROSSI, S.J., Determinação experimental de curvas de teor de umidade de equilíbrio e calor latente de vaporização para castanhas de cajú e raspas de mandioca, Revista brasileira de armazenamento, vol.4, nº 2, 1979.
- SANTOS, H.F., BISCAIA Jr., E., MASSARANI, G., Modelagem dinâmica e simulação de secadores em leito fixo, Anais do XXI ENEMP, Ouro Preto, MG,1993.

SHERWOOD, T.K., Application of theoretical diffusion equation to the drying of solids, American Institute of Chemical Engineering, vol. 27, 1931.

SILVA, G. F., Processamento de urucum em leito de jorro, Dissertação Apresentada no Curso de Mestrado em Eng. Química/CCT/UFPA, Campina Grande, 1991.

SILVA, G.F., ALSINA, O.L.S., Secagem de urucum em leito de jorro: Aplicação do modelo difusional, Anais do XIX ENEMP, Vol.I, 355-365, Campinas, 1991.

SILVA, G.F., ALSINA, O.L.S., Determinação de propriedades térmicas do feijão preto, Anais do XXIII ENEMP, Maringá, 1995, no prelo.

SILVA, S.L., ALSINA, O.L.S., Condutividade térmica na estagnação de um leito de feijão, Anais do XV ENEMP, vol. I, pag. 172-179, Uberlândia-Mg, 1987.

SIMAL, S., ROSSELO, C., BERNA, A., MULET, A., Heat and mass transfer model for potato drying, Chemical Engineering Science, vol. 49, Nº 22, pp. 3739-3744, Inglaterra, 1994.

SINÍCIO, R., ROA, G., Curvas e equações de equilíbrio higroscópico para 15 produtos agrícolas, Rev. Bras. de Armazenamento, Viçosa, 4(2):45-55, 1979.

SOUZA, A.M.F., BARROZO, M.A.S., SARTORI, D.J.M., Análise da Influência da Temperatura e da Velocidade do Ar na Cinética de Secagem de Grãos, Anais do XXI ENEMP, Ouro Preto, MG, 1993.

SWEAT, V.E., HAUGH, C.G., A thermal conductivity probe for small food samples, Transactions of the ASAE, 1974.

TEIXEIRA, M.B.F., TOBINAGA, S. , Estudo de quatro relações funcionais entre a difusividade efetiva e a umidade durante a secagem de manta de lula, Anais do XXIII ENEMP, Maringá, PR, 1995, no prelo.

THOMPSON, , T.L., PEART, R.M., FOSTER, G.H., Mathematical simulation of corn drying - A new model , Transaction of the ASAE, 1968

VASCONCELOS,L.G.S., Simulação da secagem de feijão em fluxo cruzado ,
Dissertação Apresentada no curso de Mestrado em Eng.
Química/CCT/UFPb, Campina Grande, 1990.

YAMAGUCHI,S., Temperature and moisture dependent diffusivity of moisture in rice kernel, Drying,92, 1992.

ZORRILA, S.E., RUBIOLO, A.C., A model for using the diffusion cell in the determination of multicomponent diffusion coefficients in gels or foods, Chemical Engineering Science, vol. 49, Nº 13, pp. 2123-2128, Inglaterra, 1994.

APÊNDICE I

Tabelas de Resultados Experimentais

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	64,88	0,2248	1,000
5	62,24	0,1750	0,7314
10	60,18	0,1361	0,5216
15	59,65	0,1261	0,4676
20	59,20	0,1176	0,4218
25	58,83	0,1106	0,3840
30	58,37	0,1019	0,3371
Ui =	0.225	T =	65°C
Q =	220 m ³ /h	Ue =	0.0412

Tabela 1 - Resultados do experimento 1.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	52,37	0,1453	1,000
5	51,42	0,1245	0,8056
10	51,19	0,1195	0,7589
15	50,99	0,1151	0,7178
20	50,81	0,1112	0,6813
25	50,68	0,1083	0,6196
30	50,51	0,1046	0,5159
Ui =	0,145	T =	70,0
Q =	220 m ³ /h	Ue =	0,0383

