

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

PROCESSO DE SECAGEM DE BANANA

(*Musa acuminata* subgrupo Cavendish cultivar Nanica):

PARÂMETROS ÓTIMOS NA OBTENÇÃO DE BANANA-PASSA

Regina Isabel Nogueira ⁷¹⁶⁸⁷
Engenheira de Alimentos

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final
da dissertação defendida por Regina Isabel
Nogueira e aprovada pela Comissão Julga-
dora em 18 de dezembro de 1991.
Campinas, 06 de janeiro de 1992.

Orientador:
Prof. Dr. Kil Jin Park^t

~~Presidente da Banca~~

Dissertação apresentada como cumprimento parcial dos
requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia
Agrícola: área de concentração - Pré-Processamento de
Produtos Agropecuários.

Campinas - SP

Dezembro - 1991

9204505/3C

PROCESSO DE SECAGEM DE BANANA

(*Musa acuminata* subgrupo Cavendish cultivar Nanica):

PARÂMETROS ÓTIMOS NA OBTENÇÃO DE BANANA-PASSA

REGINA ISABEL NOGUEIRA

Campinas, 18 de dezembro de 1991

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Kil Jin Park - orientador - FEAGRI/UNICAMP

Profa. Dra. Enny Therezinha Martucci - FEA/UNICAMP

Prof. Dr. Sylvio Luís Honório - FEAGRI/UNICAMP

à minha família

AGRADECIMENTOS

- À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) pela oportunidade concedida.
- Ao Prof Dr. Kil Jin Park, pela orientação, incentivo e principalmente pela força e amizade durante a realização do trabalho.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.
- Ao Engenheiro Felix Emilio Prado Cornejo pela amizade e importante ajuda na montagem do experimento, tanto na construção do secador laboratorial quanto na condução dos testes.
- Aos técnicos da EMBRAPA/CTAA: Sérgio Macedo Pontes e Cláudio Souza Silva pela colaboração durante a realização dos testes experimentais e análises de controle de processo.
- Ao colega Argemiro de Castro Villaça pela colaboração durante o levantamento dos dados experimentais.

- Ao Engenheiro Ricardo Almeida de Mendonça Küsel do Centro de Computação da UNICAMP pela importante colaboração durante a fase de análise de dados, na implementação dos programas SAS (estatístico e gráfico).

- Ao Prof. Dr. Sylvio Luis Honório pela colaboração na versão do resumo do trabalho para o idioma inglês.

- Ao Prof. Dr. João Domingos Biagi pelo acompanhamento em algumas fases do trabalho.

- Aos companheiros Arcênio Sattler e Pedro Henrique Weirich Neto pela força e amizade.

- Às funcionárias Rosangela Gomes e Vânia Aparecida Bellodi Sant'Ana Furlan pela paciência, colaboração na digitação e finalização do trabalho.

- A todos que me incentivaram.

SUMÁRIO

	Página
Agradecimentos.....	iv
Sumário.....	vi
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xi
Lista de Símbolos.....	xv
Resumo.....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo geral.....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Matéria-prima.....	5
3.2. Umidade de equilíbrio.....	9
3.3. Secagem.....	21
3.3.1. Cálculo da cinética de secagem.....	28
3.3.1.1. Período de secagem à taxa constante....	29
3.3.1.2. Período de secagem à taxa decrescente..	29
3.3.2. Novo método para o cálculo do tempo de secagem.....	32
3.4. Normalização.....	32

4. MATERIAL E MÉTODOS.....	35
4.1. Material.....	35
4.1.1. Matéria-prima.....	35
4.1.2. Local de realização dos testes experimentais	35
4.1.3. Equipamentos e vidrarias para o levantamento da unidade de equilíbrio.....	36
4.1.4. Equipamento usado para o levantamento das curvas de secagem.....	37
4.1.5. Outros equipamentos de medição.....	37
4.2. Métodos.....	40
4.2.1. Unidade de equilíbrio.....	40
4.2.2. Curva de secagem.....	41
4.2.3. Composição centesimal da matéria-prima.....	42
4.3. Tratamento de dados experimentais.....	43
4.3.1. Modelos utilizados para ajuste das curvas...	43
4.3.1.1. Unidade de equilíbrio.....	43
4.3.1.2. Curvas de secagem.....	47
4.3.1.2.1. Modelo difusional.....	47
4.3.1.2.2. Modelo empírico de cinética de seca- gem: equação de Sazhin.....	49
4.3.1.3. Taxa de secagem.....	51
4.3.1.3.1. Modelo difusional.....	51
4.3.1.3.2. Modelo empírico.....	51
4.3.1.3.3. Uso de funções splines cúbicas.....	52
4.3.1.4. Normalização.....	53
4.3.2. Softwares.....	54

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
5.1. Composição centesimal da matéria-prima.....	55
5.2. Umidade de equilíbrio.....	56
5.3. Umidade relativa.....	60
5.4. Modelo difusional.....	61
5.5. Energia de ativação.....	80
5.6. Modelo empírico para determinação do tempo de secagem.....	83
5.7. Taxa de secagem.....	85
5.7.1. Modelo difusional.....	85
5.7.2. Modelo empírico.....	86
5.7.3. Uso de funções splines cúbicas.....	86
5.8. Normalização.....	89
6. CONCLUSÕES.....	91
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
8. ABSTRACT.....	100
9. ANEXOS.....	101
Anexo A.....	102
Anexo B.....	103
Anexo C.....	108
Anexo D.....	125
Anexo E.....	128
Anexo F.....	131

Anexo G.....	134
Anexo H.....	139
Anexo I.....	144
Anexo J.....	149

LISTA DE FIGURAS

Figura no.	Assunto	Página
3.1	Evolução do tempo (t), do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T), e da velocidade de secagem (dX/dt), para ar com propriedades constantes.....	22
4.1	Aparelho laboratorial para controle de perda de umidade.....	38
4.2	Detalhe interno do aparelho mostrando a bandeja para colocação da amostra e as resistências de aquecimento e ventilador.....	39
5.1	Matéria-prima utilizada no teste: banana (<u>Musa acuminata</u> subgrupo Cavendish cultivar Nanica).....	73
5.2	Vista interna do secador de bandejas.....	74
5.3	Secador carregado para o início do teste....	75
5.4	Prensagem da banana-passa para homogeneização..	76
5.5	Banana-passa pronta para comercialização.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela no.	Assunto	Página
5.1	Composição centesimal média da banana (<u>Musa acuminata</u> subgrupo Cavendish cultivar Nanica) fresca.....	55
5.2	Valores experimentais de umidade de equilíbrio para dessorção de água de banana (<u>Musa acuminata</u> subgrupo Cavendish cultivar Nanica) para as temperaturas de 50, 60 e 70°C, e atividades de água entre 0,1144 e 0,8439.....	57
5.3	Parâmetros estimados por regressão direta do modelo original de BET para atividades de água entre 0,1144 e 0,8439 para banana (<u>Musa acuminata</u> subgrupo Cavendish cultivar Nanica).....	57
5.4	Parâmetros estimados por regressão direta do modelo original de BET para atividades de água entre 0,1144 e 0,7032 para banana (<u>Musa acuminata</u> subgrupo Cavendish cultivar Nanica).....	59
5.5	Parâmetros estimados por regressão direta do modelo de GAB para atividades de água entre 0,1144 e 0,7032 para banana (<u>Musa acuminata</u> subgrupo Cavendish cultivar Nanica).....	59
5.6	Valores de UR do ar no interior do secador laboratorial em função da temperatura e velocidade do ar de secagem.....	61

5.7	Valores de difusividade efetiva obtidos pelo modelo difusional para $n=1$, $n=2$, $n=3$, $n=4$, a partir do ajuste das curvas de secagem de banana (<u>Musa acuminata</u> subgrupo Cavendish cultivar Nanica).....	64
5.8	Valores de difusividade efetiva obtidos pelo modelo difusional para $n=5$, $n=10$, $n=15$, $n=20$, a partir do ajuste das curvas de secagem de banana (<u>Musa acuminata</u> subgrupo Cavendish cultivar Nanica).....	64
5.9	Porcentagem de erro em relação ao valor de difusividade efetiva, estimada para toda a faixa experimental das curvas de secagem..	64
5.10	Valores de difusividade efetiva obtidos pelo modelo difusional para $n=1$, $n=2$, $n=3$, $n=4$, a partir do ajuste das curvas de secagem de banana (<u>Musa acuminata</u> subgrupo Cavendish cultivar Nanica), até umidade comercial (25%).....	66
5.11	Valores de difusividade efetiva obtidos pelo modelo difusional para $n=5$, $n=10$, $n=15$, $n=20$, a partir do ajuste das curvas de secagem de banana (<u>Musa acuminata</u> subgrupo Cavendish cultivar Nanica), até umidade comercial (25%).....	66
5.12	Porcentagem de erro em relação ao valor de difusividade efetiva, estimada para dados até umidade comercial (25%) das curvas de secagem....	66
5.13	Intervalo de confiança para valores de difusividade efetiva estimados a partir do modelo difusional ($n=5$) para dados completos..	67
5.14	Porcentagem de incremento na difusividade efetiva devido à variação de velocidade para dados completos.....	69
5.15	Porcentagem de incremento na difusividade efetiva devido à variação de temperatura para dados completos.....	70

5.16	Intervalo de confiança para valores de difusividade efetiva estimados a partir do modelo difusional (n=5), com dados até umidade comercial (25%).....	72
5.17	Porcentagem de incremento na difusividade efetiva devido à variação de velocidade para dados até umidade comercial (25%)...	78
5.18	Porcentagem de incremento na difusividade efetiva devido à variação de temperatura para dados até umidade comercial (25%)...	78
5.19	Equação das retas obtidas pela regressão linear, para o cálculo da energia de ativação para toda a faixa experimental das curvas de secagem.....	81
5.20	Equação das retas obtidas pela regressão linear, para o cálculo da energia de ativação para dados até umidade comercial (25%) das curvas de secagem.....	81
5.21	Valores de energia de ativação para toda faixa experimental e até umidade comercial (25%) das curvas de secagem, em função da velocidade do ar.....	82
5.22	Valores da umidade de equilíbrio inicial (X _{1e}) e da constante K, obtidos pela equação de Sazhin a partir das curvas de secagem de banana (<u>Musa acuminata</u> subgrupo Cavendish cultivar Nanica).....	84
5.23	Intervalo de tempo, t, de localização de X _{1e} nas curvas de secagem de banana (<u>Musa acuminata</u> subgrupo Cavendish cultivar Nanica).....	85
5.24	Valores de taxa de secagem obtidos pelas funções splines cúbicas nos "nós" entre cada intervalo, para a temperatura de 50°C e velocidades do ar 0,5, 1,0 e 1,5m.s ⁻¹	87

5.25	Valores de taxa de secagem obtidos pelas funções splines cúbicas nos "nós" entre cada intervalo, para a temperatura de 60°C e velocidades do ar 0,5, 1,0 e 1,5m.s ⁻¹	87
5.26	Valores de taxa de secagem obtidos pelas funções splines cúbicas nos "nós" entre cada intervalo, para a temperatura de 70°C e velocidades do ar 0,5, 1,0 e 1,5m.s ⁻¹	88

LISTA DE SÍMBOLOS

- a - constante definida na equação (6)
- AW - atividade de água na equação (6)
- b - constante definida na equação (6)
- C - constante definida na equação (1)
- d - constante definida na equação (6)
- D - difusividade ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
- H1 - calor de sorção da primeira camada ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)
- H2 - calor de sorção das camadas polimoleculares ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)
- HL - calor de liquefação ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)
- K - constante definidas nas equações (5), (10) e (14)
- n - número de camadas moleculares definida na equação (2)
- p - pressão de vapor de água (mmHg)
- r - raio (m)
- t - tempo (h)
- T - temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- UR - umidade relativa (%)
- v - velocidade do ar ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- X - conteúdo de umidade ($\text{gH}_2\text{O/gms}$)
- XM - conteúdo de umidade na monocamada ($\text{gH}_2\text{O/gms}$)
- y - taxa de secagem ($\text{gH}_2\text{O/gms} \cdot \text{s}$)

SUB-ÍNDICES

- e - equilíbrio
- o - inicial
- s - saturação
- ie - pseudo-crítico
- bs - bulbo seco
- bu - bulbo úmido

RESUMO

O processo de secagem de banana (*Musa acuminata* subgrupo Cavendish cultivar Nanica), para obtenção de banana-passa, foi realizado utilizando três temperaturas (50, 60 e 70°C) e três velocidades do ar (0,5, 1,0 e 1,5 m.s⁻¹). Os dados experimentais de secagem foram ajustados usando o modelo difusional para a forma cilíndrica, onde a utilização dos cinco primeiros termos da série de Fourier mostrou ser suficiente. Os valores de difusividade efetiva situaram-se entre $2,62 \times 10^{-10}$ e $6,53 \times 10^{-10}$ m².s⁻¹. A energia de ativação calculada para as temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidades do ar de 1,0 m.s⁻¹ foi de 25 kJ.mol⁻¹. A equação empírica de Sazhin mostrou ser inadequada para o ajuste das curvas de secagem. Não foi possível a normalização das curvas de secagem utilizando a conceitualização da adimensionalização da taxa de secagem através do quociente da taxa correspondente ao período decrescente e da taxa constante de secagem. As isotermas de dessorção de umidade da banana foram ajustadas usando o modelo original de BET com o número de camadas polimoleculares igual a cinco, para as temperaturas 50, 60 e 70°C e atividade de água entre 0,11 e 0,70.

1. INTRODUÇÃO

A banana é um produto facilmente digerível e fornece aproximadamente 100 calorias por 100 gramas de polpa de fruta, MEDINA (1978).

Além do consumo da fruta fresca, vários produtos podem ser obtidos a partir da banana, tais como purês (destinados basicamente para o mercado externo), sucos, néctares, compotas, doces diversos e produtos desidratados (farinha, flocos e passa).

Embora não existam dados oficiais com relação a este último segmento industrial, sabe-se através de contatos com vários produtores, que estas indústrias se caracterizam pela simplicidade e pelo uso de processos praticamente artesanais. São desconhecidas tecnologias alternativas mais simples que possam contribuir no sentido de se obter novos produtos de banana, de equipamentos que se destinem a estes processos e também de embalagens e condições de armazenamento do produto. Existe muita improvisação e adaptação de equipamentos que muitas vezes não são fabricados com material indicado para o processamento de alimentos.

Tem-se notícia, segundo FILGUEIRAS (1990), com relação ao Estado de São Paulo, que uma das mais importantes e tradicionais fábricas de doces do país, situada em Santos, produz anualmente 600 toneladas de produtos de banana diversos: balas, bombons, banana-passa, banana em pó, banana cristalizada, e outros itens vendidos no mercado interno. Outra fábrica situa-se em Registro e produz mensalmente 5 toneladas de banana-passa e 3 toneladas de banana frita. Esta última fábrica espera crescer para 30 toneladas mensais de produtos industrializados em 1991, quando pretende exportar para Europa e Estados Unidos.

Os produtores defrontam-se com um problema de comercialização, principalmente nos "picos" de safra, quando se verifica o aumento de oferta e a diminuição de demanda. A saída, até o momento, tem sido adequar seu volume de produção às encomendas de grandes compradores, como redes de supermercados, prefeituras do interior (que destinam o produto à merenda escolar), e o fornecimento de polpa para indústrias de doces.

Uma alternativa para estes produtores seria o acesso a tecnologias mais simples de industrialização de produtos de banana. Dentre estas tecnologias de processamento de banana, existe uma grande busca por parte de pequenos produtores com relação a informações sobre equipamentos de processamento de banana-passa.

A banana-passa pode ser obtida da secagem natural ou forçada de banana madura, sendo as cultivares Nanica e Nanicão as matérias-primas mais utilizadas nestes processos.

Com o objetivo de possibilitar às pequenas indústrias e produtores acesso à tecnologia de industrialização de banana, para a obtenção de banana-passa de boa qualidade, além de expandir o fornecimento de energia no Vale do Ribeira, a COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO (CESP) (1986), projetou um secador elétrico. Apesar da pequena capacidade deste secador, o investimento necessário para sua aquisição era ainda um fator limitante ao pequeno produtor.

O fato da maioria dos equipamentos disponíveis no mercado para industrialização deste produto terem grande capacidade e alto custo, tem levado pequenos produtores, muitas vezes com pouco conhecimento técnico, a construírem seus próprios equipamentos. O resultado é a obtenção de produtos de baixa qualidade, com alto custo de produção, conforme o relatado no artigo BANANA (1978).

É importante portanto, conhecer a influência dos parâmetros envolvidos na secagem da banana, e consequentemente da obtenção dos parâmetros ótimos do processo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é determinar os parâmetros de processo na secagem de banana (Musa acuminata subgrupo Cavendish cultivar Nanica) através de um secador em escala de laboratório, para obtenção de banana-passa.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta investigação são:

- Determinar as isotermas de dessorção para a banana;
- Estudar a cinética de secagem da banana;
- Obter parâmetros ótimos para obtenção de banana-passa.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Matéria-prima

Segundo a ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO (FAO) (1990), o Brasil é o maior produtor e consumidor de bananas do mundo, onde anualmente são produzidos de 5 a 7 milhões de toneladas.

A importância desta cultura é tal que, no Brasil, cerca de 3 milhões de pessoas (produtores e seus familiares) dependem diretamente dessa cultura, segundo estimativa do Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura (CNPMP) da EMBRAPA, apresentada por FILGUEIRAS (1990), onde tem-se que as maiores plantações ficam nos Estados da Bahia, São Paulo, Ceará, Pernambuco, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Santa Catarina.

Do ponto de vista comercial (FILGUEIRAS, 1990), as cultivares Prata, Pacovã (uma mutação mais resistente da prata), Maçã, Nanica, Nanicão e Da Terra dominam o mercado interno, e seus cultivos estão relacionados com a preferência do consumidor em cada região, à resistência

às doenças e adaptação ao clima. Nas regiões Norte e Nordeste, 70% da produção são do fruto da cultivar Prata, 20% são da cultivar Maçã e 10% são da cultivar Da Terra. Nos Estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro a produção da cultivar Prata é dominante. Já os Estados de São Paulo e Santa Catarina são grandes produtores das cultivares Nanica e Nanicão. Estas variedades são as únicas exportadas, pois preenchem os requisitos do comércio internacional quanto ao sabor, qualidade e tamanho.

Segundo o artigo FRUTAS FRESCAS (1985), uma quantidade menor que 3% do total de bananas do mercado internacional foi exportada pelo Brasil, contrastando com o Equador que atinge 45%, Honduras 54% e Costa Rica 72%, deste total. O volume não é maior devido às barreiras tarifárias impostas por alguns países e à forte presença de cartéis multinacionais atuando principalmente na Europa. O mercado brasileiro fica limitado aos mercados da Argentina e do Uruguai.

Sabe-se que a banana está sujeita a grandes flutuações de preço durante o ano. A cotação dos preços depende do volume de exportação e das vendas feitas diretamente a grandes compradores, como os supermercados.

Assim a industrialização como suporte à agricultura faz-se necessária para o aproveitamento dos excedentes de produção.