Tabela 2 - Resultados do experimento 2

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	51,37	0,1533	1,000
5	50,55	0,1349	0,8379
10	50,27	0,1286	0,7824
15	50,01	0,1228	0,7313
20	49,81	0,1183	0,6916
25	49,71	0,1161	0,6722
30	49,46	0,1104	0,6220
Ui =	0,153	T =	57,5°C
Q =	220 m ³ /h	Ue =	0,0398

Tabela 3 - Resultados do experimento 3.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	59,81	0,1547	1,000
5	58,95	0,1381	0,8574
10	58,49	0,1292	0,7809
15	58,36	0,1267	0,7595
20	58,20	0,1236	0,7328
25	58,05	0,1207	0,7079
30	57,91	0,1180	0,6847
Ui =	0,154	T =	65 °C
Q =	190 m ³ /h	Ue =	0,0383

Tabela 4 - Resultados do experimento 5.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	61,82	0,1576	1,000
5	60,72	0,1371	0,8293
10	60,47	0,1324	0,7902
15	60,18	0,1270	0,7452
20	60,02	0,1240	0,7202
25	59,82	0,1202	0,6886
30	59,75	0,1189	0,6778
Ui =	0,157	T =	70 °C
Q=	-	Ue =	0,0375

Tabela 5 - Resultados do experimento 6.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	55,03	0,1554	1,000
5	54,28	0,1397	0,8651
10	53,95	0,1327	0,8050
15	53,80	0,1296	0,7784
20	53,56	0,1245	0,7345
25	53,38	0,1208	0,7027
30	53,34	0,1199	0,6950
Ui =	0,155	T =	65 °C
Q=	190 m ³ /h	Ue =	0,0390

Tabela 6 - Resultados do experimento 7.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	59,24	0,1565	1,000
5	58,43	0,1407	0,8648
10	58,12	0,1346	0,8127
15	57,93	0,1309	0,7810
20	57,76	0,1276	0,7528
25	57,61	0,1247	0,7279
30	57,55	0,1235	0,7177
Ui =	0,156	T =	60°C
Q=	-	Ue =	0,0396

Tabela 7 - Resultados do experimento 8.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	54,28	0,1642	1,000
5	53,50	0,1475	0,8647
10	53,25	0,1421	0,8209
15	53,00	0,1367	0,7771
20	52,85	0,1335	0,7512
25	52,78	0,1320	0,7391
30	52,65	0,1292	0,7164
Ui =	0,164	T =	54 °C
Q=	-	Ue =	0.0408

Tabela 8 - Resultados do experimento 9.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	51,96	0,1642	1,000
5	50,63	0,1344	0,7625
10	50,29	0,1268	0,7020
15	49,94	0,1189	0,6390
20	49,64	0,1122	0,5857
25	49,40	0,1068	0,5426
30	49,20	0,1024	0,5076
Ui =	0,164	T =	76°C
Q=	-	Ue =	0,0387

Tabela 9 - Resultados do experimento 10.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	56,20	0,1551	1,000
5	55,62	0,1432	0,9017
10	54,59	0,1220	0,7267
20	53,72	0,1041	0,5789
25	53,52	0,1000	0,5450
30	53,39	0,0973	0,5227
40	52,93	0,0879	0,4451
70	52,45	0,0780	0,3633
Ui =	0,155	T =	82°C
Q=	-	Ue =	0,0340

Tabela 10 - Resultados do experimento 11.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	53,66	0,1586	1,000
5	52,48	0,1331	0,7901
10	52,05	0,1238	0,7136
15	51,82	0,1189	0,6733
20	51,60	0,1141	0,6337
30	51,18	0,1050	0,5588
Ui =	0,158	T =	73 °C
Q=	-	Ue =	0,0371

Tabela 11 - Resultados do experimento 12.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	49,91	0,1490	1,000
5	45,88	0,1238	0,7736
10	45,60	0,1169	0,7116
15	45,40	0,1120	0,6676
20	45,23	0,1079	0,6307
25	45,18	0,1066	0,6190
30	45,09	0,1044	0,5993
Ui =	0,149	T =	65 °C
Q=	170 m ³ /h	Ue =	0,0377

Tabela 12 - Resultados do experimento 13.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	45,55	0,1442	1,000
5	45,41	0,1407	0,9688
10	44,04	0,1063	0,6622
15	43,81	0,1005	0,6105
20	43,75	0,0989	0,5963
25	43,59	0,0949	0,5606
30	43,45	0,0914	0,5294
50	43,15	0,0839	0,4626
70	42,80	0,0751	0,3841
Ui =	0,144	T =	82,5°C
Q=	200m ³ /h	Ue =	0,0320