Na industrialização da banana podem ser obtidos os seguintes produtos: purê (na forma de congelado, asséptico, acidificado e preservado quimicamente), néctar, fruta em calda, produtos desidratados (liofilizado, em flocos e passa), e doces diversos incluindo geléia e doce em massa (bananada).

Sendo a banana uma matéria-prima que sofre rapidamente reações de origem química e enzimática durante seu processamento, alguns cuidados devem ser tomados para evitar tal fato, dependendo do produto que se deseja obter.

MEDINA (1978) apresentou a seguinte composição para banana madura, valores convertidos para base seca (%): umidade: 309,84, açúcares totais: 83,61, amido: 4,92, fibra: 2,46, proteína: 4,92, matéria graxa: 0,80, cinza: 13,28.

O tempo de conservação da banana vai depender do estadio de desenvolvimento em que foi colhida.

A colheita da banana está relacionada com as condições climáticas e aos tratos culturais. Contudo este período pode variar, pois a banana pode ser colhida em vários estadios de desenvolvimento, dependendo do destino que se pretende dar à fruta.

MEDINA (1978) apresentou os estadios de maturação da banana:

Estadio magro: bananas com desenvolvimento incompleto e quinas salientes, impróprias para o consumo;

- . Estadio 3/4: bananas com quinas, porém os lados são mais longos e ligeiramente arredondados;
- . Estadio 3/4 gordo: bananas não apresentam quinas e as faces são arredondadas; e
- . Estadio gordo: bananas cheias e completamente arredondadas.

Com relação à maturação da banana BLEINROTH (1978), relatou que quando esta operação é realizada em câmaras, é de máxima importância o controle da temperatura para evitar a danificação dos tecidos e alterações sensoriais das frutas. Para bananas que se destinam ao mercado de consumo de fruta fresca é recomendada a temperatura de 18°C, e para industrialização 20°C, sendo o tempo diretamente correlacionado com estas temperaturas, isto é, a maturação é mais rápida para temperaturas mais altas e mais lenta para as mais baixas. A umidade relativa é outro fator indispensável no ambiente de maturação, sendo recomendada que esta esteja entre 85% e 95%. Existem diversos gases que são utilizados para ativar e provocar uma maturação uniforme, mas que não participam das reações químicas que se processam no interior da fruta, sendo os principais o gás etileno, o gás acetileno e o gás azetil, que é uma mistura de etileno e nitrogênio.

3.2 Umidade de Equilíbrio

Vários autores, tais como LABUZA (1968), NGODDY e BAKKER-ARKEMA (1970), TEIXEIRA NETO e QUAST (1977) relatam que uma característica fundamental de materiais biológicos, que influencia todo aspecto de manuseio, armazenagem, processamento e consumo de produtos alimentares é sua higroscopicidade.

O conteúdo de umidade de equilíbrio é particularmente importante na secagem porque representa o valor limite para uma dada condição de umidade relativa e temperatura. Sem desconsiderar outras definições, a umidade de equilíbrio de um material pode ser interpretada como sendo o conteúdo de umidade que este apresenta quando a pressão de vapor de água em sua superfície iguala-se à pressão de vapor de água no ar que o envolve, TREYBAL (1968).

Se um alimento for seco até um conteúdo de umidade menor que aquele que normalmente possui quando em equilíbrio com o ambiente, este retornará ao seu valor de equilíbrio na armazenagem ou manipulação, se precauções especiais não forem tomadas, CHEN (1971).

LEWIS (1921) introduziu o conceito de umidade de equilíbrio na secagem, relacionando a taxa de secagem com a umidade livre, ou seja, o conteúdo total de umidade menos a umidade de equilíbrio.

Uma isoterma de sorção é obtida quando se plota o conteúdo de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa ou atividade de água de um material, a uma dada temperatura. Esta curva pode ser obtida em duas direções (LABUZA, 1968): isoterma de adsorção, que é obtida quando um material completamente seco é colocado em várias atmosferas com incremento de umidade relativa onde é medido o aumento de peso devido ao ganho de água, e a isoterma de dessorção que é obtida quando o material inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições de ambiente criadas para a adsorção sendo medida a diminuição de peso, pela perda de água.

Uma isoterma de sorção pode ser dividida em três regiões, dependendo do estado físico da água presente. A primeira região cobre uma faixa de atividade de água entre zero e 0,35 e representa a adsorção monomolecular de um filme de água. A segunda região cobre a faixa de 0,35 a 0,60 de atividade de água, e representa a adsorção das camadas adicionais de água acima da monocamada. Finalmente a terceira região, acima de 0,60 representa a água condensada nos poros do material seguida pela dissolução de materiais solúveis presentes, LABUZA (1968) e LOMAURO, BAKSHI e LABUZA (1985).

Para a determinação experimental da umidade de equilíbrio é necessário um ambiente condicionado. Compostos químicos tais como soluções aquosas de ácido sulfúrico e soluções saturadas de sais têm sido largamente empregadas

para o controle da umidade relativa (UR) do ambiente, sendo que:

$$UR = p/p_o * 100 = AW * 100$$

onde:

p - pressão de vapor exercida pelo material

p_o - pressão de vapor da água pura na temperatura T_o

T_o - temperatura de equilíbrio do sistema

AW - atividade de água

GREENWALT (1925), apresentou uma revisão de trabalhos cujos autores que avaliaram a pressão parcial de vapor, que pode ser traduzida pela saturação relativa, para várias concentrações de ácido sulfúrico em função da temperatura.

BRAY (1970) apresentou uma tabela contendo as atividades de água de soluções aquosas de ácido sulfúrico em função da concentração (% em massa), densidade (g/cm^3) a 25°C e temperatura (°C).

KOSOSKI (1977) mostrou a viabilidade do uso de soluções de ácido sulfúrico e de etileno glicol para o controle das condições ambientais na determinação do equilíbrio higroscópico de grãos.

GÁL (1975) apresentou uma revisão e uma classificação dos métodos para mensurar isotermas de sorção em materiais sólidos de todos os tipos:

A - Métodos Gravimétricos - consiste na determinação da mudança de peso das amostras em equilíbrio com diferentes pressões de vapor.

A.1. Métodos com registro contínuo de mudança de peso: a balança é uma parte fixa do sistema e as mudanças de peso podem ser continuamente determinadas, sem a interrupção do processo de sorção.

A.2. Sistemas dinâmicos: a circulação de ar transfere o vapor de água para a amostra (adsorção) e da amostra para o ar (desorção). A maioria destes equipamentos tem sido automatizados, permitindo programação e controle da UR e automação da operação de pesagem.

A.3. Métodos com registro descontínuo de mudança de peso: a balança não é uma parte fixa do sistema, e as amostras são condicionadas em diferentes umidades relativas e o seu conteúdo de umidade é determinado por métodos apropriados em operações separadas. Com estes métodos é possível o exame visual das amostras, sendo possível detectar mudanças físicas como endurecimento, encolhimento, etc.

A.3.1. Sistemas estáticos: as amostras são colocadas em dessecadores contendo soluções saturadas de sais ou soluções aquosas de ácido sulfúrico até atingir o equilíbrio.

A.3.2. Sistemas dinâmicos: vários equipamentos foram construídos com o mesmo princípio do sistema estático com a adição de um ventilador ao conjunto, para permitir a circulação do ar entre as amostras, diminuindo o tempo para atingir o equilíbrio.

B - Métodos Manométricos e Higrométricos: usados para rápida determinação de atividade de água em processos de controle de qualidade.

C - Métodos Especiais: são métodos não-convencionais, para materiais com alto conteúdo de umidade, onde a atividade de água é medida por uma membrana de célula de pressão.

DENLOY e ADE JOHN (1985) apresentaram um equipamento de leito fluidizado que pode ser usado para determinar isotermas de sorção de umidade em alimentos granulares, testado para milho, ervilha, amendoim e soja nas temperaturas 30, 40 e 50°C.

TEIXEIRA NETO e QUAST (1977) determinaram as isotermas de adsorção pelo método estático, onde os ambientes

foram controlados por soluções saturadas de sais e soluções aquosas de ácido sulfúrico, de 40 alimentos incluindo os grupos: açúcar de diferentes características físicas e químicas, castanha de caju, café com diferentes graus de torração, mate, guaraná, cacau em pó, coco ralado, produtos de banana, produtos cárneos salgados e sal de cozinha.

Umidade de equilíbrio usando soluções de sais a 27°C foram obtidas para 16 produtos alimentícios de baixa umidade por KUMAR e BALASUBRAHMANYAM (1986). Eles dividiram os produtos em quatro grupos baseados em seu maior constituinte como amido, gordura, proteína, e aqueles que são altamente higroscópicos, relacionando aspectos de estabilidade na armazenagem com atividade de água.

LABUZA (1968) discorrendo sobre o efeito da composição dos alimentos na forma das isotermas, sugeriu que em muitos casos a quantidade de água sorvida para uma atividade de água pode ser obtida pela soma do peso percentual de cada componente vezes a quantidade que este teria sorvido isoladamente.

Partindo deste conceito, IGLESIAS, CHIRIFE e BOQUET (1980) estudaram isotermas de sorção de modelos de alimentos elaborados com diferentes constituintes, conhecendo o comportamento da sorção de seus componentes. Concluíram que em alguns casos as isotermas preditas para o produto apresentaram resultados satisfatórios enquanto que para outros os valores preditos do conteúdo de umidade de

equilíbrio foram significativamente maiores que para os valores obtidos experimentalmente, pois as interações entre os principais constituintes reduziram a capacidade de ligação de água.

IGLESIAS e CHIRIFE (1982) realizaram uma compilação contendo mais de 1000 gráficos de isotermas de alimentos e de componentes de alimentos, com a descrição matemática para a maioria delas.

IGLESIAS, CHIRIFE e LOMBARDI (1975) mostraram que a equação de adsorção nas multicamadas, que originalmente foi desenvolvida para adsorção física em superfícies não-uniformes, por HALSEY (1948), pode ser usada para descrever as isotermas de sorção para uma grande variedade de alimentos e seus componentes, tais como: alimentos ricos em amido, alimentos proteicos, alimentos com alto teor de açúcar, sementes oleaginosas, etc.

BRUNAUER, EMMETT e TELLER (1938), partindo do conceito de Langmuir de adsorção na monocamada molecular, sugeriram um modelo para descrever a adsorção multimolecular. Este modelo foi originalmente desenvolvido dos princípios termodinâmicos para adsorção física de gases não-polares em uma superfície metálica homogênea. Tecem considerações sobre o fenômeno concluindo que as forças que produzem a condensação são as principais responsáveis pela energia de ligação deste modelo de adsorção.

IGLESIAS e CHIRIFE (1976) calcularam o conteúdo de umidade na monocamada de BET (X_m) a partir dos dados de literatura de isotermas de sorção de umidade para uma grande variedade de alimentos e componentes de alimentos através do modelo linearizado de BET. Concluíram que o valor de X_m diminui significativamente com o aumento da temperatura, e que isto pode ser atribuído à redução do número de zonas ativas como resultado de mudanças físicas e/ou químicas induzidas pela temperatura.

MAZZA e Le MAUGER (1978) obtiveram isotermas de sorção de vapor de água de cebola amarela desidratada para as temperaturas de 10, 30 e 45°C. Foram calculados os valores da monocamada de BET, calor de sorção e área da superfície do sólido através do modelo linearizado de BET. A partir dos parâmetros estimados foram calculadas as funções termodinâmicas como entropia molar e calor de sorção no equilíbrio. O calor isostérico de adsorção e dessorção foi estimado a partir da equação de Clausius-Clapeyron.

MAZZA (1980) efetuou considerações termodinâmicas sobre a sorção de vapor de água de raízes de rábano silvestre frescas, liofilizadas e secas a vácuo, nas temperaturas de 10 a 40°C e atividades de água variando de 0,11 a 1,00. Foram estimados, a partir do modelo de BET linearizado, os valores da monocamada de BET com o calor isostérico de sorção, a entropia molar e o calor de sorção do equilíbrio.

TOUPIN, Le MAUGER E MCGREGOR (1983) avaliaram a confiabilidade de diferentes métodos estatísticos para estimar as constantes de BET a partir de dados das isotermas de sorção de batata. Foi utilizado o modelo não-linear de BET e o modelo de BET linearizado, com a adição de fatores de correção e ponderação para promover a otimização dos parâmetros. Os resultados mostraram que o método ponderado de regressão não-linear pelo procedimento dos mínimos quadrados, é a técnica mais confiável e que a transformação linear deve ser evitada na estimação de parâmetros.

JAAFAR e MICHALOWSKI (1990), consideraram que embora a equação de BET seja justificada fenomenologicamente, o problema maior em sua aplicação é conhecer qual o valor do número máximo de camadas moleculares adsorvidas quando a umidade relativa é 100%. Partindo desta justificativa, desenvolveram uma equação para isotermas de sorção, contendo três constantes, uma constante relacionado com a umidade correspondente à monocamada, X_m , uma constante relacionada com o efeito térmico de adsorção, C , e uma constante K que introduz informações adicionais com relação ao calor de condensação e as multicamadas moleculares.

YOUNG (1976) avaliou os modelos: de BET, de Chung Pfoest, de Henderson e de Smith, contendo dois parâmetros, e um modelo com três parâmetros desenvolvido por ele para ajustar dados experimentais de adsorção e dessorção do conteúdo de umidade de equilíbrio para isotermas de

sementes e cascas de amendoim, nas temperaturas de 15, 25, 35 e 45°C. A equação de Smith e a equação de Young apresentaram melhor ajuste que as demais.

BOQUET, CHIRIFE e IGLESIAS (1978) avaliaram a aplicação de oito equações com dois parâmetros para descrever isotermas de vários tipos de alimentos. A avaliação foi feita a partir de 39 isotermas de alimentos publicadas na literatura para frutas, carnes, produtos de leite, proteínas, alimentos ricos em amido e vegetais. Os autores concluíram ser possível propor as melhores equações para ajustar dados experimentais de sorção para cada grupo de alimento.

Uma equação empírica para ajuste de isotermas de sorção de frutas e alguns produtos correlatos com alto teor de açúcar, relacionando o conteúdo de água sorvida e atividade de água foi proposta por IGLESIAS e CHIRIFE (1978), cuja validade está na faixa de atividade de água de 0,10 a 0,80. Foi verificado que a equação descreve razoavelmente bem o conteúdo de umidade de equilíbrio para banana, beterraba, grapefruit, pessego, pera, abacaxi e morango.

Em um trabalho de revisão, CHIRIFE e IGLESIAS (1978) apresentaram várias equações para ajuste de isotermas de sorção de alimentos e discutiram suas origens, faixas de aplicação, tipos de alimentos utilizados e atividades de água.

Um novo modelo foi introduzido por VAN DEN BERG (1984) denominado Guggenheim-Anderson-de Boer, GAB, que

tem sido largamente empregado para padronizar a descrição e comparação de isotermas de alimentos em laboratórios na Europa Ocidental. De acordo com SCHAR e RUEGG (1985), e MAROULIS, TSAMI, MARINOS-KOURIS et al (1988), o modelo de GAB ajusta uma faixa maior de isotermas que o modelo de BET (1938), por ter mais um parâmetro.

LOMAURO, BAKSHI e LABUZA (1985) verificaram que a equação de GAB pode representar com grande precisão mais que 50% das isotermas de frutas, vegetais e carnes, quando comparada com equações de dois parâmetros.

SHAAR e RUEGG (1985) consideraram que o modelo de GAB é uma extensão do modelo de BET, cujas constantes são usualmente determinadas pela equação transformada de GAB, que é uma parábola. Desta forma realizaram um trabalho que constituiu numa comparação dos dois métodos, efetuando a regressão polinomial do modelo transformado e regressão não-linear do modelo original. Os autores recomendam a análise por regressão não-linear para estimar as constantes de GAB.

SARAVACOS, TSIQURVAS e TSAMI (1986), determinaram isotermas de adsorção de água para uva-passa, a 20, 25, 30 e 35°C. Através dos dados experimentais foram efetuados os ajustes das curvas usando os modelos com 3 parâmetros de GAB, e de Halsey, e o modelo com cinco parâmetros de D'Arcy-Watt. Os autores afirmam que o modelo de GAB descreve bem as isotermas para atividade de água de 0,30 a 0,65, o que corresponde às condições normais de armazenagem comercial de

frutas secas. Já o modelo de Halsey apresentou resultados mais satisfatórios para uma faixa maior de temperatura e atividade de água que o modelo de GAB. Os autores relatam ainda que modelo de D'Arcy-Watt pode ser aplicado para uma faixa de atividade de água de 0,10 a 0,90, mas a necessidade de estimar cinco parâmetros torna-o menos atrativo para uma larga aplicação a materiais alimentícios.

MAROULIS, TSAMI, MARINOS-KOURIS e SARAVACOS (1988) usaram o modelo de GAB para ajustar as isotermas de adsorção de uva-passa, figos, ameixas secas e damascos. Concluíram que a aplicabilidade do modelo tem dependência com o método de regressão empregado, e recomendam a regressão não-linear direta para ajuste das curvas e estimativa das constantes de GAB, pois esta permitiu melhor precisão nos resultados.

NGODDY e BAKKER-ARKEMA (1970) partindo da premissa da não existência na literatura de um modelo genericamente satisfatório de sorção de água para materiais biológicos, iniciaram uma série de estudos no sentido de construir uma equação de isoterma para estes materiais a partir das teorias de BET, de condensação capilar e de adsorção potencial.

3.3. Secagem

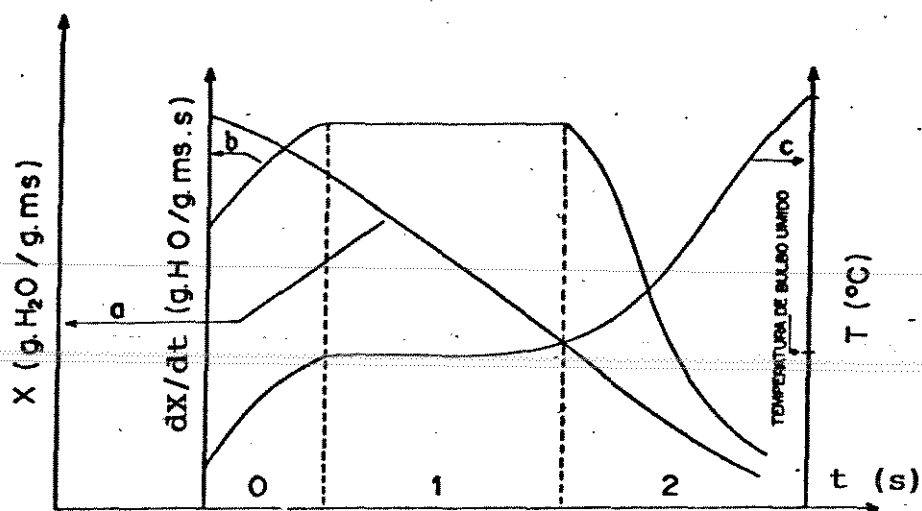
Podemos definir a secagem de um sólido como sendo a remoção do líquido nele contido por evaporação, PERRY (1984).

A secagem de produtos sólidos com ar quente é uma operação unitária muito utilizada nas indústrias agrícolas e alimentícias, tanto pela qualidade como pela diversidade de produtos tratados.