Tabela 13 - Resultados do experimento 14.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	47,42	0,1341	1,000
5	46,87	0,1209	0,8609
10	46,70	0,1169	0,8187
15	46,53	0,1128	0,7756
20	46,43	0,1104	0,7503
30	46,26	0,1064	0,7081
45	46,06	0,1016	0,6575
60	45,89	0,0975	0,6143
Ui =	0,134	T =	58 °C
Q=	200 m ³ /h	Ue =	0,0392

Tabela 14 - Resultados do experimento 15.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	37,98	0,1479	1,000
5	37,42	0,1310	0,8506
10	37,17	0,1234	0,7834
15	36,98	0,1177	0,7330
20	36,86	0,1141	0,7011
25	36,78	0,1116	0,6791
30	36,74	0,1104	0,6684
45	36,48	0,1026	0,5995
75	36,19	0,0938	0,5146
Ui =	0,148	T =	75 °C
Q=	180 m ³ /h	Ue =	0,0348

Tabela 15 - Resultados do experimento 16.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	29,43	0,1500	1,000
5	28,95	0,1312	0,8372
10	28,78	0,1246	0,7801
15	28,69	0,1211	0,7498
20	28,64	0,1191	0,7325
25	28,55	0,1156	0,7022
30	28,47	0,1125	0,6753
40	28,45	0,1117	0,6684
50	28,34	0,1074	0,6312
60	28,23	0,1031	0,5939
Ui =	0,150	T =	72 °C
Q=	50m ³ /h	Ue =	0,0345

Tabela 16 - Resultados do experimento 17.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	28,83	0,1500	1,000
5	28,26	0,1273	0,7955
10	28,07	0,1197	0,7270
15	28,01	0,1173	0,7054
20	27,94	0,1145	0,6802
25	27,84	0,1105	0,6440
30	27,77	0,1077	0,6189
40	27,72	0,1057	0,6009
50	27,67	0,1037	0,5829
60	27,57	0,0997	0,5468
Ui =	0,150	T =	80 °C
Q=	100 m ³ /h	Ue =	0,0039

Tabela 17 - Resultados do experimento 18.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	48,53	0,1500	1,000
5	46,97	0,1130	0,6669
10	46,57	0,1036	0,5824
15	46,46	0,1009	0,5581
20	46,34	0,0981	0,5328
25	46,27	0,0964	0,5176
30	46,14	0,0934	0,4986
40	46,13	0,0931	0,4878
50	46,07	0,0917	0,4752
60	45,89	0,0874	0,4365
Ui =	0,150	T =	76 °C
Q=	160 m ³ /h	Ue =	0,0389

Tabela 18 - Resultados do experimento 19.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	37,08	0,1500	1,000
5	36,69	0,1379	0,8919
10	36,63	0,1360	0,8750
15	36,51	0,1323	0,8419
20	36,44	0,1302	0,8232
25	36,42	0,1295	0,8169
30	36,38	0,1283	0,8062
Ui =	0,150	T =	66 °C
Q=	50 m ³ /h	Ue =	0,0380

Tabela 19- Resultados do experimento 20.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	60,66	0,1500	1,000
5	59,88	0,1352	0,8677
10	59,67	0,1312	0,8320
15	59,50	0,1280	0,8034
20	59,37	0,1255	0,7811
25	59,28	0,1238	0,7659
30	59,18	0,1219	0,7489
60	58,73	0,1134	0,6729
Ui =	0,1554	T =	65 °C
Q=	190 m ³ /h	Ue =	0,0381

Tabela 20 - Resultados do experimento 21

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	49,31	0,1209	1,000
5	48,91	0,1118	0,8923
10	48,79	0,1091	0,8604
15	48,71	0,1073	0,8390
20	48,52	0,1029	0,7870
25	48,42	0,1007	0,7609
30	48,36	0,0993	0,7444
40	48,20	0,0957	0,7018
50	48,07	0,0927	0,6663
60	47,94	0,0897	0,6308
70	47,87	0,0882	0,6130
80	47,79	0,0863	0,5905
90	47,77	0,0859	0,5858
100	47,69	0,0841	0,5645
110	47,57	0,0813	0,5314
120	47,48	0,0793	0,5077
Ui =	0,121	T =	76 °C
Q=	190 m ³ /h	Ue =	0,0364,

Tabela 21- Resultados do experimento 22.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	43,62	0,1208	1,000
5	43,36	0,1141	0,9206
10	43,20	0,1100	0,8720
15	43,02	0,1054	0,8175
20	42,96	0,1038	0,7986
25	42,81	0,0999	0,7524
30	42,78	0,0992	0,7441
40	42,54	0,0931	0,6718
50	42,50	0,0920	0,6587
60	42,53	0,0928	0,6682
80	42,22	0,0848	0,5734
90	42,08	0,0812	0,5308
100	42,10	0,0817	0,5367
110	42,02	0,0797	0,5130
120	42,00	0,0792	0,5071
U _i =	0,121	T =	76 °C
Q =	100 m ³ /h	U _e =	0,0364

Tabela 22 - Resultados do experimento 23.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	57,15	0,1298	1,000
5	56,41	0,1152	0,8392
10	56,11	0,1092	0,7731
15	56,10	0,1090	0,7709
20	55,89	0,1049	0,7258
25	55,78	0,1027	0,7015
30	55,74	0,1019	0,6927
40	55,50	0,0972	0,6409
50	55,32	0,0936	0,6013
60	55,30	0,0932	0,5969
80	55,02	0,0877	0,5363
90	54,92	0,0857	0,5143
100	54,88	0,0849	0,5055
110	54,84	0,0841	0,4967
120	54,69	0,0812	0,4647
Ui =	0,130	T =	65°C
Q=	100 m ³ /h	Ue =	0,0390

Tabela 23- Resultados do experimento 24.

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	49,94	0,1298	1,000
5	49,29	0,1151	0,8381
10	49,15	0,1119	0,8029
15	49,03	0,1092	0,7731
20	48,90	0,1063	0,7412
25	48,81	0,1042	0,7181
30	48,73	0,1024	0,6982
40	48,54	0,0981	0,6509
50	48,44	0,0959	0,6267
60	48,39	0,0947	0,6134
80	48,18	0,0899	0,5615
90	48,15	0,0893	0,5540
100	48,08	0,0877	0,5363
110	48,02	0,0864	0,5220
120	47,96	0,0850	0,5066
U _i =	0,130	T =	76°C
Q =	190m ³ /h	U _e =	0,0390

Tabela 24- Resultados do experimento 25

Tempo (min)	Massa da amostra (g)	Umidade BS (dec)	Relação de Umidades (dec.)
0	52,87	0,1298	1,000
5	52,49	0,1217	0,9134
10	52,22	0,1159	0,8513
15	52,05	0,1123	0,8128
20	51,94	0,1099	0,7872
25	51,83	0,1076	0,7626
30	51,74	0,1057	0,7422
40	51,61	0,1029	0,7123
50	51,44	0,0992	0,6727
60	51,40	0,0984	0,6642
Ui =	0,130	T =	76°C
Q=	50 m ³ /h	Ue =	0,0363

Tabela 24- Resultados do experimento 26

APÊNDICE II

PLANILHA DE CÁLCULO

Foram realizados cálculos para comprovar a hipótese da secagem de grãos, nas condições trabalhadas nesse trabalho. Os cálculos obedeceram as seguintes etapas:

1- Cálculo do Número de Reynolds (Re)

2- Cálculo do Nusselt , através da correlação:

$$Nu = 2 + 0,6 * (Re)^{1/2} (Pr)^{1/3}$$

3- Cálculo do h:

$$h = \frac{Nu * Kar}{D_p}$$

4- Cálculo do Número de Biot

$$Bi = \frac{h * D_p}{K_s}$$

Quando ensaiados, os experimentos tinham número de Biot aproximadamente igual a 0,25%.