Em termos de secagem, não existe atualmente um método universalmente admitido que permita prever o desempenho de um secador.

DAUDIN (1983), relatou que dentre todas as publicações sobre modelos de secadores, podemos distinguir dois conjuntos: o primeiro contém informações relativas à cinética de secagem do produto, e o segundo define os balanços de calor e massa entre o ar e o produto em função de seus deslocamentos relativos no aparelho.

Enfocando esta operação unitária sob o ângulo da cinética de secagem temos a curva característica:



- a) evolução do teor de água do produto;
- b) cinética de secagem;
- c) evolução da temperatura do produto.

FIGURA 3.1. Evolução do tempo (t), do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T), e da velocidade de secagem (dX/dt), para ar com propriedades constantes.

Fonte: CORNEJO (1987)

No momento em que um produto é submetido à secagem ocorrerá simultaneamente a transferência de calor e massa.

A Figura 3.1 mostra que no início da secagem o produto estando geralmente a uma temperatura mais baixa que o ar, ocorre um período de indução, representado pela região 0. À medida que a temperatura do sólido se eleva, esta imprime uma elevação na taxa de secagem, que continua até que a transferência de calor seja igual à energia necessária para

evaporar a água (transferência de massa). Passando para o período 1, período de taxa constante de secagem, tem-se que a quantidade de água livre no produto é bem grande, sendo a pressão de vapor de água na superfície do produto constante, e sua temperatura igual à temperatura de bulbo úmido. NONHEBEL e MOSS (1971), sugeriram ser a terminologia mais correta "secagem à temperatura de bulbo úmido" ao invés de "período de taxa constante de secagem", porque cada período de taxa constante corresponde a uma condição externa de secagem constante. Este período permanece enquanto a migração de água do interior do produto for suficiente para compensar a perda por evaporação na superfície. Quando a quantidade de água na superfície diminui e conseqüentemente ocasiona um decréscimo na taxa de secagem, tem-se o início do período 2 que descreve o período de taxa decrescente de secagem. Na transição entre o período 1 e o período 2 tem-se o valor do conteúdo de umidade do produto, denominado de conteúdo de umidade crítica (X_{cr}). Como a transferência de calor não é mais compensada pela transferência de massa, ocorre uma elevação da temperatura do produto, e esta tende assintoticamente para a temperatura do ar. Neste período o fator limitante é a migração interna de água. A redução da taxa de secagem é mais frequentemente interpretada pela diminuição da pressão parcial de vapor de água na superfície. A umidade do material tende para a umidade de equilíbrio com o ar.

Segundo Park apud CORNEJO (1987), existem as seguintes teorias para explicar o comportamento da secagem no período de taxa decrescente:

- . Difusional
- . Capilar
- . de Luikov
- . de Philip & de Vries
- . de Krisher-Berger & Pei
- . da Condensação-Evaporação

O autor relatou que as teorias Difusional e Capilar são as duas teorias que fundamentam as demais.

Considerando a teoria difusional, torna-se importante ressaltar que LEWIS (1921) e SHERWOOD (1929a,b) foram os primeiros a interpretar a secagem de sólidos por um fenômeno de difusão de água líquida.

LEWIS (1921), considerou que a secagem do sólido envolve dois processos independentes, onde a evaporação do conteúdo de umidade da superfície do sólido deve ser compensada quantitativamente pela difusão da umidade de seu interior para a superfície. Assumindo condições constantes de secagem, perfil linear do gradiente de concentração de umidade, o autor apresentou a equação diferencial básica relacionando a taxa de secagem com a umidade livre (conteúdo total de umidade menos a umidade de equilíbrio), a espessura do material, um coeficiente relativo

à difusão, e um coeficiente relativo à evaporação na superfície. Segundo o autor, duas situações podem ocorrer: primeiro, quando a resistência à difusão for considerada desprezível em relação a resistência à evaporação na superfície (superfície de evaporação como fator limitante), o encolhimento da superfície e a velocidade do ar terão um efeito significativo, além de ocorrer elevação da temperatura do sólido, e segundo, quando a resistência à evaporação na superfície for desprezível em relação a resistência à difusão (difusão como fator limitante), a velocidade do ar exerce efeito apenas de aumentar a transferência de calor, e a temperatura do material estará bem próxima da temperatura do ar. O fator crítico do processo é devido à resistência interna do material fazendo com que o gradiente de difusão não seja rapidamente estabelecido, ocorrendo a formação de uma crosta, que dificultará a migração de água.

O entendimento dos problemas de secagem de sólidos, passa por questões de se conhecer exatamente como a água atravessa o sólido até sua superfície, onde a evaporação ocorre, e como isto tudo influencia na distribuição de umidade em seu interior, sua temperatura e taxa de evaporação sob diferentes condições do ar de secagem.

SHERWOOD (1929a) foi o precursor que classificou quatro mecanismos de secagem de sólidos, onde a água é transportada do interior para a superfície do sólido, cuja

resistência interna pode ser grande ou pequena, para que ocorra sua difusão quer na forma líquida ou de vapor.

DE VRIES e AFGAN (1975), LUIKOV e MIKHAYLOV (1965), ressaltaram a migração capilar da água líquida sob a ação da tensão superficial.

ALVARENGA, FORTES, PINHEIRO FILHO e HARA (1980), citaram seis mecanismos de secagem de sólidos: 1) difusão líquida devido ao gradiente de concentração; 2) difusão de vapor devido ao gradiente de pressão parcial de vapor, causada pelo gradiente de temperatura; 3) fluxo de líquido e de vapor devido a diferença de pressão total causada por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade; 4) escoamento por efusão (escoamento de Knudsen), que ocorre quando o caminho livre das moléculas de vapor for igual ao diâmetro dos poros (importante para condições de alto vácuo); 5) movimento de líquido devido à força gravitacional, que não influi significativamente na secagem de alimentos; e 6) difusão superficial que não é levada em consideração pela maioria das teorias existentes, pelo fato de ser praticamente desprezível.

DAUDIN (1983), ainda citou a difusão da água líquida adsorvida sobre as superfícies internas dos poros vazios (importante para teor de água muito baixo), migração de água líquida ou vapor sob efeito do gradiente de temperatura.

GURNEY e LURIE (1923) publicaram várias curvas que representam as equações de difusão de calor transcritas em Série de Fourier, para relações de tempo-temperatura em processos como vulcanização de borracha, têmpera de aço ou vidro.

SHERWOOD (1929a), partindo dos conceitos de LEWIS (1921), assumiu a validade da segunda lei de Fick para difusão, cuja solução, idêntica à equação de difusão de calor em um sólido similar, é dada na forma de uma Série de Fourier, que expressa a relação entre o conteúdo de água livre e tempo de secagem, espessura do sólido e difusão constante do líquido em seu interior.

Em estudo posterior, SHERWOOD (1929b) relatou a existência de duas zonas dentro do período de taxa decrescente de secagem: zona 1, que ocorre imediatamente após o período de taxa constante de secagem (após a umidade crítica), que pode ter uma relação linear entre a taxa e a umidade, e zona 2, que é caracterizada por uma curva côncava, sendo que frequentemente uma destas zonas torna-se predominante na secagem. O autor afirmou que o aparecimento destas duas zonas pode decorrer do fato da difusão interna do líquido controlar o processo, uma vez que a taxa máxima de difusão na superfície é menor que a taxa de remoção do vapor. Quando isto ocorre, a equação teórica para a taxa de secagem é uma curva côncava para cima, quando a taxa é graficada

contra o conteúdo de umidade. Esta inflexão é difícil de ser detectada com clareza nas curvas experimentais de secagem.

STRUMILLO e KUDRA (1986), apresentaram uma equação empírica de Sazhin para calcular a taxa de secagem nestas duas zonas, sendo possível estimar o valor do conteúdo de umidade crítica.

KING (1968) concluiu que para baixos teores de umidade a taxa é limitada pela transferência interna de massa enquanto que para altos teores de umidade, a taxa é limitada pela resistência à transferência externa de calor. Devido a grande dificuldade de interpretação, os resultados apresentados na literatura são bem discrepantes para as mesmas condições de trabalho. Assim, considerando que a transferência de massa dentro do meio ocorre apenas por difusão de água na forma de vapor, sugeriu uma modificação no modelo de difusão.

BRACKEL (1980) resumiu e classificou um grande número de curvas experimentais de taxa de secagem publicadas na literatura, de acordo com o tipo de sólido, isto é, se o meio é poroso capilar, poroso higroscópico, ou coloidal.

3.3.1. Cálculo da cinética de secagem

Os métodos de cálculo da taxa de secagem são aplicados de modo diferente dependendo do período:

3.3.1.1. Período de secagem à taxa constante

Neste período os fatores que governam a secagem são as transferências de calor e massa na interface ar-produto, que são estabelecidas fazendo referência a uma noção de condutância de superfície interpretada por um fenômeno de camada limite. Esta camada pode ser definida como uma fina camada de ar em escoamento laminar ao redor da partícula, sendo que há um equilíbrio de temperatura e umidade entre o ar e a superfície desta partícula.

Este período raramente é observado na secagem de materiais biológicos, e pode ser detectado apenas sob condições especiais de processo.

3.3.1.2. Período de secagem à taxa decrescente

Este período é quase sempre o único observado para secagem de produtos agrícolas e alimentícios, sendo que a migração interna de água é que determina a taxa de secagem. Esta transferência interna de massa é influenciada pela migração de solutos e por alterações em sua forma. FORNELL, BIMBINET e ALMIN (1980) mostraram que a secagem de beterraba se processa mais rapidamente quando esta é desaçucarada, pois solutos tais como açúcares se depositam sobre a superfície, formando uma crosta. CARBONELL, MADARRO PINAGA e PENA (1984), observaram que embora a energia de ativação para a difusão de água seja a mesma para cenouras salgadas e sem sal, ocorre um

decréscimo na difusividade de água em cenouras salgadas, que justifica menor taxa de secagem para este produto. O encolhimento que ocorre em cogumelos durante a secagem foi equacionado por CHEN e CHEN (1974), mostrando que a curva de encolhimento pode ser expressada em termos de constantes de secagem.

No período de taxa decrescente a migração de água por difusão é baseada na Segunda Lei de Fick.

ROMAN, ROTSTEIN e URBICAN (1979) observaram dois estágios na cinética de dessorção de vapor de água de maçã. Verificaram que no primeiro estágio (1) a saída de água é mais rápida e sofre influência das condições externas, em relação ao segundo estágio (2), que apresentou baixa taxa de dessorção de umidade, onde a transferência interna de massa controla o processo. Foram estimados os valores da difusividade efetiva nos dois estágios, a partir da equação de difusão proposta por LEWIS (1921): $Def1 = 2,57 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $Def2 = 4,92 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

MOWLAH, TAKANO, KAMOI e OBARA (1983), utilizaram a segunda Lei de Fick para difusão, para estudar o

da umidade foi evaporada, ocorrendo reações não-enzimáticas (Reações de Maillard) devido a alta temperatura e reações entre açúcares redutores e amino-ácidos. Consideraram que o transporte de água na banana durante a desidratação pode ser devido a difusão molecular de uma fase única de um sistema homogêneo de solução de açúcar contendo uma matriz de polissacarídeos insolúveis ou massa homogênea de amido gelatinizado.

ENGELS, HENDRICKX, SAMBLANX et al (1986) usaram o programa SAS para calcular a difusividade baseada na Segunda Lei de Fick, para arroz branco e arroz integral, considerando três condições de contorno: 1) superfície atinge o equilíbrio imediato; 2) superfície com resistência; e 3) duas camadas com diferentes propriedades de difusão. Concluíram que para arroz branco, os melhores modelos foram aqueles descritos pela primeira e segunda condições de contorno, enquanto que para arroz integral foi o modelo obtido com a terceira condição.

YUSHENG e POULSEN (1988) observaram apenas o período de taxa decrescente na secagem de batata. Através da equação de difusão baseada na Segunda Lei de Fick foram estimados os valores de difusividade efetiva, que se situaram entre $1,596 \times 10^{-10}$ e $8,487 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para temperaturas variando de 40 a 70°C e velocidade do ar de secagem de 1,6 a $3,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.3.2. Novo método para cálculo do tempo de secagem

Uma curva de secagem pode ser aproximadamente descrita por uma equação diferencial onde estão relacionados a variação do conteúdo de umidade em função do tempo, com um coeficiente de secagem e conteúdo de umidade de equilíbrio. Este coeficiente depende do material, e dependendo das condições de secagem, pode englobar a taxa de secagem no primeiro período.

Quando esta equação diferencial é integrada do início do período de secagem ($X=0$) até o conteúdo de umidade crítico ($X=X_{cr}$), tem-se a expressão para estimar o tempo de secagem correspondente ao período de taxa constante. Integrando a expressão a partir de X_{cr} obtém-se a expressão para estimar o período decrescente de secagem.

Para que uma mesma equação diferencial possa ser utilizada, para ambos os períodos, uma equação cinética simples foi apresentada por Sazhin, STRUMILLO e KUDRA (1986).

3.4. Normalização

Partindo de alguns experimentos laboratoriais de secagem, é possível prever taxas de secagem para várias condições de ar, e dimensionar um secador para um determinado produto.

PARK (1987) teceu considerações a respeito de tentativas de normalização de curvas de secagem, ou seja, a representação de curvas de taxa de secagem para um dado produto obtido com diferentes parâmetros de secagem.

Em se tratando de dimensionamento, a umidade crítica limita duas regiões para tratamento de dados: taxa constante de secagem e taxa decrescente de secagem. Portanto, o problema reside em interpolar ou extrapolar os dados experimentais pertinentes a cada região.

Para a região de taxa constante, as considerações termodinâmicas de evaporação da água na linha de saturação de bulbo úmido ou isoentálpica é suficiente para predizer a taxa, uma vez que a condição de evaporação se dá como a evaporação da água livre.

Por outro lado, a estimativa da taxa na região de taxa decrescente, é vinculada às condições de secagem nas equações de taxa de secagem.

Uma vez que as equações que expressam taxa constante de secagem são efetuadas a partir dos parâmetros das condições de secagem, resta relacionar a taxa decrescente de secagem com a taxa constante de secagem. Assim, a adimensionalização das taxas se dá pela divisão de taxa decrescente pela taxa constante de secagem.

KEEY (1972) tentou estabelecer uma taxa pseudo-constante para equacionar taxa decrescente em função

desta taxa-pseudo constante para materiais biológicos, isto é, materiais higroscópicos não porosos.

FORNELL, BIMBINET, ALMIN (1980) expressaram a taxa constante em função da velocidade elevada a expoente 0,5 e da diferença de temperatura de bulbo úmido e temperatura de bulbo seco.

PARK (1988) citou uma equação empírica que prediz a evaporação à taxa constante em função da velocidade elevada a um expoente igual a 0,8 e diferença de pressão de saturação à temperatura de bulbo úmido e pressão parcial de vapor de água no ar, à temperatura deste ar.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

4.1.1. Matéria-prima

A matéria-prima utilizada foi a banana (Musa acuminata subgrupo Cavendish cultivar Nanica), originária da região de Conceição de Macacu, interior do Estado do Rio de Janeiro. As bananas foram armazenadas em câmaras de maturação no CEASA-R.J., e retiradas para os experimentos de determinação de umidade de equilíbrio e levantamento das curvas de secagem quando estavam amarelas com pintas marron, isto é, no nível 7 da escala de maturação de acordo com a classificação de HAENDLER (1966), Anexo A.

4.1.2. Local de realização dos testes experimentais

As determinações de umidade de equilíbrio e o levantamento das curvas de secagem foram realizadas no CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE TECNOLOGIA AGROINDUSTRIAL DE ALIMENTOS DA EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (CTAA/EMBRAPA), localizado no Rio de Janeiro - R.J..

4.1.3. Equipamentos e vidraria para o levantamento da umidade de equilíbrio.

- . Balança analítica, marca Oertling, modelo LA164, com quatro casas decimais, em gramas;
- . Estufa sem aeração, marca Fabbe-Primar, com controlador de temperatura;
- . Estufa sem aeração, marca Fabbe, modelo 119 com termostato;
- . Estufa a vácuo, marca Fanem, modelo 099EV, temperatura máxima 200°C;
- . Bomba de vácuo para estufa, marca Varian, modelo 5D-90, capacidade 30 pol Hg;
- . Bomba de vácuo para laboratório, marca Fabbe-Primar, modelo 125, tipo 32V;
- . Dessecador a vácuo, com bandeja em porcelana, diâmetro 160mm, marca Pirex;
- . Beaker, capacidade 2000 mL, marca Pirex
- . Proveta, capacidades 500mL, 200mL, 10mL, marca Pirex
- . Folha de alumínio
- . Filme plástico
- . Espátulas
- . Ácido sulfúrico P.A., sendo o teor em H_2SO_4 mínimo 95% e máximo 98%, densidade específica a 25°C, 1,84 (p/p).

4.1.4. Equipamento usado para o levantamento das curvas de secagem. PATENTE INDUSTRIAL PI 8905036, EMBRAPA/UNICAMP.

O aparelho é mostrado na Figura 4.1. e Figura 4.2., e foi construído em estrutura de cantoneira e chapa de ferro galvanizado e isolamento com placa de isopor, revestido interna e externamente com placa de alumínio, sendo composto por:

- . uma balança semi-analítica, marca Marte, modelo A10K, com duas casas decimais em gramas;
- . duas resistências com capacidade de 400 watts, 110 volts, 4 Amperes cada;
- . ventilador axial, capacidade até 0,2 Hp, 110 volts;
- . termômetro de mercúrio;
- . controlador de temperatura, marca Digi-mec, modelo SH-1, escala até 200°C, 110 volts;
- . transformador ajustador de voltagem, marca Variatlas, tipo S-1000 M-1, para controle da velocidade do ventilador.

4.1.5. Outros equipamentos de medição

- . termômetro de hemisférios, marca Gottingen;
- . micrômetro, marca Haenni, modelo 564.



FIGURA 4.1. - Aparelho laboratorial para controle de perda de umidade.

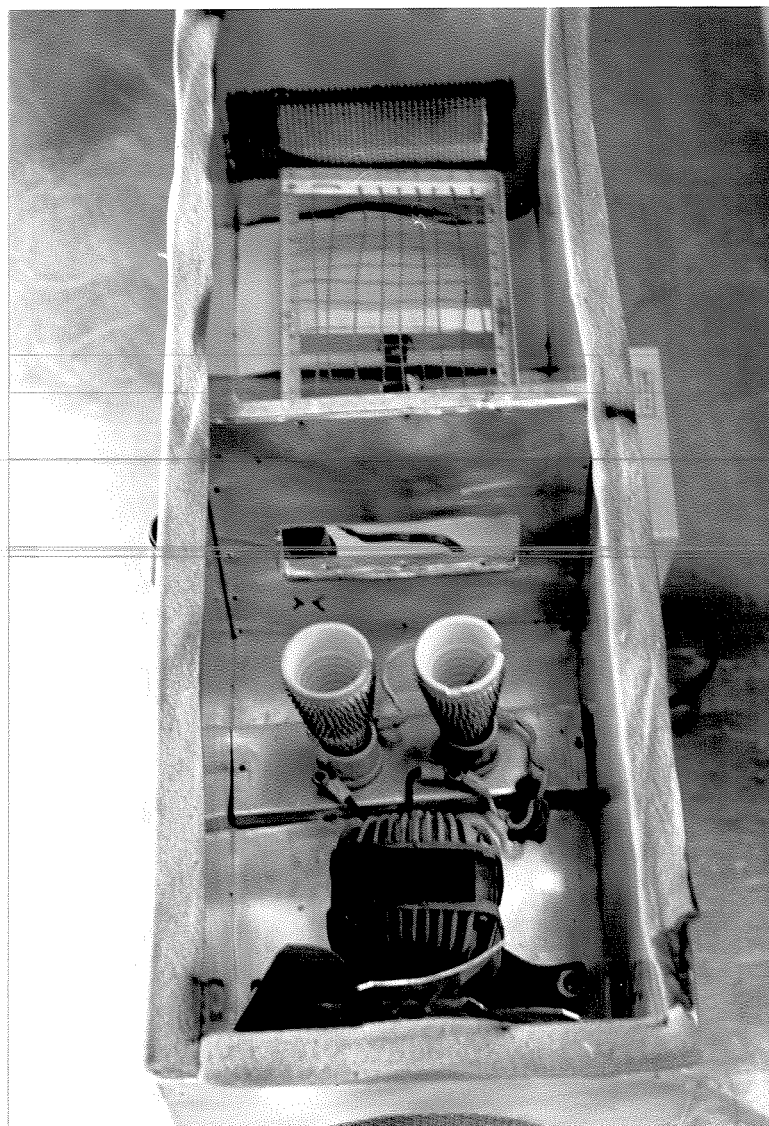


FIGURA 4.2. - Detalhe interno do aparelho mostrando a bandeja para colocação da amostra e as resistências de aquecimento e ventilador.

4.2 - Métodos

4.2.1. Umidade de equilíbrio

As isothermas de dessecção para banana foram determinadas usando o método estático gravimétrico, GÁL (1975), para as temperaturas de 50, 60 e 70°C, e atividades de água situadas entre 0,1144 e 0,8439.

Os ambientes com diversos valores de umidade relativa foram obtidos dentro de dessecadores contendo soluções aquosas de ácido sulfúrico, com as concentrações fixadas segundo BRAY (1970).

A densidade da solução de ácido sulfúrico foi determinada no início e ao final de cada experimento, através da pesagem de um volume conhecido desta, com o objetivo de verificar a manutenção das condições fixadas.

Para obtenção das amostras, as bananas foram descascadas e fatiadas. Cerca de 3 g de fruta foram colocadas em recipientes tarados, em duplicata. Estes foram então transferidos para dessecadores a vácuo contendo as soluções de atividade de água controlada. Em seguida os dessecadores foram evacuados com bomba de vácuo, tomando-se cuidado para que respingos das soluções não atingissem as amostras contidas nos recipientes, e transferidos para câmara de temperatura controlada e aí deixados até que as amostras atingissem o equilíbrio. As amostras foram pesadas diariamente em balança analítica. Quando não ocorreu variação

de massa, isto é, o equilíbrio foi atingido, os recipientes contendo as amostras foram levados à estufa a vácuo para determinação da massa seca. O teor de umidade de equilíbrio foi calculado com base na diferença entre a massa da amostra no equilíbrio e a massa seca. Todos os resultados foram expressos em relação à matéria seca (ms).

4.2.2. Curva de secagem

As curvas foram levantadas para três níveis de temperatura, 50, 60 e 70°C, e três níveis de velocidade do ar, 0,5, 1,0 e 1,5 m.s⁻¹, no equipamento descrito no item 4.1.4. Não foi possível efetuar o controle da UR do ar de secagem.

As bananas foram descascadas e colocadas na bandeja com capacidade para aproximadamente 400 g.

Nas primeira 12 horas de teste, foram feitas medições de hora em hora, e posteriormente o intervalo foi sendo aumentado conforme as variações de massa observadas.

Foram determinados simultaneamente à medição de variação de massa, os seguintes parâmetros:

a) dentro do secador:

- . temperatura de bulbo úmido e temperatura de bulbo seco, através dos termômetros instalados no aparelho.
- . velocidade do ar na saída, através do anemômetro

b) no ambiente:

. temperatura de bulbo úmido e temperatura de bulbo seco, através do psicrômetro.

Os testes foram conduzidos até que as variações de massa fossem insignificantes.

Os resultados foram expressos em relação à ms.

4.2.3. Composição centesimal da matéria-prima

As análises da composição centesimal da banana foram efetuadas no laboratório de controle de qualidade do CTAA/EMBRAPA.

Foram feitas as determinações de umidade, proteína, extrato etéreo, carboidratos totais, fibra, cinzas, açúcares totais e açúcares redutores, por métodos segundo a ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (A.O.A.C) (1984).

4.3. Tratamento de dados experimentais

4.3.1. Modelos utilizados para ajuste das curvas

4.3.1.1. Umidade de equilíbrio

UMA BREVE REVISÃO DAS EQUAÇÕES

Termodinamicamente falando, a posição simplis-
ta da consideração de condição de equilíbrio aplicada a água
livre fornece a taxa de evaporação idêntica à taxa de
condensação. Baseada nesta premissa, Langmuir apud KEEY
(1972) propôs a equação:

$$\frac{X_e}{X_M} = \frac{C * A_W}{1 + C * A_W} \quad [1]$$

sendo:

X_e - Conteúdo de umidade de equilíbrio em base seca

X_M - Conteúdo de umidade da monocamada molecular

A_W - Atividade de água ou Umidade Relativa

$$C = c' * \exp ((H_1 - H_L)/R * T)$$

c' - Coeficiente de primeira ordem

H_1 - Calor de sorção da primeira camada

H_L - Calor de liquefação

$(H_1 - H_L)$ é aproximadamente constante

Tecendo considerações da natureza química da umidade e ampliando o conceito de Langmuir, BRUNAUER, EMMET e TELLER-BET (1938) propuseram, para policamadas moleculares:

$$\frac{X_e}{X_M} = \frac{C * AW}{1 - AW} \left(\frac{1 - (n+1)AW^n + nAW^{n+1}}{1 - (1-C)AW - CAW^{n+1}} \right) \quad [2]$$

sendo:

n - Número de camadas moleculares

C - Constante de BET

A definição utilizada na equação 2, para a constante C, permanece a mesma, com a ressalva de que o coeficiente c' agora leva em consideração os fatores de diferentes taxas de condensação/evaporação e calor de sorção para a segunda e sucessivas camadas moleculares.

Esta equação tem dois importantes casos especiais:

- 1) Quando n = 1, ela fica reduzida à equação de Langmuir;
- 2) Quando n tende a infinito, ela se reduz à equação:

$$\frac{X_e}{X_M} = \frac{C * AW}{(1 - AW) (1 - AW + C * AW)} \quad [3]$$

que é a forma mais conhecida da equação de BET, e utilizada na forma linearizada:

$$\frac{AW}{(1-AW)X_e} = \frac{1}{X_M * C} + \frac{C-1}{X_M * C} * AW \quad [4]$$

Este modelo restringe o ajuste a dois parâmetros, X_M e C , e tem apresentado sucesso para valores de atividade de água até 0,50.

Com a inclusão de mais um parâmetro, denominado fator de correção de propriedade das camadas polimoleculares, K , tem-se o modelo de GAB, que foi introduzido por VAN DEN BERG (1984) que pode ser considerado uma extensão do modelo de BET:

$$\frac{X_e}{X_M} = \frac{C * K * AW}{(1 - K * AW) (1 - K * AW + C * K * AW)} \quad [5]$$

sendo:

C - Constante de Guggenheim

$C = C' * \exp ((HL-H1)/RT)$

K - Fator de correção de propriedades das camadas polimoleculares

$K = K' * \exp ((HL-H2)/RT)$

$H2$ - Calor de sorção das camadas polimoleculares

Na correlação do modelo de GAB, este pode ser rearranjado em um modelo polinomial do segundo grau, SCHAR e RUEGG (1985), que relataram que a equação da isoterma é matematicamente igual à derivada do modelo de Hailwood e Horrobin.

$$\frac{AW}{X_e} = a * AW^2 + b * AW + d \quad [6]$$

sendo:

$$a = (K/XM)((1/C)-1)$$

$$b = (1/XM)(1-(2/C))$$

$$d = 1/(XM*C*K)$$

Conforme pode ser verificado, ambas as formas da equação de GAB passam por um processo de ajuste de três parâmetros: XM, C e K.

No entanto, se retornarmos à equação original de BET (equação 3), pode ser verificado que esta apresenta três parâmetros a serem estimados, XM, C e n. Este modelo pode apresentar grau maior que a equação polinomial de segundo grau, dependendo do valor numérico de n estimado. Portanto, apresenta maior possibilidade de ajuste dos dados experimentais, PARK e NOGUEIRA (1990).

Portanto para o presente trabalho, os ajustes da isoterma de dessorção foram efetuados utilizando o modelo de BET (equação 2) e o modelo de GAB (equação 5).

4.3.1.2. Curvas de secagem

Foram utilizados dois métodos para ajustar as curvas experimentais de secagem:

4.3.1.2.1. Modelo difusional

A migração de água por difusão se apóia na Segunda Lei de Fick. CRANK (1975) faz referência à equação de difusão para diversas forma geométricas regulares. Para a forma cilíndrica, SKELLAND (1974) e CRANK (1975) apresentaram a equação considerando um cilindro circular suficientemente longo, no qual a difusão é sempre radial, sendo a concentração de umidade função apenas do raio r e do tempo t . Assim a equação de difusão se torna:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad [7]$$

cuja resolução é apresentada no Anexo B.

A solução da equação (7) se torna:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{4}{r_o^2} * \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(b_n)^2} * \text{EXP} (-D * (b_n)^2 t) \quad [8]$$

observação: o primeiro membro foi denominado por ADM.

A equação (8) assume que:

- . o coeficiente de difusão é constante e representa a difusividade efetiva, que engloba os efeitos dos fenômenos de transferência de calor e massa;
- . o produto é homogêneo e tem uma forma simples e simétrica;
- . as dimensões do produto permanecem constantes ao longo do tempo;
- . o movimento da água resulta de um gradiente do teor de água dentro da partícula;
- . a superfície do produto entra imediatamente em equilíbrio com o ar de secagem;
- . o teor de umidade de equilíbrio, X_e , é obtido de uma curva de sorção do produto.

Para longos períodos de secagem, a equação (8) é simplificada por uma forma limitada da equação de difusão:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{4}{r_o^2 * (b_1)^2} * \text{EXP} (-D * (b_1)^2 t) \quad [9]$$

isto é, a expansão da Função de Bessel fica limitada para apenas o primeiro termo da série de Fourier, PERRY (1984).

Quando a equação (8) é graficada na escala semi-logarítmica, isto é, $\ln((X-X_e)/(X_o-X_e))$ versus tempo, obtém-se uma reta, LEWIS (1921), SHERWOOD (1929a,b) e PERRY (1984).

A solução da equação de difusão é uma das mais simples, e daí a preferência para interpretar a secagem de produtos agrícolas e alimentares, DAUDIN (1983).

4.3.1.2.2. Modelo empírico de cinética de secagem: equação de Sazhin

STRUMILLO e KUDRA (1986) apresentaram a equação empírica proposta por Sazhin, que permite estimar o tempo de secagem baseado numa única equação. Este método permite descrever o processo de secagem incluindo os períodos de taxa constante e taxa decrescente de secagem.

$$t = \frac{1}{K * (X_o - X_e)} * \frac{(X_o - X) * (X_{1e} - X_e)}{(X_o - X_{1e}) * (X - X_e)} \quad [10]$$

onde:

K - coeficiente de taxa de secagem, constante para os dois períodos

X_o - conteúdo de umidade inicial (g/g ms)

X_e - conteúdo de umidade de equilíbrio (g/g ms)

O coeficiente K inclui parâmetros estruturais, assim como propriedades térmicas e termodinâmicas envolvidas no processo de secagem.

O conteúdo X_{1e} corresponde ao conteúdo de umidade de material durante o período inicial de secagem, onde a temperatura do agente de secagem (ar) para a superfície do material é igual à temperatura de bulbo úmido, isto é, taxa de secagem constante. O valor X_{1e} corresponde então ao conteúdo de umidade crítica (X_{cr}), que separa os dois períodos de secagem: taxa constante e taxa decrescente.

Portanto para o ajuste das curvas de secagem foram utilizados:

- Modelo difusional, equação (8), que permitiu a estimativa do valor da difusividade efetiva (D); e
- Modelo empírico, equação (10), que permitiu a estimativa do provável ponto de inflexão denominado X_{cr} .

O ajuste das curvas foi feito considerando duas situações:

- 1) Dados referentes a toda faixa experimental; e
- 2) Dados truncados no valor do conteúdo de umidade determinado pela RESOLUÇÃO 12/78 - (1985) que se refere as normas para comercialização de frutas secas (25% b.u.).

4.3.1.3. Taxa de secagem

As taxas de secagem foram estimadas considerando dados referentes a toda a faixa experimental, segundo:

4.3.1.3.1. Modelo difusional

A equação de taxa para o período decrescente de secagem (equação 11) foi obtida por diferenciação da equação (8), considerando 5 termos da Função de Bessel, e os valores da difusividade efetiva estimados no ajuste das curvas.

$$\frac{dX}{dt} = (-4 D/r_o^2) (X_o - X_e) [(\exp(-D b_1^2 t) + \exp(-D b_2^2 t) + \exp(-D b_3^2 t) + \exp(-D b_4^2 t) + \exp(-D b_5^2 t))] \quad [11]$$

4.3.1.3.2. Modelo empírico

O princípio deste é baseado na equação de transferência de massa generalizada, escrita para o processo de secagem na forma:

$$\frac{dX}{dt} = K * (X_1 - X) * (X - X_e) \quad [12]$$

Foram utilizados os valores de K estimados pela equação (10).

4.3.1.3.3. Uso de funções splines cúbicas

Uma função spline cúbica é uma função de regressão definida a partir da junção de polinômios cúbicos em pontos denominados "nós", satisfazendo condições de continuidade de segunda ordem.

Este tipo de ajuste é suave e é vantajoso quando se deseja determinar as derivadas de dados experimentais, GERALD (1984), que no caso se traduz como a taxa de secagem.

A escolha dos "nós" que definiram o intervalo de ajuste foi feita depois de se observar a dispersão dos pontos experimentais, ao se plotar a variação do conteúdo de umidade (X) em função do tempo (t). A cada tendência de mudança na dispersão foi escolhido um "nó", isto é, um ponto (X_i, t_i) .

A equação geral da spline cúbica é:

$$X(t_i) = C3X(X - X_i)^3 + C2X(X - X_i)^2 + C1X(X - X_i) + C1X$$

[13]

sendo:

C3X, C2X, C1X, CIX - coeficientes das splines cúbicas para
cada intervalo;

Xi - valor do conteúdo de umidade X, no tempo ti.

O coeficiente C1X é o valor da taxa de secagem
no ponto.

4.3.1.4. Normalização

As taxas de secagem calculadas no item
4.3.1.3, foram divididas pela taxa de evaporação da água
livre utilizando duas equações empíricas, equação (14) e
equação (15):

$$y = K \cdot v^{0,75} (Tbs - Tbu) \quad [14]$$

y - taxa constante de secagem (Kg H₂O/Kg ms.s)

K - constante

v - velocidade do ar (m.s⁻¹)

Tbs - temperatura de bulbo seco (°C)

Tbu - temperatura de bulbo úmido (°C)

$$y = 0,027 v^{0.9} (p_s - p_{ar})$$

[15]

sendo:

y - taxa constante de secagem ($\text{Kg H}_2\text{O/h m}^2$)

v - velocidade do ar (m.s^{-1})

p_s - pressão de saturação adiabática à temperatura de bulbo úmido (mmHg).

p_{ar} - pressão parcial de vapor de água no ar, à temperatura deste (mmHg).

A partir daí foram construídas as curvas de taxa adimensional em função do conteúdo de umidade.

4.3.2. Softwares

Os dados experimentais de umidade de equilíbrio e das curvas de secagem foram ajustados por modelos não-lineares (item 4.3.1) através do pacote estatístico SAS.

Para a taxa de secagem foram utilizados o SAS e o FORTRAN, instalados no VAX da UNICAMP.

Os programas encontram-se no Anexo C,

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Composição centesimal da matéria-prima

A Tabela 5.1 mostra composição centesimal média da banana fresca. Os resultados são expressos em gramas por cem gramas de ms.

TABELA 5.1. Composição centesimal média* da banana fresca (Musa acuminata subgrupo Cavendish cultivar Nanica).

	g/100 g ms	D.P.
Umidade	292.86	44.10
Proteína	6.91	1.95
Extrato Etéreo	0.88	0.72
Carboidratos Total	90.24	2.66
Fibra	1.93	1.03
Cinza	2.72	0.94
Açúcares Totais	69.49	11.08
Açúcares Redutores	43.92	11.86

D.P. - desvio padrão

ms - matéria seca

* média dos 9 testes experimentais

292.86 = 292,86 - extender a equivalência para os demais valores.

5.2. Umidade de equilíbrio - NOGUEIRA, PARK e CORNEJO (1991)

Os resultados experimentais do conteúdo de umidade de equilíbrio são mostrados na Tabela 5.2.

Da análise da regressão não-linear direta dos modelos de BET (equação 2) e de GAB (equação 5), na faixa de atividade de água de 0,1144 a 0,8439, foi possível o ajuste apenas para o modelo de BET, com o número de camadas polimoleculares, n , igual a 10. Para o modelo de GAB não foi possível obter um ajuste satisfatório, tendo produzido resultados extremamente absurdos. Para a escolha do melhor ajuste foram consideradas as regressões que tiveram o menor resíduo e menor desvio padrão assintótico dos parâmetros estimados pelo modelo.

Os valores dos parâmetros de BET foram então estimados e são mostrados na Tabela 5.3 e as isotermas de dessorção de umidade no Anexo D, Figuras D1, D2 e D3.

TABELA 5.2. Valores experimentais de umidade de equilíbrio para dessorção de água da banana (Musa acuminata subgrupo Cavendish cultivar Nanica), para as temperaturas de 50, 60 e 70°C, e atividades de água entre 0,1144 e 0,8439.

TEMPERATURA (°C)					
50		60		70	
Aw	Xe (g/g ms)	Aw	Xe (g/g ms)	Aw	Xe (g/g ms)
0.1144	0.0497	0.1232	0.0256	---	---
0.1898	0.0540	0.2008	0.0375	0.2117	0.0369
0.3820	0.0933	0.3944	0.1058	0.4064	0.0760
0.5921	0.2187	0.6022	0.1873	0.6119	0.1781
0.6871	0.2207	---	---	0.7032	0.1880
0.8355	0.3158	0.8398	0.2646	0.8439	0.2522

0.1144 = 0,1144 - extender a equivalência para os demais valores.

TABELA 5.3. Parâmetros estimados por regressão direta do modelo original de BET para atividades de água entre 0,1144 e 0,8439, para banana (Musa acuminata subgrupo Cavendish cultivar Nanica)*.