Para saber qual o tempo o grão atinge a temperatura do ar de secagem, utilizou-se a equação 5.3:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = EXP \left[\frac{hAt}{\rho_s C p_s V} \right]$$

Com o uso da relação:

$$\frac{A}{V} = \frac{6}{Dp\phi}$$

APÊNDICE III

C PROGRAMA QUE CALCULA D_{EF} APROXIMADO – MÉTODO REGULA-FALSE

```

PROGRAM DAB
REAL T (50), U(50), R , B, TT, UU, DD, Y(50), UE, U0
REAL*8 A1, A2, F, X, D(50)
INTEGER I, N, Z, INTMAX
CHARACTER*8 ARQ1, ARQ2
COMMON/BLOCO1/B, Z
WRITE(*,1)
1 FORMAT (20X, 'NOME DO ARQUIVO DE ENTRADA DE DADOS')
READ(*,*) ARQ1
OPEN (UNIT=3, FILE=ARQ1, STATUS='OLD', ACCESS='SEQUENTIAL')
WRITE(*,2)
2 FORMAT (20X, 'NOME DO ARQUIVO DE SAÍDA DE DADOS')
READ(*,*) ARQ2
OPEN (UNIT=9, FILE=ARQ2, STATUS='NEW', ACCESS='SEQUENTIAL')
WRITE(*,4)
4 FORMAT (20X, 'NÚMERO DE TERMOS DO ARQUIVO')
READ(*,*) N
WRITE(*,5)
5 FORMAT (20X, 'NÚMERO DE TERMOS DA SÉRIE')
READ(*,*) Z
WRITE(*,7)
7 FORMAT (20X, 'ENTRE COM OS VALORES DE EU E U0')
READ(*,*) EU, U0
DO 10 I = 1 , N
    READ(3,*) T (I), U (I)
10 CONTINUE
    R= 1.73
    INTMAX=400
    B= (3.1416**2)/(R**2)
    DO 11 I = 1 , N
        Y(I) = (U(I) - UE) / (U0 - UE)
11 CONTINUE
    A2 = 1.0
    DO 15 I = 1 , N
        A1 = 0.000000001
        UU = Y(I)
        TT = T(I)
        CALL REFAL (A1, A2, UU, TT, X, INTMAX)
        A2=X
        D (I) = X
        PRINT*, 'D (I)=', I, X
15 CONTINUE
    DO 25 I = 1 , N
        WRITE(9,20) T (I), U (I), D(I)
20 FORMAT (2X, F6.2, 5X, F9.5, 5X, F13.11)
25 CONTINUE
    CLOSE (UNIT=3, STATUS = 'KEEP')
    CLOSE (UNIT=9, STATUS = 'KEEP')
    STOP
    END

```

```

DOUBLE PRECISION FUNCTION FUNÇAO (T, U, X)
REAL T, U, SOMAF, SS

```

```

REAL*8 X, TMP, QW
INTEGER Z
COMMON/BLOCO1/B, Z
SOMAF=0
DO 40 I = 1, Z
  SS = I
  TMP = -(SS**2)*B*X*T/60
  QW = DEXP (TMP)
  SOMAF= SOMAF +(1/(SS**2))*QW
40 CONTINUE
  FUNÇAO = 0.608*SOMAF - U
  RETURN
  END

SUBROUTINE REFAL (A1, A2, U, T, X, INTMAX)
REAL*8 F, FA, FB, RELAT, DIFFA, DIFF
REAL*8 A1, A2, X
INTEGER I, INT, INTMAX
DO 16 I = 1, 2, 1
  IF (I.EQ.1) THEN
    X = A1
    F = FUNÇAO (T, U, X)
    FA = F
  ELSE
    X = A2
    F = FUNÇAO (T, U, X)
    FB = F
  ENDIF
16 CONTINUE
  INT = 1
  FTOL = F
  RELAT = ABS (X - A1)
30 IF ((ABS(FTOL) .GT.1E-16) . AND . (RELAT. GT . 1E - 16) . AND.
  ( INT. LE. INTMAX)) THEN
  DIFFA = A2 - A1
  DIFF = FB - FA
  X= A1 - (( A2 - A1) * FA) / (FB - FA)
  F = FUNÇAO (T, U, X)
IF (F * FA. LT. 0) THEN
  RELAT = ABS ( X- A1)
  A2 = X
  FB = F
  FTOL = F
ELSE
  A1 = X
  FA = F
  FTOL = F
ENDIF
  INT = INT + 1
  GO TO 30
ENDIF
  RETURN
  END

```

APÊNDICE IV

Gráficos da evolução de temperatura de aquecimento para cálculos de condutividade

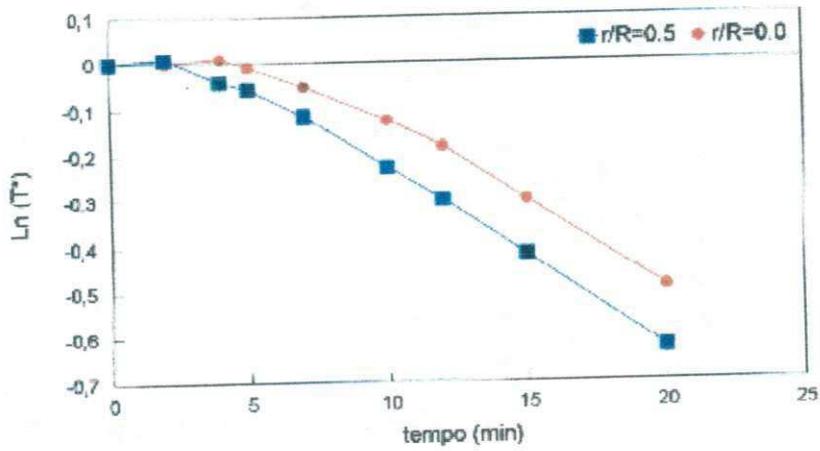


Figura 1 – Experimento 01 – Temp. 80°C

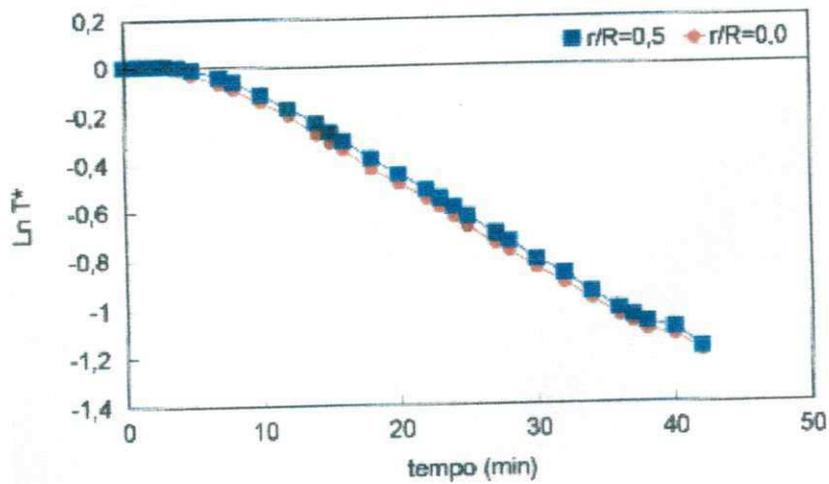


Figura 2 – Experimento 02 – Temp. 75°C

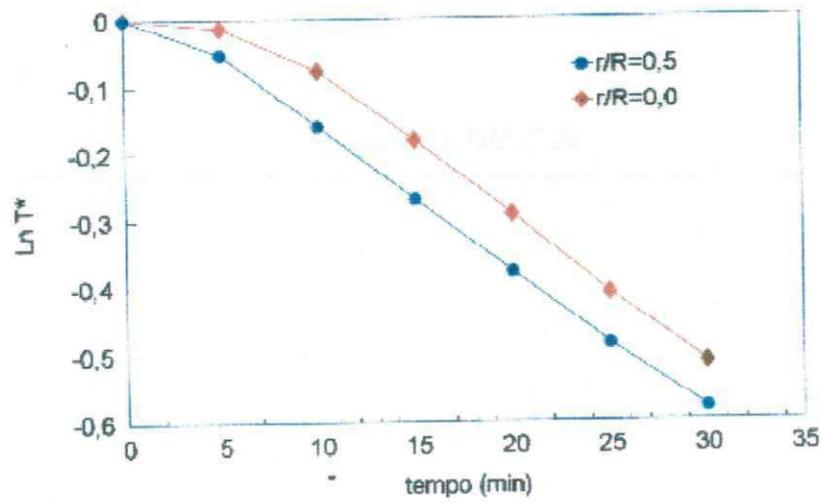


Figura 3 – Experimento 03 – Temp. 65°C