Temperatura (°C)	parâmetros de BET (DPA)	
	XM	C
50	0.0814 (0.0056)	10.7724 (1.4100)
60	0.0705 (0.0086)	12.0761 (2.2844)
70	0.0645 (0.0058)	10.4820 (1.5761)

* usando a equação com n=10

DPA - desvio padrão assintótico

0.0814 = 0,0814 - extender a equivalência para os demais valores.

Numa tentativa de buscar um melhor ajuste, restringiu-se a faixa de atividade de água de 0,1144 a 0,7032, e então procederam-se as regressões com os modelos em questão. Foram adotados os mesmos critérios de escolha anterior.

Para o modelo de BET, os melhores ajustes foram os obtidos para o número de camadas polimoleculares (n) igual a 5 para temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Os valores dos parâmetros estimados são mostrados na Tabela 5.4 e as isotermas de dessorção de umidade no Anexo D, Figuras D4, D5 e D6.

TABELA 5.4. Parâmetros estimados por regressão direta do modelo original de BET para atividades de água entre 0,1144 e 0,7032, para banana (Musa acuminata subgrupo Cavendish c.v. Nanica).

parâmetros de BET		
Temperatura (°C)	XM	C
50	0.1206 (0.0088)	2.6701 (0.6123)
60	0.1404 (0.0052)	1.2950 (0.1440)
70	0.1148 (0.0071)	1.3736 (0.2981)

usando a equação com $n=5$

0.1206 = 0,1206 - extender a equivalência para os demais valores.

Para o modelo de GAB, embora tenha se conseguido ajustar as isotermas, os valores dos parâmetros de GAB estimados apresentaram desvios padrões assintóticos maiores que os valores dos próprios parâmetros (Tabela 5.5), e que dentro dos critérios de escolha adotados, não foi possível considerar o ajuste.

TABELA 5.5. Parâmetros estimados por regressão direta do modelo de GAB para atividades de água entre 0,1144 e 0,7032, para banana (Musa acuminata subgrupo Cavendish cultivar Nanica).

Temperatura (°C)	parâmetros de GAB (DPA)		
	Xm	C	K
50	0	1519.53 (0.00)	35.02 (14.14)
60	0	799.40 (0.00)	49.59 (24.45)
70	0	1309.26 (0.00)	13.20 (148.86)

1519.53 = 1519,53 - extender a equivalência para os demais valores.

Deste modo para estimar os valores da umidade de equilíbrio nas condições dos testes experimentais de secagem foi utilizado o modelo não-linear de BET com $n=5$ (equação 2).

5.3. Umidade relativa do ar

A UR é um parâmetro importante no estudo de processos de secagem. Para uma mesma temperatura o valor da UR não varia com a velocidade do ar.

A Tabela 5.6 mostra os valores médios de UR dentro do secador, obtidos através da carta psicrométrica para altas temperaturas ASAE DATA (1991).

Os valores de UR apresentados na Tabela 5.6 não deveriam ter variado com a velocidade do ar, para uma mesma temperatura. Isto ocorreu devido ao fato de que o ar de secagem não teve a UR controlada. Assim as oscilações que ocorreram na UR do ambiente proporcionaram as variações observadas na UR no interior do secador.

Foram utilizados os valores da Tabela 5.6 para estimar os valores da umidade de equilíbrio pela equação 2 e posteriormente os valores da difusividade efetiva pela equação (8).

TABELA 5.6. Valores de UR do ar no interior do secador em função da temperatura e velocidade do ar de secagem.

T (°C)	v (m.s ⁻¹)	UR (%)
50	0.5	33
	1.0	24
	1.5	42
60	0.5	28
	1.0	34
	1.5	27
70	0.5	23
	1.0	24
	1.5	27

0.5 = 0,5 - extender a equivalência para os demais valores.

5.4. Modelo difusional

Os dados experimentais de secagem são mostrados nas Tabelas E1, E2, e E3 do Anexo E.

O processo de secagem foi analisado segundo a teoria difusional, e assim um parâmetro importante a ser determinado é a difusividade de água na banana, ou seja, a facilidade de transferência de massa (água) sob determinadas condições experimentais.

Para obter os valores das difusividades efetivas foi utilizada a equação diferencial baseada na

segunda lei de Fick para difusão da água em secagem, equação (8) proposta por LEWIS (1921) e SHERWOOD (1929 a,b), que pode ser encontrada em SKELLAND (1974) e CRANK (1975) para forma cilíndrica, cuja solução se dá por uma função de Bessel, conforme demonstrado no Anexo C.

Nas Tabelas E.1, E.2, e E.3 do Anexo E estão os valores do primeiro membro da equação, que foi denominado por ADM. Os valores da função de Bessel foram retirados de ABRAMOWITZ e STEGUN (1970). O valor do raio médio da banana (r_0), foi igual a 0,01253m.

A equação (8) assumiu que a difusão líquida é constante, e que para longos períodos de secagem pode ser simplificada por uma forma limitada de equação de difusão, que é a equação (9), isto é, a expansão da Função de Bessel fica limitada para o primeiro termo da série. Numa tentativa de comprovar esta afirmação, foram graficadas as curvas do logarítmo de ADM ($\ln ADM$) versus o tempo, para as temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C e velocidades 0,5, 1,0 1,5m.s⁻¹. Segundo LEWIS(1921),SHERWOOD (1929a,b) e PERRY's (1984), os gráficos resultariam em retas, mas isto não foi observado para o presente estudo, vide Anexo F, Figuras F1, F2 e F3, gráficos em função da velocidade, e Figuras F4, F5 e F6, gráficos em função da temperatura.

A partir destes valores, o ajuste ocorreu no sentido de buscar para qual termo da série ter-se-ia o menor desvio padrão assintótico (DPA) do parâmetro estimado (difusividade efetiva) e menor resíduo na regressão.

Os valores estimados da difusividade efetiva, para cada condição experimental, são mostrados nas Tabelas 5.7 e 5.8.

Fazendo uma análise das Tabela 5.7 e 5.8, pelo critério de escolha adotado, o modelo com vinte termos ($n=20$) foi o que apresentou o melhor ajuste. Porém não se justificava usar um modelo com número de termos (n) tão elevado. Pela Tabela 5.9 podemos verificar que a porcentagem de erro em relação ao valor estimado da difusividade decresce com o aumento do número de termos da série. Inicialmente o decréscimo na porcentagem de erro foi mais acentuado, conforme pode ser visto se analisarmos o aumento de n do modelo com um termo ($n=1$) até o modelo com cinco termos ($n=5$), cujo valor médio foi de 5,29%. A partir daí o valor do erro permanece praticamente constante, apresentando um decréscimo médio de 0,27% entre o modelo com $n=5$ e o modelo com $n=20$. Assim, o modelo com cinco termos da série pode ser considerado no ajuste das curvas de secagem.

Como a banana-passa deve ser comercializada com um teor máximo de umidade de 25% (base úmida), RESOLUÇÃO 12/78 (1985), as curvas de secagem foram truncadas ao redor deste valor de referência.

TABELA 5.7 - Valores de difusividade efetiva obtidos pelo modelo difusional para n=1, n=2, n=3, n=4, a partir do ajuste das curvas de secagem de banana (Musa acuminata subgrupo Cavendish cv Nanica).

T (°C)	v (ms ⁻¹)	1	2	3	4
DIFUSIVIDADE (DPA)(10 ⁻¹⁰ m ² s ⁻¹)					
50	0.5	2.6972 (0.2376)	2.7923 (0.1265)	2.7958 (0.0987)	2.7948 (0.0865)
	1.0	2.9134 (0.2395)	3.0035 (0.1273)	3.0084 (0.0971)	3.0077 (0.0856)
	1.5	4.3178 (0.3313)	4.4233 (0.1719)	4.4297 (0.1320)	4.4298 (0.1143)
60	0.5	2.5211 (0.2364)	2.6269 (0.1471)	2.6313 (0.1185)	2.6306 (0.1086)
	1.0	4.5231 (0.3778)	4.6052 (0.2264)	4.6050 (0.1906)	4.6035 (0.1779)
	1.5	6.4988 (0.7030)	6.5481 (0.4414)	6.5362 (0.3808)	6.5313 (0.3598)
70	0.5	4.1315 (0.3606)	4.2255 (0.2109)	4.2266 (0.1748)	4.2252 (0.1619)
	1.0	5.4516 (0.5188)	5.5404 (0.3219)	5.5342 (0.2741)	5.5303 (0.2573)
	1.5	6.3565 (0.5765)	6.4384 (0.3377)	6.4352 (0.2758)	6.4324 (0.2523)

DPA - Desvio Padrão Assintótico

TABELA 5.8 - Valores de difusividade efetiva obtidos pelo modelo difusional para n=5, n=10, n=15, n=20, a partir do ajuste das curvas de secagem de banana (Musa acuminata subgrupo Cavendish cv Nanica).

T (°C)	v (ms ⁻¹)	5	10	15	20
DIFUSIVIDADE (DPA)(10 ⁻¹⁰ m ² s ⁻¹)					
50	0.5	2.7941 (0.0841)	2.7938 (0.0781)	2.7938 (0.0771)	2.7938 (0.0767)
	1.0	3.0070 (0.0803)	3.0069 (0.0731)	3.0069 (0.0717)	3.0069 (0.0713)
	1.5	4.4295 (0.1054)	4.4296 (0.0920)	4.4296 (0.0893)	4.4296 (0.0883)
60	0.5	2.6299 (0.1042)	2.6294 (0.0985)	2.6294 (0.0975)	2.6294 (0.0972)
	1.0	4.6028 (0.1721)	4.6028 (0.1641)	4.6028 (0.1626)	4.6028 (0.1620)
	1.5	6.5298 (0.3503)	6.5292 (0.3370)	6.5292 (0.3344)	6.5292 (0.3335)
70	0.5	4.2245 (0.1560)	4.2245 (0.1479)	4.2245 (0.1463)	4.2245 (0.1458)
	1.0	5.5288 (0.2497)	5.5286 (0.2393)	5.5286 (0.2373)	5.5286 (0.2366)
	1.5	6.4315 (0.2410)	6.4313 (0.2247)	6.4313 (0.2215)	6.4313 (0.2203)

DPA - Desvio Padrão Assintótico

TABELA 5.9 - Porcentagem de erro em relação ao valor de difusividade efetiva, estimada para toda faixa experimental das curvas de secagem

T (°C)	v (ms ⁻¹)	n = 1	2	3	4	5	10	15	20
X erro									
50	0.5	8.81	4.53	3.53	3.17	3.01	2.79	2.76	2.75
	1.0	8.22	4.24	3.23	2.85	2.67	2.43	2.39	2.37
	1.5	7.67	3.96	2.98	2.58	2.38	2.08	2.02	1.99
60	0.5	10.48	5.60	4.51	4.13	3.96	3.75	3.71	3.70
	1.0	8.35	4.92	4.14	3.87	3.74	3.57	3.53	3.52
	1.5	10.82	6.74	5.83	5.51	5.36	5.16	5.12	5.11
70	0.5	8.73	4.99	4.14	3.83	3.69	3.50	3.47	3.45
	1.0	9.52	5.81	4.95	4.65	4.52	4.33	4.29	4.28
	1.5	9.97	5.25	4.29	3.92	3.75	3.50	3.44	3.43

2.6972 = 2,6972

Extender a equivalência para os demais valores

Ao efetuar esta operação, com a diminuição do número de pontos (graus de liberdade) foram efetuados novos ajustes das curvas. O procedimento foi o mesmo adotado para ajuste dos dados completos. Os valores da difusividade efetiva são mostrados nas Tabelas 5.10 e 5.11.

Efetuando a análise nos novos ajustes

verificou-se que a tendência anteriormente observada de decréscimo na porcentagem de erro em relação ao valor estimado da difusividade se manteve, conforme pode ser visto pela Tabela 5.12.

O decréscimo médio na porcentagem de erro entre $n=1$ e $n=5$ foi de 6,69% e entre $n=5$ e $n=20$ foi de 0,35%.

Assim o modelo com cinco termos da série pode também ser considerado no ajuste das curvas de secagem até umidade comercial (25%).

Pela Tabelas 5.7 e 5.8 e Tabelas 5.10 e 5.11 pode ser observado que ocorreu pouca variação entre os valores da difusividade efetiva estimados nos ajustes das curvas com os dados completos e com os dados truncados.

As curvas resultantes da regressão para dados completos para modelo com cinco termos foram feitas a partir dos valores experimentais e os estimados pelo modelo, possibilitando uma visualização do ajuste, são mostradas nas Figuras de G1 a G9 do Anexo G.

TABELA 5.10 - Valores de difusividade efetiva obtidos pelo modelo difusional para $n=1$, $n=2$, $n=3$, $n=4$, a partir do ajuste das curvas de secagem de banana (*Musa acuminata* subgrupo Cavendish cv Nanica), até unidade comercial (25%)

T (°C)	v (ms ⁻¹)	1	2	3	4
DIFUSIVIDADE (DPA) (10 ¹⁰ m ² s ⁻¹)					
50	0.5	2.6383 (0.2916)	2.7540 (0.1520)	2.7586 (0.1172)	2.7576 (0.1046)
	1.0	2.9618 (0.3063)	3.0156 (0.1643)	3.0206 (0.1212)	3.0198 (0.1063)
	1.5	4.3121 (0.3616)	4.4203 (0.1907)	4.4268 (0.1437)	4.4269 (0.1243)
60	0.5	2.5331 (0.2704)	2.6373 (0.1488)	2.6416 (0.1190)	2.6408 (0.1086)
	1.0	4.5783 (0.4234)	4.6468 (0.2447)	4.6462 (0.2016)	4.6447 (0.1860)
	1.5	6.3042 (0.9174)	6.3805 (0.5630)	6.3680 (0.4808)	6.3624 (0.4521)
70	0.5	4.1715 (0.3886)	4.2611 (0.2180)	4.2618 (0.1757)	4.2604 (0.1603)
	1.0	5.5188 (0.6109)	5.6032 (0.3638)	5.5963 (0.3026)	5.5923 (0.2808)
	1.5	6.1772 (0.8194)	6.2974 (0.4691)	6.2948 (0.3793)	6.2916 (0.3451)

DPA - Desvio Padrão Assintótico

TABELA 5.11 - Valores de difusividade efetiva obtidos pelo modelo difusional $n=5$, $n=10$, $n=15$, $n=20$, a partir do ajuste das curvas de secagem de banana (*Musa acuminata* subgrupo Cavendish cv Nanica), até unidade comercial (25%)

T (°C)	v (ms ⁻¹)	5	10	15	20
DIFUSIVIDADE (DPA) (10 ¹⁰ m ² s ⁻¹)					
50	0.5	2.7568 (0.0988)	2.7565 (0.0912)	2.7565 (0.0899)	2.7565 (0.0894)
	1.0	3.0191 (0.0994)	3.0189 (0.0898)	3.0189 (0.0881)	3.0189 (0.0874)
	1.5	4.4266 (0.1147)	4.4268 (0.1000)	4.4268 (0.0970)	4.4268 (0.0959)
60	0.5	2.6401 (0.1040)	2.6394 (0.0980)	2.6394 (0.0969)	2.6394 (0.0966)
	1.0	4.6440 (0.1788)	4.6439 (0.1688)	4.6439 (0.1668)	4.6439 (0.1661)
	1.5	6.3606 (0.4391)	6.3603 (0.4210)	6.3603 (0.4175)	6.3603 (0.4162)
70	0.5	4.2597 (0.1531)	4.2596 (0.1431)	4.2596 (0.1412)	4.2596 (0.1405)
	1.0	5.5908 (0.2708)	5.5906 (0.2770)	5.5906 (0.2543)	5.5906 (0.2533)
	1.5	6.2905 (0.3287)	6.2904 (0.3048)	6.2904 (0.3000)	6.2904 (0.2983)

DPA - Desvio Padrão Assintótico

TABELA 5.12 - Porcentagem de erro em relação ao valor de difusividade efetiva, estimada para dados truncados até unidade comercial (25%)

T (°C)	v (ms ⁻¹)	n = 1	2	3	4	5	10	15	20
X erro									
50	0.5	11.05	5.52	4.25	3.79	3.59	3.31	3.26	3.25
	1.0	10.48	5.32	4.01	3.52	3.29	2.98	2.92	2.90
	1.5	8.39	4.32	3.25	2.81	2.59	2.26	2.19	2.17
60	0.5	10.68	5.64	4.51	4.11	3.94	3.71	3.67	3.66
	1.0	9.25	5.27	4.34	4.01	3.85	3.64	3.59	3.58
	1.5	14.55	8.82	7.55	7.11	6.90	6.62	6.56	6.54
70	0.5	9.32	5.12	4.12	3.76	3.60	3.36	3.32	3.30
	1.0	11.07	6.49	5.41	5.02	4.82	4.60	4.55	4.53
	1.5	13.26	7.45	6.03	5.49	5.23	4.85	4.77	4.74

2.6383 = 2,6383

Extender a equivalência para os demais valores

A análise do processo passou então a ser feita a partir do modelo escolhido, isto é, a equação de difusão com cinco termos da série.

Considerando inicialmente toda a faixa de dados experimentais, pela Tabela 5.8, e analisando os valores de difusividade efetiva em função do intervalo de confiança e das condições de secagem pela Tabela 5.13, verificou-se que a facilidade de transferência de massa não diferiu para as temperaturas de 50 e 60°C e velocidade de 0,5m.s⁻¹. O mesmo fato foi observado entre 50°C, 1,5m.s⁻¹ e 60°C, 1,0m.s⁻¹ e 70°C, 0,5m.s⁻¹ ou entre 60°C, 1,5m.s⁻¹ e 70°C, 1,5m.s⁻¹.

TABELA 5.13. Intervalo de confiança para valores de difusividade efetiva estimados a partir do modelo difusional (n=5), para dados completos.

T (°C)	v (m.s ⁻¹)	intervalo de confiança (10 ¹⁴)	
		limite inferior	limite superior
50	0.5	2.6228	2.9652
	1.0	2.8438	3.1702
	1.5	4.2134	4.6455
60	0.5	2.4163	2.8434
	1.0	4.2511	4.9544
	1.5	5.8050	7.2544
70	0.5	3.9048	4.5442
	1.0	5.0163	6.0413
	1.5	5.9350	6.9280

2.6228 = 2,6228 - extender a equivalência para os demais valores

Verificando os valores de difusividade efetiva para $n=5$, Tabela 5.8, concluiu-se que as temperaturas de 60°C ou 70°C e velocidade de $1,5\text{m.s}^{-1}$ apresentaram o maior valor de difusividade efetiva e conseqüentemente a melhor condição de secagem.

Analisando os valores de difusividade efetiva para cada temperatura, Tabela 5.8, para $n=5$, verificou-se que esta aumenta com o aumento da velocidade.

A partir daí iniciou-se uma análise dos valores de difusividade com relação à variação de temperatura e variação de velocidade.

Os incrementos nas difusividades em função da velocidade do ar para cada temperatura, para dados completos, são mostrados na Tabela 5.14, e foram calculados segundo a equação (14).

$$\% \text{ incremento em } D_v = \frac{D_{v_2} - D_{v_1}}{D_{v_1}} \times 100 \quad [14]$$

D_v - incremento na difusividade em função da velocidade

D_{v_1} - valor da difusividade correspondente à velocidade menor

D_{v_2} - valor da difusividade correspondente à velocidade maior

TABELA 5.14. Porcentagem de incremento na difusividade efetiva devido à variação de velocidade para dados completos.

T (°C)	variação em v (m.s ⁻¹)		
	0,5 a 1,0	1,0 a 1,5	0,5 a 1,5
50	7.72	47.31	58.53
60	75.02	41.87	148.29
70	30.87	16.33	52.24

7.72 = 7,72 - extender a equivalência para os demais valores.

Os incrementos nas difusividades em função da temperatura para cada velocidade, para dados completos, são mostrados na Tabela 5.15, e foram calculados segundo a equação (15).

$$\% \text{ incremento em } D_T = \frac{D_{T2} - D_{T1}}{D_{T1}} \times 100 \quad [15]$$

D_T - incremento na difusividade em função da temperatura

D_{T1} - valor da difusividade correspondente à temperatura menor

D_{T2} - valor da difusividade correspondente à temperatura maior

TABELA 5.15. Porcentagem de incremento na difusividade devido à variação de temperatura.

v (m.s ⁻¹)	variação em T (°C)		
	50 a 60	60 a 70	50 a 70
0.5	-6.24	60.63	51.19
1.0	53.07	20.12	83.86
1.5	47.42	-1.50	45.20

-6.24 = -6,24 - extender a equivalência para os demais valores.

Pela Tabela 5.14 nota-se que o aumento na velocidade de $0,5\text{m.s}^{-1}$ para $1,0\text{m.s}^{-1}$, para temperatura igual a 50°C , o incremento na difusividade é de 9,85 vezes menor que para temperatura de 60°C , e 4 vezes menor que para a temperatura de 70°C .

Quando a velocidade passa de $1,0\text{m.s}^{-1}$ para $1,5\text{m.s}^{-1}$ o incremento na difusividade praticamente não difere entre as temperaturas de 50°C e 60°C , que são cerca de 2,7 vezes maiores, em média, em relação ao incremento correspondente à temperatura de 70°C .

Analisando o processo quando a velocidade passa de $0,5\text{m.s}^{-1}$ para $1,5\text{m.s}^{-1}$, verifica-se que o maior incremento na difusividade foi para a temperatura de 60°C . Este incremento é 2,5 vezes maior que para a temperatura de 50°C e 2,8 vezes maior que para a temperatura de 70°C .

Pela Tabela 5.15 analisando o incremento na difusividade em função do aumento da temperatura para uma dada velocidade, notou-se inicialmente que para as velocidades de $0,5\text{m.s}^{-1}$ e $1,5\text{m.s}^{-1}$ ocorreu um decréscimo na difusividade quando a temperatura passa de 50°C para 60°C e de 60°C para 70°C respectivamente.

O maior incremento ocorreu para velocidade de $1,0\text{m.s}^{-1}$ quando a temperatura passa de 50°C para 70°C .

Para a velocidade de $1,5\text{m.s}^{-1}$ o incremento praticamente não diferiu quando a temperatura passa de 50°C para 60°C e de 50°C para 70°C .

Quando a temperatura passa de 60°C para 70°C o incremento na difusividade diminui com o aumento da velocidade.

Analisando simultaneamente as Tabelas 5.14 e 5.15 observou-se que a velocidade do ar proporciona sempre um incremento na difusividade, o mesmo fato não sendo observado para o caso da temperatura, conforme o anteriormente relatado.

Efetuada o mesmo procedimento, considerando os dados truncados na umidade comercial, e analisando a Tabela 5.11 e Tabela 5.16, observou-se a mesma tendência dos resultados anteriormente discutida para as Tabelas 5.8 e

Tabela 5.13. As conclusões são as mesmas, devendo ser incluído que a facilidade de transferência de massa é a mesma para temperatura de 60°C e velocidade de 1,5m.s⁻¹ e 70°C e 1,0m.s⁻¹ ou 1,5m.s⁻¹.

Baseado na temperatura de secagem de 60°C e 70°C e velocidade do ar acima de 1,0m.s⁻¹ procedeu-se uma secagem experimental utilizando-se de um secador de bandejas em escala piloto, conforme o demonstrado nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5.

TABELA 5.16. Intervalo de confiança para valores de difusividade efetiva estimados a partir do modelo difusional (n=5), com dados até umidade comercial (25%).

T (°C)	v (m.s ⁻¹)	intervalo de confiança (10 ¹⁰)	
		limite inferior	limite superior
50	0.5	2.55	2.96
	1.0	2.81	3.22
	1.5	4.19	4.66
60	0.5	2.43	2.85
	1.0	4.27	5.01
	1.5	5.42	7.30
70	0.5	3.94	4.57
	1.0	5.02	6.15
	1.5	5.59	6.99

2.55 = 2,55 - extender a equivalência para os demais valores.



Figura 5.1 - Matéria-prima utilizada no teste:
Banana (Musa acuminata subgrupo
Cavendish cultivar Nanica)

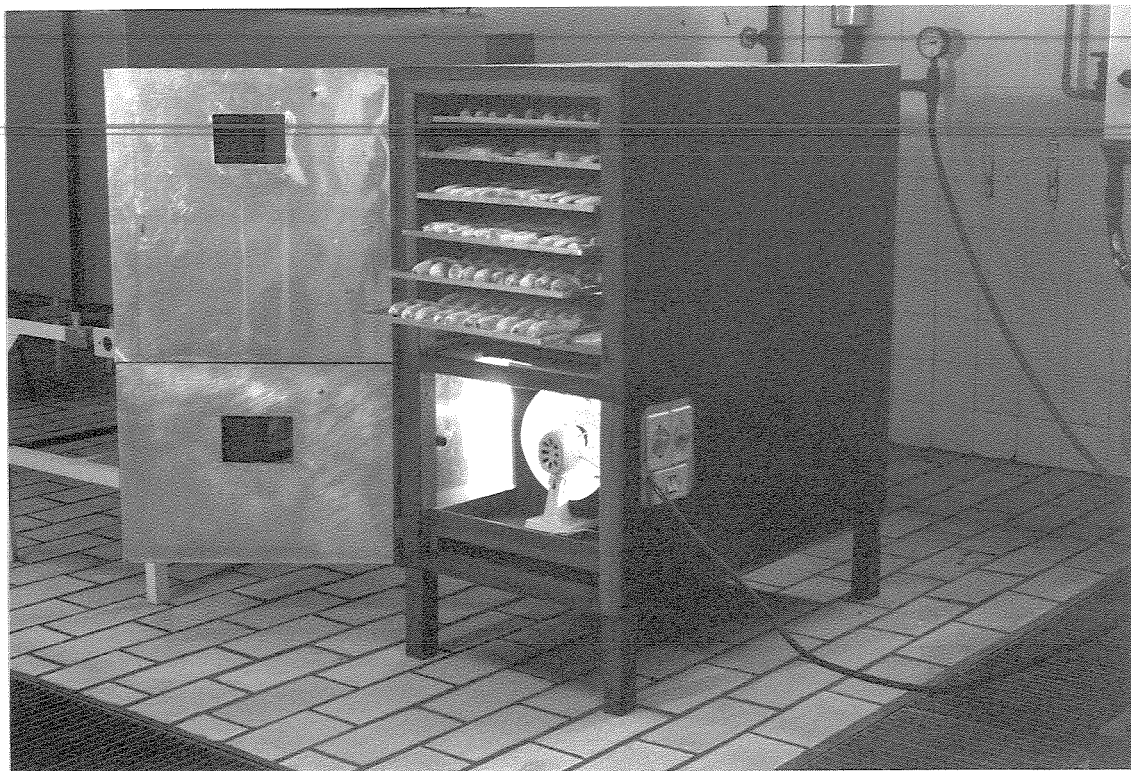


Figura 5.2 - Vista interna do secador de bandejas



Figura 5.3 - Secador carregado para o início do teste



Figura 5.4 - Prensagem da banana-passa para
homogeneização

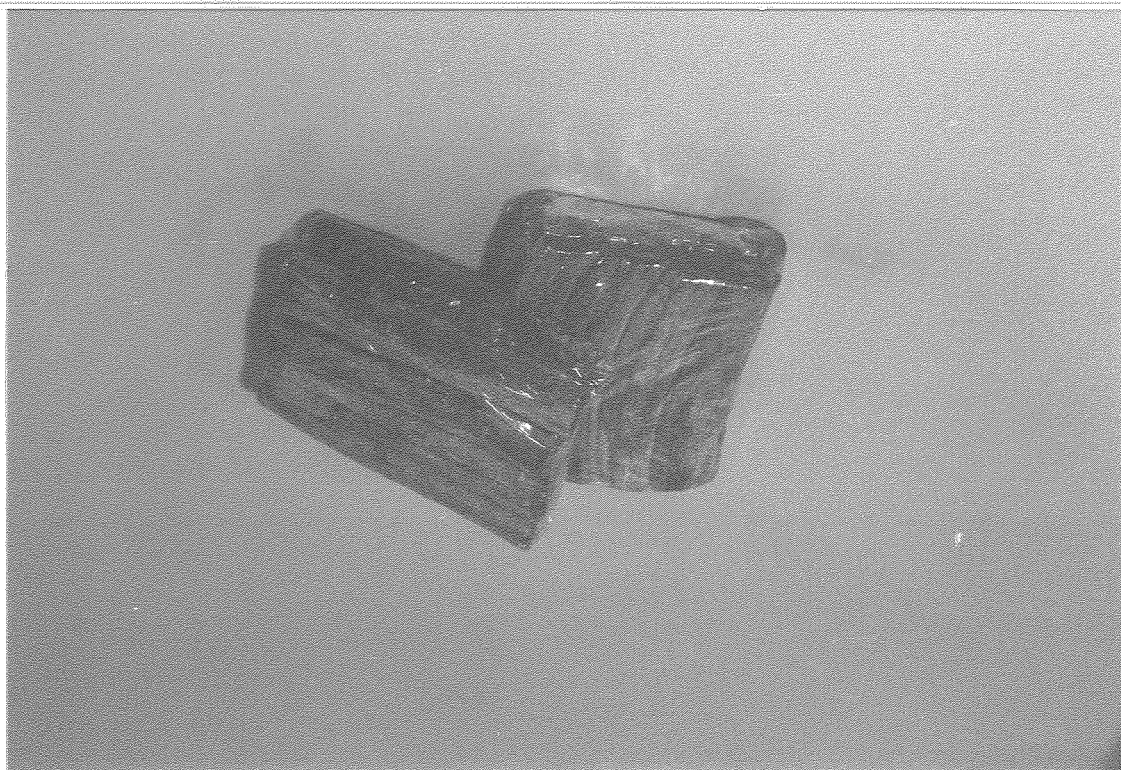


Figura 5.5 - Banana-passa pronta para comercialização

Os incrementos nas difusividades em função da velocidade do ar para cada temperatura e em função da temperatura para cada velocidade para dados truncados na umidade comercial foram calculados conforme as equações (14)

e (15), respectivamente e são mostrados nas Tabelas 5.17 e 5.18.

TABELA 5.17. Porcentagem de incremento na difusividade efetiva devido à variação de velocidade para dados até umidade comercial (25%).

T (°C)	variação em v (m.s ⁻¹)		
	0,5 a 1,0	1,0 a 1,5	0,5 a 1,5
50	9.51	46.62	60.57
60	75.90	36.96	140.92
70	31.25	12.51	47.67

9.51 = 9,51 - extender a equivalência para os demais valores.

TABELA 5.18. Porcentagem de incremento na difusividade devido à variação de temperatura.

v (m.s ⁻¹)	variação em T (°C)		
	50 a 60	60 a 70	50 a 70
0.5	-4.23	60.98	54.52
1.0	53.82	20.39	85.18
1.5	43.69	-1.10	42.11

-4.23 = 4,23 - extender a equivalência para os demais valores.

Observou-se que as Tabelas 5.17 e 5.18 apresentaram a mesma tendência dos resultados das Tabelas 5.14 e 5.15. Assim a análise dos resultados anteriormente relatados para os dados completos, permaneceram para os dados truncados na unidade comercial (25%).

Valores de difusividade para materiais biológicos calculados por vários autores foram compilados por DAUDIN (1983) para abacate: $D=2,3 \times 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (levando em conta a elevação da temperatura do produto) e $D=2,8 \times 10^{-9} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (sem levar em conta a elevação da temperatura); beterraba com açúcar ($D=5,0 \times 10^{-10} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; mandioca: $D=3,0 \times 10^{-10} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; pescado: $D=7,6 \times 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; maçã: $1,1 \times 10^{-9} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ < D < $3,6 \times 10^{-9} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; uva: $D=4,1 \times 10^{-10} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; batata: $0,9 \times 10^{-9} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ < D < $3,3 \times 10^{-10} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

LOMAURO, BAKSHI e LABUZA (1985), encontraram $D=0,146 \times 10^{-7} \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ para uva passa.

ROMAN, ROTSTEIN e URBICAN (1979), calcularam o valor da difusividade efetiva para os dois períodos de secagem de maçã: $D_1=2,57 \times 10^{-4} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $D_2=4,92 \times 10^{-7} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

YUSHENG e POULSEN (1988) encontram que os valores de difusividade efetiva para batata se situaram entre $1,596 \times 10^{-10} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $8,487 \times 10^{-10} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para temperaturas variando de 40 a 70°C e velocidade de 1,6 a 3,1 m.s⁻¹.

A magnitude da difusividade efetiva de banana está dentro destes valores de literatura para os materiais biológicos.

5.5. Energia de ativação

Um parâmetro importante no processo de secagem é a energia de ativação, que representa a dificuldade de retirada de água do material.

Baseado na equação de Arrhenius, que descreve a relação entre a difusividade e temperatura, e partindo do modelo difusional ($n=5$), foi calculada a energia de ativação, a partir da equação (17) em função da velocidade do ar, para toda a faixa da corrida experimental (dados completos) e para a faixa truncada até umidade comercial (25%).

$$D = A * \exp (-E_a/RT) \quad [16]$$

$$\ln D = \ln A - E_a/RT \quad [17]$$

sendo:

D - difusividade ($m^2.s^{-1}$)

T - temperatura ($^{\circ}K$)

E_a - energia de ativação ($J.mol^{-1}$)

A - constante

Os resultados da regressão são mostrados nas Tabelas 5.19 e 5.20 e os valores da energia de ativação na Tabela 5.21.

TABELA 5.19. Equação das retas obtidas pela regressão linear, para o cálculo da energia de ativação para toda a faixa experimental das curvas de secagem.

v (m.s ⁻¹)	equação	r
0.5	ln D = 7.3560 - 2067 * T ⁻¹	-0.8335
1.0	ln D = 10.5808 - 3045 * T ⁻¹	-0.9746
1.5	ln D = 7.3355 - 1864,5 * T ⁻¹	-0.8482

D - m².s⁻¹
T - °K
r - coeficiente de correlação
7.3560 = 7,3560 - extender a equivalência para os demais valores.

TABELA 5.20. Equação das retas obtidas pela regressão linear, para o cálculo da energia de ativação para dados até umidade comercial (25%).

v (m.s ⁻¹)	equação	r
0.5	ln D = 7.6712 - 2175.5 * T ⁻¹	-0.8222
1.0	ln D = 10.6954 - 3080.5 * T ⁻¹	-0.9746
1.5	ln D = 6.9966 - 1757 * T ⁻¹	-0.8523

7.6712 = 7,6712 - extender a equivalência para os demais valores.

TABELA 5.21. Valores de energia de ativação para toda a faixa experimental e até umidade comercial (25%), em função da velocidade do ar.

v (m.s ⁻¹)	Ea (kJ.mol ⁻¹)	
	dados completos	dados truncados
0,5	17,18	18,08
1,0	25,31	25,61
1,5	15,50	14,60

Valores de energia de ativação para materiais biológicos foram calculados por JASON (1958) que encontrou valores na faixa de 30,08kJ.mol⁻¹ a 34,64kJ.mol⁻¹ para músculo de peixe e MAZZA e Le MAUGER (1980) que encontraram Ea=21,66kJ.mol⁻¹ para cebola. DAUDIN (1983) em uma compilação bibliográfica apresentou valores de Ea=40kJ.mol⁻¹ para abacate, Ea=29kJ.mol⁻¹ para beterraba, e Ea=52kJ.mol⁻¹ para batata.

O magnitude dos valores de energia de ativação para o caso da banana está dentro destes valores da literatura.

5.6. Método empírico para determinação do tempo de secagem

A modelo de Sazhin, equação (10), citado por STRUMILLO e KUDRA (1986) permitiu estimar um coeficiente de taxa de secagem, K , e o conteúdo de umidade de equilíbrio inicial, X_{ie} ou X_{cr} . O autor relata que este conteúdo X_{ie} corresponde ao conteúdo de umidade do material durante o período inicial de secagem, onde a temperatura do ar de secagem na superfície do material é igual à temperatura de bulbo úmido. Pela Figura 4.1, tem-se que este é o período de secagem constante, e assim podemos dizer que o valor de X_{ie} corresponde ao valor da umidade crítica, X_{cr} .

Usando a equação (10), partindo dos valores do conteúdo de umidade inicial, conteúdo de umidade de equilíbrio e conteúdo de umidade ao longo do tempo de secagem, foi efetuado o ajuste do modelo onde foram estimados os valores de X_{cr} e K , usando dados de toda a faixa experimental e dados truncados na umidade comercial.

O ajuste só foi possível quando efetuado para toda faixa experimental, e os resultados são mostrados na Tabela 5.22. Sendo assim, a análise foi executada considerando apenas os resultados para o modelo ajustado.

A Tabela 5.23 apresenta os intervalos de tempo onde teoricamente estariam localizados os valores de X_{cr} nas curvas experimentais de secagem de banana.

Para uma visualização do ajuste foram graficados os valores experimentais e os valores ajustados pelo modelo de Sazhin, equação (10) em função do tempo de secagem. As curvas são mostradas no Anexo H, Figuras de H1 a H9.

Os resultados demonstram que ajuste pelo modelo de sazhim não apresentaram bons resultados nos níveis do ajuste pelo modelo difusional.

TABELA 5.22. Valores da umidade de equilíbrio inicial (X_{1e}) e da constante K , obtidos pela equação de Sazhin a partir das curvas de secagem de banana (Musa acuminata subgrupo Cavendish cv Nanica).

T (°C)	v (m.s ⁻¹)	X _{1e} (DPA) (g/g ms)	K (DPA)
50	0.5	1.6000 (0.1226)	0.0157 (0.0012)
	1.0	1.6685 (0.1272)	0.0138 (0.0009)
	1.5	1.7221 (0.0742)	0.0327 (0.0017)
60	0.5	2.3902 (0.1383)	0.0154 (0.0015)
	1.0	2.3659 (0.2053)	0.0178 (0.0019)
	1.5	1.5642 (0.1924)	0.0309 (0.0033)
70	0.5	1.9692 (0.1637)	0.0223 (0.0026)
	1.0	1.9353 (0.2396)	0.0218 (0.0031)
	1.5	1.5538 (0.0773)	0.0516 (0.0025)

1.600 = 1,600 - extender a equivalência para os demais valores

TABELA 5.23. Intervalo de tempo, t , de localização de X1e nas curvas de secagem de banana (Musa acuminata subgrupo Cavendish cv Nanica)

T (°C)	v (m.s ⁻¹)	intervalo de tempo (h)
50	0,5	5<t<6
	1,0	6<t<7
	1,5	3<t<4
60	0,5	4<t<5
	1,0	4<t<5
	1,5	4<t<5
70	0,5	4<t<5
	1,0	3<t<4
	1,5	2<t<3

5.7. Taxa de secagem

5.7.1. Modelo difusional

Usando os valores de difusividade efetiva estimados no ajuste, considerando o modelo com cinco termos da série, equação (11), foram estimadas as taxas de secagem. As equações são apresentadas no Anexo C, Programa C8.

5.7.2. Modelo empírico

Usando os valores de K da Tabela 5.22, foi possível encontrar pela equação (12) a taxa de secagem para cada condição experimental. As equações são apresentadas no Anexo C, Programa C9.

Pelas Figuras do Anexo I, observando as curvas referentes à equação de Sazhin, não ocorreu o período de taxa constante. Aliado ao fato de que a dispersão dos valores teóricos e experimentais, mostrado no Anexo H nas Figuras de H1 a H9, que foram obtidas pelo ajuste dos dados através do modelo de Sazhin, equação (10), nos levou a acreditar que os valores de X_{1e} não deveriam ser considerados para cálculos posteriores.

5.7.3. Uso de funções splines cúbicas

Os resultados dos valores da taxa de secagem usando o ajuste através das splines cúbicas, são mostrados nas Tabelas 5.24, 5.25 e 5.26.

TABELA 5.24. Valores das taxas de secagem obtidos pelas funções splines cúbicas nos "nós" entre cada intervalo, para a temperatura de 50°C e velocidades do ar 0,5, 1,0 e 1,5m.s⁻¹.

50°C 0,5m.s ⁻¹		50°C 1,0m.s ⁻¹		50°C 1,5m.s ⁻¹	
X	-dX/dt	X	-dX/dt	X	-dX/dt
0.1144	0.0009	0.1923	0.0041	0.2176	0.0037
0.1614	0.0030	0.3407	0.0098	0.3587	0.0176
0.2698	0.0066	0.5051	0.0184	0.3956	0.0186
0.3261	0.0100	0.5863	0.0221	0.5218	0.0277
0.6107	0.2069	0.9454	0.0402	0.6557	0.0377
0.7561	0.0299	1.3577	0.0657	0.8729	0.0516
0.8921	0.0367	1.9406	0.1474	1.1174	0.0716
1.4136	0.0793	2.7481	0.2172	1.5427	0.0975
2.5300	0.1357			1.9700	0.2257
				2.6158	0.3498

0.1144 = 0,1144 - estender a equivalência para os demais valores.

TABELA 5.25. Valores das taxas de secagem obtidos pelas funções splines cúbicas nos "nós" entre cada intervalo, para a temperatura de 60°C e velocidades do ar 0,5, 1,0 e 1,5m.s⁻¹.

60°C 0,5m.s ⁻¹		60°C 1,0m.s ⁻¹		60°C 1,5m.s ⁻¹	
X	-dX/dt	X	-dX/dt	X	-dX/dt
0.3555	0.0021	0.3189	0.0034	0.2044	0.0121
0.4429	0.0082	0.4165	0.0115	0.3046	0.0266
0.4711	0.0108	0.4420	0.0142	0.5641	0.0613
0.8318	0.0300	0.5745	0.0332	0.7882	0.0917
1.1224	0.0447	0.8648	0.0645	1.2591	0.1422
2.0918	0.1081	1.2682	0.0989	1.7914	0.2307
2.7645	0.2163	1.7190	0.1242	2.7511	0.3436
3.3243	0.2982	2.9304	0.3435		
		3.7686	0.4419		

0.3555 = 0,3555 - estender a equivalência para os demais valores.

TABELA 5.26. Valores das taxas de secagem obtidos pelas funções splines cúbicas nos "nós" entre cada intervalo, para a temperatura de 70°C e velocidades do ar 0,5, 1,0 e 1,5m.s⁻¹.

70°C 0,5m.s ⁻¹		70°C 1,0m.s ⁻¹		70°C 1,5m.s ⁻¹	
X	-dX/dt	X	-dX/dt	X	-dX/dt
0.2423	0.0041	0.2309	0.0036	0.1360	0.0053
0.3686	0.0099	0.3085	0.0074	0.1472	0.0063
0.3903	0.0121	0.3667	0.0129	0.2037	0.0126
0.4598	0.0247	0.4852	0.0293	0.2638	0.0178
0.6718	0.0427	0.7645	0.0686	0.4280	0.0421
0.9854	0.0672	1.2402	0.1256	0.7176	0.0731
1.4266	0.1133	1.5246	0.0162	1.0687	0.1054
1.8198	0.1492	2.4384	0.3180	1.7220	0.2585
2.3902	0.2535	3.1981	0.3985	2.3901	0.3561
3.0313	0.3396				

0.2423 = 0,2423 - extender a equivalência para os demais valores.

A partir das equações do Programa C8 e Programa C9, e dos valores das funções spline cúbicas das tabelas 5.24, 5.25 e 5.26 foram graficados a taxa de secagem (-dx/dt) em função do conteúdo de umidade (X) para uma visualização global da análise pelos 3 métodos e verificar uma possível sobreposição de curvas. As curvas são mostradas no Anexo I, Figuras de I1 a I9.

Conforme a tendência experimental das curvas de secagem mostradas no ajuste efetuado pelo modelo difusional (Anexo G), as taxas obtidas pela equação de Sazhin e pelo uso de função spline cúbica deveriam acompanhar a tendência da curva experimental.

Portanto pode-se concluir pelas Figuras de I1 a I9 do Anexo I, que as curvas de secagem de banana, os cálculos propostos por métodos que usaram a equação de Sazhin e a função spline cúbica não são adequadas.

5.8. Normalização

Conforme os resultados de taxa de secagem apresentados, a análise foi efetuada usando a equação de taxa de secagem baseada no modelo difusional para $n = 5$.

As curvas de taxa de secagem adimensionalizadas pela equação (14) são mostradas no Anexo J, nas Figuras J1, J2 e J3, ou seja, as taxas de secagem adimensionalizadas foram graficadas para cada temperatura e as três velocidades ($0,5$, $1,0$ e $1,5 \text{ m.s}^{-1}$), e nas Figuras J3, J4 e J5, onde as taxas adimensionalizadas foram graficadas para cada velocidade e as três temperaturas (50 , 60 e 70°C). As curvas de taxa de secagem adimensionalizadas pela equação (15) são mostradas no Anexo J, nas Figuras de J7 a J12, que foram construídas pelo mesmo procedimento que o das Figuras de J1 a J6.

Conforme pode ser observado, ocorreu um melhor agrupamento de dados para a equação (14) e ainda pela, Figura J3 observou-se que os dados relativos a 70°C demonstraram uma nítida tendência de normalização, principalmente para baixos conteúdos de umidade.

No entanto, estas curvas demonstraram que no caso de secagem de banana a normalização através das equações propostas, equação (14) e equação (15), é inadequada.

6. CONCLUSÕES

- Para ajuste das isotermas de dessorção de umidade para banana, pode-se utilizar o modelo original de BET com o número de camadas polimoleculares (n) igual a cinco, para as temperaturas de 50, 60 e 70°C, e atividades de água de 0,11 a 0,70.

- Os ajustes das curvas de secagem de banana efetuados pelo modelo difusional e pela equação de Sazhin demonstraram ser o modelo difusional o mais adequado para as nove curvas de secagem levantadas a 50, 60 e 70°C, e 0,5, 1,0 e 1,5 ms⁻¹.

- O modelo difusional aplicado a cilindro com os cinco primeiros termos da série de Fourier mostrou ser suficiente tanto para ajustar as curvas em toda a faixa experimental (até baixos valores de conteúdo de umidade), quanto para as curvas até o nível de conteúdo de umidade comercial.

- A partir do modelo difusional com os cinco primeiros termos da série de Fourier, foi estimada a difusividade efetiva, cujos valores se situaram entre $2,62 \times 10^{-10}$ e $6,53 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

proporcionou sempre um incremento na difusividade. Por outro lado, o incremento de temperatura para uma dada velocidade do ar não necessariamente produziu um aumento na difusividade.

- Os resultados das difusividades efetivas mostraram que o melhor parâmetro de secagem foi 60 e 70°C e $1,5\text{ms}^{-1}$ ou 70°C e $1,0\text{ms}^{-1}$.

- Tomando como base a velocidade de $1,0\text{ms}^{-1}$ que apresentou a melhor correlação linear, a energia de ativação estimada apresentou um valor com magnitude de 25kJmol^{-1} .

- Um fraco ajuste apresentado pela equação de Sazhin ressaltou a não existência do ponto de inflexão, comumente referido como ponto de transição entre o período de taxa constante e o período de taxa decrescente de secagem. Isto portanto inviabilizou qualquer tentativa de uso de pseudo taxa constante de secagem para normalização das curvas.

- As curvas de taxa de secagem calculadas através do modelo difusional, da equação de Sazhin e uso de função spline cúbica, mostraram ser o modelo difusional o mais adequado.

- A normalização das curvas através da utilização da taxa de evaporação da água pura demonstrou ser ineficiente para o presente estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOWITZ, M. & STEGUN, I.A. eds. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables. Washington, DC, United States Department of Commerce, c1964, 1970. p.539, 391, 401. (National Bureau of Standards Applied Mathematical Series, 55)
- ALVARENGA, L.C.; FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J.B.; HARA, T. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem. R. Bras. Armazenamento, Vicosá, 5(1):5-18, 1980.
- ASAE DATA. Psychrometric chart, high temperatures. ASAE Standards, St. Joseph, MI, 38:11, 1991.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). Official methods of Analysis 14.ed. Arlington, Virginia, 1984. 1v. (várias paginações)
- BANANA: oportunidades agroindustriais. Rio de Janeiro, Fundação Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social 1978. p.107-50.
- BLEINROTH, E.W. Matéria-prima. In: Banana: da cultura ao processamento e comercialização, Campinas, ITAL, 1978, p.63-91.
- BOQUET, R.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H.A.; Equations for fitting water sorption isotherms of foods. II. Evaluation of various two-parameter models. J. Food Technol., 13:319-27, 1978.
- BRACHEL, J. van. Mass transfer in convective drying. Adv. Drying, 1:217-67, 1980.
- BRAY, W.H. Water vapor pressure control with aqueous solutions of sulfuric acid. J. Mater., 5(1):233-48, 1970.

- BRUNAUER, S.; EMMETT, P.H.; TELLER, F. Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Am. Chem. Soc., 60(2):309-19, 1938.
- CARBONELL, J.V.; MADARRO, A.; PINAGA, F.; PENA, J.L. Deshidratación de frutas y hortalizas con aire ambiente. IV. Cinética de adsorción y desorción del agua en zanahorias. R. Agroquim. Tecnol. Aliment., 24(1):94-104, 1984.
- CHEN, C.S. Equilibrium moisture curves for biological materials. Trans. ASAE, St. Joseph, MI, 14(5):924-26, 1971.
- CHEN, H.C. & CHEN, C.S. Effects of dehydration on volume contraction in mushrooms. J. Agric. Eng. Res. 19:97-7, 1974.
- CHIRIFE, J. & IGLESIAS, H.A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods; part I - a review. J. Food Technol., 13:159-74, 1978.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO (CESP). Banana-passa: redenção do Ribeira. Toda Fruta, São Caetano do Sul, :22-3, abril, 1986.
- CORNEJO, F.E.P. Estudo dos parâmetros de secagem e construção de um secador de baixo custo para filés salgados de pescado. Campinas, 1987, 86p. (Dissertação - Mestrado - Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP)
- CRANK, J. Diffusion in a cylinder. In: _____. Mathematics of diffusion, Oxford, Clarendon Press, c1975. p.69-88.
- DAUDIN, J.D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des. Sci. Aliments, 3(1):1-36, 1983.
- DENLOY, A.O. & ADE JOHN, A.O. Moisture sorption isotherms of some nigerian food grains. J. Stored Prod. Res., 21(2):53-8, 1985.
- DEVRIES, D.A. & AFGAN, N.H. Heat and mass transfer in the biosphere. Washington, DC, Scripta, 1975. p1-47.
- ENGELS, C.; HENDRICKX, M.; De SAMBLANX, S.; GRYZE, I.; TOBBACK, P. Modeling water diffusion during long-grain rice soaking. J. Food Eng., 5(1):55-73, 1986.
- FILGUEIRAS, O. Banana para todos os gostos. Globo Rural Economia:14-7, junho, 1990.

- FORNELL, A., BIMBINET, J.J.; ALMIN, Y. Experimental study and modelization for air drying of vegetable products. Lebensm. Wiss. - u. Technol., 14(2):96-100, 1980.
- FRUTAS FRESCAS. Informação semanal da CACEX, Rio de Janeiro, 23(1074):4-11, maio, 1988.
- GÁL, S. Recent advances in techniques for determination of sorption isotherms. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF WATER RELATIONS OF FOODS, Glasgow, 1974. Proceedings of an ... London, Academic, 1975: p.139-54.
- GERALD, C.F. & WHEATHEY, P.O. Applied numerical analysis. 3.ed. Reading Massachusetts, Addison-Wesley, c1984. 598p. Projeto CRIACOCI, algoritmos implementados por Mariangela Amendola e testados por Elaine Borghi, professoras do Departamento de Planejamento e Produção Agropecuária da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP. 1988-1991.
- GREENWALT, C.H. Partial pressure of water out of aqueous solutions of sulfuric acid. Ind. Eng. Chem., 17(5):522-3, 1925.
- GURNEY, H.P. & LURIE, J. Charts for estimating temperature distributions in heating or cooling solids shapes. Ind. Eng. Chem., 15(1):1170-72, 1923.
- HAENDLER, L. Produits de transformation de la banane. Fruits, 21(7):329-42, 1966.
- HALSEY, G. Physical adsorption in non-uniform surfaces. J. Chem. Phys., 16(10):931-7, 1948.
- IGLESIAS, H.A.; CHIRIFE, J. LOMBARDI, J.L. An equation for correlating equilibrium moisture content. J. Food Technol., 10:289-97, 1975.
- IGLESIAS, H. & CHIRIFE, J. BET monolayer in dehydrated foods and food components. Lebensm. Wiss. - u. Technol., 9(2):107-13, 1976.
- IGLESIAS, H. & CHIRIFE, J. An empirical equation for fitting water sorption isotherms of fruits and related products. J. Inst. Can. Sci. Technol. Aliment., 11(1):12-5, 1978.
- IGLESIAS, H.; CHIRIFE, J.; BOQUET, R. Prediction of water sorption isotherms of food models from knowledge of components sorption behavior. J. Food Sci., 45:450-2, 1980.

- IGLESIAS, H. & CHIRIFE, J. Handbook of food isotherms: water sorption parameters for food and food components. New York, Academic, c1982. (Food Science and Technology: a serie of monographs)
- JAAFAR, F. & MICHALOWSKI, S. Modified BET equation for sorption/desorption isotherms. Drying Technol., 8(4):811-27, 1990.
- JASON, A.C. A study of evaporation and difusion processes in the drying of fish muscle. In: Fundamental aspects of the dehydration of foodstuffs, Aberdeen, 1958.
- KEYE, R.B. Moisture: solid relationships. In: _____. Drying principles and practices, Oxford, 1972. p.19-49.
- KING, C.J. Rates of moisture sorption and desorption in porous dried foodstuffs. Food Technol., 22:165-71, 1968.
- KOSOSKI, A.R. Dois métodos comparando equilíbrio higroscópico dos grãos. R. bras. Armazenamento, Viçosa, 2(2):31-43, 1977.
- KUMAR, K.R. & BALASUBRAMANYAM, N. Moisture sorption and the applicability of the Brunauer Emmett Teller equation for some dry food products. J. Stored Prod. Res., 22(4):205-9, 1986.
- LABUZA, T.P. Sorption phenomena in foods. Food Technol., 22:15-24, 1968.
- LEWIS, W.K. The rate drying of solids materials. J. Ind. Eng. Chem., 13(5):427-32, 1921.
- LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: fruit, vegetable e meat products. Lebensm. - Wiss. u. - Technol., 18(2):111-7, 1985.
- LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Moisture transfer properties of dry and semimoist foods. J. Food Sci., 50:397-400, 1985.
- LUIKOV, A.V. & MIKHAILOV, Yu. A. Teory of energy and mass transfer. Oxford, Pergamon, 1965. 329p.
- MAROULIS, Z.B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D.; SARAVACOS, G.D. Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. J. Food Eng., 7(1):63-78, 1988.

- MAZZA, G. & Le MAUGER, M. Water sorption properties of yellow globe onion (*Allium cepa* L.) Can. Inst. Food Sci. Technol. J., 11(4):189-93, 1978.
- MAZZA, G. Thermodynamic considerations of water vapor sorption by horseradish roots. Lebensm. Wiss. u. - Technol., 13(1):13-7, 1980.
- MAZZA, G. & Le MAUGER, M. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. J. Food Technol., 15(2):181-94, 1980.
- MOWLAH, G.; TAKANO, K.; KAMOI, I.; OBARA, T. Water transport mechanism and some aspects of quality changes during air dehydration of bananas. Lebensm. Wiss. u. - Technol., 16(2):103-7, 1983.
- MEDINA, J.C. Banana, cultura. In: Banana: da cultura ao processamento e comercialização. Campinas, ITAL, 1978p.7-62 (Série frutas tropicais 3)
- NGODDY, P.O. & BAKER-ARKEMA, F.W. A generalized theory of sorption phenomena in biological materials. Part I. The isotherms equation. Trans. ASAE, 13:612-7, 1970.
- NOGUEIRA, R.I.; PARK, K.J.; CORNEJO, F.E.P. Application of the BET and GAB models in the isotherms of desorption for banana. J. Food Eng., 91-572. (no prelo)
- NONHEBEL, G. & MOSS, A.A.H. Simplified theory of drying of solids. In: Drying of solids in the chemical industry. London, Butterworth, c1971. p.10-1.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO (FAO). Table 20. Quarterly bulletin of statistics, Roma, 3(4):31, 1990.
- PARK, K.J. Métodos matemáticos na engenharia de alimentos. Campinas, Fundação Tropical de Pesquisa e Tecnologia, 1980. 206p.
- PARK, K.J. Estudo comparativo de coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem, Campinas, 1987. 54p. (Tese - Livre Docência - Área de Fenômenos de Transporte - Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP)
- PARK, K.J. Fundamentos de secagem, Campinas, 1988. 48p. (Apostila - Curso de aperfeiçoamento em tecnologia de alimentos - Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP)

PARK, K.J. & NOGUEIRA, R.I. Modelos para ajuste de isotermas de sorção de alimentos. In: SEMINÁRIO DE ATIVIDADE DE ÁGUA, 2, Campinas, 1990. Instituto de Tecnologia de Alimentos e Sociedade Brasileira de Tecnologia de Alimentos. 8p.

PATENTE INDUSTRIAL PI8905036, EMBRAPA/UNICAMP. Aparelho laboratorial para controle de perda de umidade de produtos biológicos. Inventores: Felix Emílio Prado Cornejo; Kil Jin Park; Regina Isabel Nogueira; Argemiro de Castro Villaca.

PERRY, J.H. Chemical engineers' handbook. 6.ed. New York, McGraw-Hill, c1984. 1v. (várias paginações)

RESOLUÇÃO 12/78 (12/7 frutas secas ou dessecadas) da Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos (CNNPA)
In: Compêndio da Legislação de Alimentos: consolidação das normas e padrões de alimentos. São Paulo, Associação Brasileira das Indústrias da Alimentação (ABIA) 1985. v.1/A, p.7.5(78)

ROMAN, G.N.; ROTSTEIN, E.; URBICAN, M.J. Kinetics of water vapor desorption from apples. J. Food Sci., 44(1):193-7, 1979.

SARAVACOS, G.D.; TSIOURVAS, D.A.; TSAMI, E. Effect of temperature on the water adsorption isotherms of Sultana raisins. J. Food Sci., 51((2):381-7, 1986.

SCHAR, W. & RUEGG, M. The evaluation of GAB constants from water vapor sorption data. Lebensm. - Wiss. u. - Technol., 18(4): 225-9, 1985.

SHERWOOD, T.K. The drying of solids I. Ind. Eng. Chem. 21(1):12-6, 1929a.

SHERWOOD, T.K. The drying of solids II. Ind. Eng. Chem. 21(10):976-80, 1929b.

SKELLAND, A.H.P. Molecular diffusion. In: _____. Diffusional mass transfer. New York, Wiley, c1974. p:6-48.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM (SAS). SAS user's guide: Statistics, Version 5.ed. Cary, NC: SAS Institute Inc., 1985. 956p.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM (SAS). Introductory guide. 3.ed. Cary, NC: SAS Institute Inc., 1985. 99p.

STRUMILLO, C. & KUDRA, T. Drying kinetics. In: _____. Drying: principles, applications and design. New York, Gordon and Breach Science, c1986. v.3, p.68-98.

- TEIXEIRA NETO, R.O. & QUAST, D.G. Isotermas de adsorção de umidade em alimentos. Colet. Inst. Tecnologia Alim., Campinas, 8:141-97, 1977.
- TOUPIN, C.J.; Le MAUGER, M.; MCGREGOR, J.R. The evaluation of BET constants from sorption isotherms data. Lebensm. - Wiss. u. - Technol., 16(3):153-6, 1983.
- TREYBAL, R.E. Drying. In: _____. Mass transfer operations. New York, McGraw-Hill, 1968. p.569-75.
- VAN DEN BERG, C. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. In: Engineering and Food, v.1., B.M. McKenna, ed., Elsevier Applied Science, London, 1984, p.311-21.
- YOUNG, J.H. Evaluation of models to describe sorption and desorption equilibrium moisture content isotherms of Virginia-type peanuts. Trans. ASAE, 19(1):146-50,155, 1976.
- YUSHENG, Z. & POULSEN, K.P. Diffusion in potato drying. J.Food Eng., 7(4):249-62, 1988.

ABSTRACT

The drying process of banana fruit (*Musa acuminata* subgroup Cavendish cultivar Nanica) to obtain dried banana was accomplished by utilizing three temperatures (50, 60, and 70°C) and three air velocities (0,5, 1,0, and 1,5ms⁻¹). The experimental data from the drying process were performed using the diffusion model for cylindrical shaped products based on the initial five terms of the Fourier series. The values for the effective diffusivity occurred between $2,62 \times 10^{-10}$ and $6,53 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. The activation energy calculated for temperatures 50, 60 and 70°C and air velocity of 1,0m.s⁻¹ was 25kJ.mol⁻¹. Sazhin empirical equation was shown to be inadequate to express the drying curves. It was not possible to normalize the drying curves by the dimensionless concept of the drying rate. The drying rate was obtained from the ratio of decreasing period of the drying rate and the steady drying rate. In addition, the banana fruit desorption isotherms were fitted by the BET model with five polimolecular layers for temperatures of 50, 60 and 70°C and water activity between 0,11 and 0,70.

ANEXOS

ANEXO A - Escala de maturação de banana

Quadro 1 - Escala de maturação de banana, segundo o aspecto e os teores de amido e açúcar.

Aspecto da fruta	Amido (%)	Açúcar (%)
1- verde	21.5 a 19.5	0.1 a 0.2
2- verde com traços amarelos	19.5 a 16.5	2.0 a 5.0
3- mais verde que amarela	18.0 a 14.5	3.5 a 7.0
4- mais amarela que verde	15.0 a 9.0	6.0 a 12.0
5- amarela extremidade verde	10.5 a 2.5	10.0 a 18.0
6- inteiramente amarela	4.0 a 1.0	16.5 a 19.5
7- amarela, pequenas manchas pardas	2.5 a 1.0	17.5 a 19.0
8- amarela, grandes manchas pardas	1.5 a 1.0	18.5 a 19.0

Fonte: HAENDLER, L. (1966)

19.5 = 19,5 - extender a equivalência para os demais valores

ANEXO B - Resolução da equação de difusão baseada na segunda lei de Fick, unidirecional (PARK, 1980).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} * \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{D * \partial C}{\partial r} \right)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \left(D * 1 * \frac{\partial C}{\partial r} + r * D * \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right) \quad [a1]$$

a difusividade D é constante:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D * \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad [a2]$$

resolvendo pelo método de separação de variáveis:

$C(r,t) = f(t) * g(r)$, então

$$\frac{\partial C}{\partial t} = g(r) * f'(t)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} = f(t) * g''(r)$$

$$\frac{\partial C}{\partial r} = f(t) * g'(r)$$

que substituindo em [a2]:

$$g(r) * f'(t) = D * (f(t) * g''(r) + 1/r * f(t) * g'(r))$$

$$\frac{1}{D} * f'(t) = \frac{f(t) * g''(r)}{g(r)} + \frac{1}{r} * \frac{f(t) * g'(r)}{g(r)}$$

$$\frac{1}{D} * \frac{f'(t)}{f(t)} = \frac{g''(r)}{g(r)} + \frac{1}{r} * \frac{g'(r)}{g(r)} = - H^2$$

então tem-se;

$$I) \quad \frac{1}{D} * \frac{f'(t)}{f(t)} = -H^{\text{R}}, \text{ que resolvendo:}$$

$$f'(t) + D * H^{\text{R}} * f(t) = 0$$

$$\frac{d f(t)}{dt} = -D * H^{\text{R}} * f(t)$$

$$\frac{d f(t)}{f(t)} = -D * H^{\text{R}} * dt$$

$$\ln f(t) = -D * H^{\text{R}} * t$$

$$f(t) = A * \text{EXP}(-D * H^{\text{R}} * t)$$

$$II) \quad \frac{g''(r)}{g(r)} + \frac{g'(r)}{r g(r)} = -H^{\text{R}}, \text{ que resolvendo:}$$

$$r g''(r) + g'(r) + H^{\text{R}} r g(r) = 0 \quad (*r)$$

$$r^{\text{R}} g''(r) + r g'(r) + H^{\text{R}} r^{\text{R}} g(r) = 0$$

para encontrar $g'(r)$ e $g''(r)$ faz-se:

$$u = H r$$

$$\frac{\partial g}{\partial r} = \frac{\partial g}{\partial u} * \frac{\partial u}{\partial r} \quad \text{---->} \quad \frac{\partial g}{\partial r} = H \frac{\partial g}{\partial u}$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial r^2} = H^2 \frac{\partial^2 g}{\partial u^2}$$

então:

$$\frac{u^{\text{R}}}{H^{\text{R}}} * H^{\text{R}} * \frac{\partial^2 g}{\partial u^2} + \frac{u}{H} * H * \frac{\partial g}{\partial u} + H^{\text{R}} * \frac{u^{\text{R}}}{H^{\text{R}}} * g = 0$$

$$u^{\text{R}} * \frac{\partial^2 g}{\partial u^2} + u * \frac{\partial g}{\partial u} + u^{\text{R}} * g = 0$$

é uma função de Bessel cuja solução é:

$$g(Hr) = B * J_0(Hr) + C * Y_0(Hr)$$

onde:

A, B, C e H^2 são arbitrários.

A solução geral para a equação a.2 é:

$$C(r,t) = \sum_{n=0}^{\infty} \text{EXP}(-D H_n^2 t) * (A_n J_0(H_n r) + B_n Y_0(H_n r)) \quad [a3]$$

avaliando a equação a3 no centro do cilindro tem-se $Y_0(0) \rightarrow -\infty$, ABRAMOWITZ e STEGUN (1970), que fisicamente não é possível, pois a concentração de água no centro é finita. Então:

$B_n \rightarrow 0$ e portanto:

$$C(r,t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \text{EXP}(-D H_n^2 t) * J_0(H_n r) \quad [a4]$$

Para avaliar A_n e H_n é necessário utilizar as condições de contorno.

Para simplificar são feitas as seguintes hipóteses:

a) a resistência externa é desprezível e assim a concentração na superfície atinge instantaneamente a concentração do ambiente, ou seja a concentração de equilíbrio:

$$C(r_0, t) = 0, \text{ e portanto: } J_0(H_n r_0) = 0$$

$H_n = H_1, H_2, H_3, \text{ etc}$ são raízes da equação

b) o cilindro com concentração inicial é submetido subitamente à concentração do ambiente (equilíbrio) e consequentemente:

$C(r,0) = C_0 = C_e - C_0$, cuja distribuição é uniforme em toda superfície. A solução do problema é:

$$C(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2 C_0 J_0(\#_n r)}{\#_n r_0 J_1(\#_n r_0)} * \text{EXP}(-D \#_n^2 t) \right) \quad [a5]$$

onde:

$\#_n = b_n$ - raízes de $J_0(b_n r_0) = 0$

$J_0(br)$ - função de Bessel da primeira espécie de ordem zero

$J_1(b_n r)$ - função de Bessel da primeira espécie de primeira ordem.

A avaliação da equação a.5 é simplificada pelo uso de valores médios das funções de Bessel. Então:

$$\frac{C - C_e}{C_0 - C_e} = \frac{4}{r_0^2} * \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b_n^2} \text{EXP}(-D b_n^2 t) \quad [a6]$$

Em termos de secagem, as concentrações podem ser convertidas de conteúdo de umidade por unidade de massa de matéria seca. Considerando o encolhimento desprezível, o peso de matéria seca por unidade de volume é constante, e assim é possível escrever

SKELLAND (1974):

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{4}{r_o^2} * \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b_n^2} \text{EXP} (-D b_n^2 t) \quad [a7]$$

onde:

X, X_o, X_e são valores médios

X - conteúdo de umidade (g H₂O/g ms)

X_o - conteúdo de umidade inicial (g H₂O/g ms)

X_e - conteúdo de umidade equilíbrio (g H₂O/g ms)

r_o - raio inicial do cilindro (banana) (m)

b_n - raízes de J₀(b_na) = 0

t - tempo, a partir do período taxa decrescente(s)

D - difusividade efetiva (m²/s)

Observação: no texto a eq.[a7] foi denominada eq.8.

ANEXO C - Programas utilizados para tratamento de dados
através do pacote estatístico SAS, e do FORTRAN,
instalados no VAX da UNICAMP.

Procedimentos SAS (SAS, 1985a)

. PROC NLIN

Em um modelo não-linear, para se estimar um parâmetro, é usado um processo iterativo, onde um valor inicial para este é escolhido ("chute inicial") e continuamente desenvolvido até que a soma dos quadrados dos resíduos seja minimizada. Para achar o mínimo as derivadas da função são igualadas a zero.

No PROC NLIN existem quatro métodos iterativos disponíveis:

- . Método de Gauss-Newton modificado;
- . Método Marquardt;
- . Método gradiente ou "steepest-descent"; e
- . Método secante multivariada ou posição falsa (DUD).

Estes métodos computacionais assumem que o modelo é uma função contínua nos parâmetros.

Para cada modelo não-linear a ser analisado é necessário especificar:

- . Nomes e valores iniciais dos parâmetros a serem estimados;
- . O modelo;

- . As derivadas parciais do modelo com relação a cada parâmetro a ser estimado (exceto para o método DUD);
- . Intervalo de confiança dos valores dos parâmetros;
- . A produção de um novo arquivo SAS contendo os resíduos, estimativa dos parâmetros e a soma dos quadrados dos resíduos; e
- . A definição da função a ser minimizada.

O arquivo de saída é constituído por:

- 1) Primeira parte - informações da fase iterativa; e
- 2) Segunda parte - divisão das somas dos quadrados, que é calculada diretamente dos valores experimentais e preditos.
- 3) Final - estimativas dos parâmetros, e a tabela de análise de variância da regressão (ANOVA).

Geralmente os coeficientes estão altamente correlacionados um ao outro. Este é um fenômeno frequentemente encontrado em regressão não-linear. O arquivo de saída especifica que os desvios padrões são aproximações assintóticas.

Os valores iniciais para o processo iterativo nem sempre são facilmente obtidos. O PROC NLIN leva em consideração a implementação de um procedimento "grid search" que computa os resíduos, onde a iteração se inicia na combinação de valores que dá a soma de quadrados menor. Para a convergência o arquivo de saída pode indicar que esta não foi atingida. Isso significa que a solução dos mínimos quadrados não foi achada, indicando uma má escolha dos valores iniciais. Neste caso deve-se proceder uma nova análise, com a introdução de novos valores iniciais para os parâmetros. Se não for especificado outro critério, o SAS assume para convergência que a diferença entre a soma dos quadrados dos resíduos entre a última iteração e a iteração imediatamente anterior deve ser menor que 10^{-8} .

Para o ajuste das curvas foi feita a opção pelo método de Gauss-Newton ou pelo método DUD, com intervalo de confiança igual a 95%.

. PROC SORT

Este procedimento reordena as observações dos arquivos SAS ou cria um novo arquivo SAS contendo observações reajustadas, para permitir que a análise seja efetuada para o banco de dados completo, sem misturar as observações.

. PROC PRINT

Este procedimento imprime os arquivos de saída SAS de acordo com as opções e declarações desejadas.

. PROC GPLOT

É um procedimento gráfico do SAS. Os gráficos produzidos são de alta resolução. Através deste é possível graficar curvas e sobrepo-las pela opção OVERLAY, e fazer uso de cores pela declaração SYMBOL..

Comandos SAS (SAS, 1985b)

. OPTIONS

Este comando informa ao SAS e ao sistema operacional o tamanho da linha (número de colunas) que serão imprimidas as respostas do programa SAS.

Para usar o procedimento gráfico de alta resolução do SAS, deve ser antecedido por G, GOPTIONS.

. DATA

Inicia a criação e leitura de um arquivo SAS.

. INFILE

Informa ao SAS e ao sistema operacional onde encontrar os dados que estão em um arquivo já criado. deve vir antes do INPUT.

. INPUT

Informa ao SAS que os dados estão colocados nas linhas de dados (leitura e descrição de linhas de dados para o SAS).

PROGRAMA C.1 - Programa SAS para leitura de dados das curvas de umidade de equilíbrio.

```
TITLE 'DADOS DE EQUILÍBRIO';
LIBNAME EQ 'DUA6:CKILJIN.ISOT2';
DATA EQ.DADOS;
INFILE DADOS;
INPUT EQUIL $ T AW X;
PROC SORT;
  BY EQUIL;
PROC PRINT DATA=EQ.DADOS;
  ID EQUIL;
```

PROGRAMA C.2 - Programa SAS para ajuste das isoterma de
 dessorção de umidade através do modelo de BET,
 com número de camadas moleculares igual a 5.

```

TITLE1 'EQUAÇÃO DE BET PARA N = 5';
OPTION LS=80;
LIBNAME EQ 'DUA6:[KILJIN.ISOT2]';
PROC NLIN DATA=EQ.DADOS;
  BY EQUIL;
  PARMS XM=0.05 C=10.00;
  MODEL X=((XM*C*AW)/(1-AW))*((1-6*AW**5+5*AW**6)/
    (1-AW+C*AW-C*AW**6));
  DER.XM=((C*AW)/(1-AW))*((1-6*AW**5+5*AW**6)/
    (1-AW+C*AW-C*AW**6));
  DER.C=((((XM*AW)/(1-AW))*(1-6*AW**5+5*AW**6)/
    (1-AW+C*AW-C*AW**6))-(((XM*C*AW)/(1-AW))*
    ((AW-AW**6)/(1-AW+C*AW-C*AW**6)**2)));
  OUTPUT OUT=SAÍDA
    PREDICTED=PX U95=U L95=L
    RESIDUAL=RX;
PROC PLOT;
  BY EQUIL;
  PLOT RX*(PX AW)/VREF=0;
  PLOT PX*AW="1" X*AW="2"/OVERLAY;

```

PROGRAMA C.3 - Programa SAS para ajuste das isotermas de
dessorção de umidade através do modelo de GAB.

```

OPTION LS=80;
LIBNAME IN 'DUA6:[KILJIN.ISOT3]';
PROC NLIN DATA=IN.DADOS;
  BY TEMP;
  PARMS XM=1.00 C=300.00 K=2.30;
  MODEL X=(XM*C*K*AW)/((1-K*AW)*(1-K*AW+C*K*AW));
  DER.XM=(C*K*AW)/((1-K*AW)*(1-K*AW+C*K*AW));
  DER.C=(XM*K*AW)/((1-K*AW)*((1-K*AW+C*K*AW)-
    (C*K*AW)))/((1-K*AW+C*K*AW)**2);
  DER.K=((XM*C*AW)*(1-K*AW)*(1-K*AW+C*K*AW)*
    (C*K*AW)*((1-K*AW)*(C*AW-AW)+(1-K*AW+C*K*AW)*
    (-AW)))/((1-K*AW)*(1-K*AW+C*K*AW))**2;
  OUTPUT OUT=SAIDA
    PREDICTED=PX U95=U L95=L
    RESIDUAL=RX;
PROC PLOT;
  BY TEMP;
  PLOT (RX)*(PX AW)/VREF=0;
  PLOT PX*AW="1" X*AW="2"/OVERLAY;RUN;

```

PROGRAMA C.4 - Programa SAS para leitura de dados para função
de Bessel

```

OPTION LS=80;
TITLE 'BANCO DE DADOS BANANA';
LIBNAME SE 'DUA6:[KILJIN.LESHE]';
DATA SE.DADOS1;
INFILE DADOS1;
INPUT CORRIDA $ TEMP VEL t X ADM;
PROC SORT;
  BY CORRIDA;
PROC PRINT DATA=SE.DADOS1;
  ID CORRIDA;

```

PROGRAMA C.5 - Programa SAS para ajuste das curvas de secagem
e cálculo da difusividade efetiva através da
função de Bessel.

```

TITLE1 '-----+-----';
TITLE2 'I          DIFUSIVIDADE CALCULADA PELA          I';
TITLE3 'IFUNÇÃO DE BESSEL APLICADA A CILINDRO COM 5 TERMOSI';
TITLE4 '-----+-----';
OPTION LS=80;
LIBNAME SE 'DUA6:[KILJIN.LESHES]';
PROC NLIN DATA=SE.DADOS1;
  BY CORRIDA;
  PARMS D=0.0000036;
      MODEL ADM=(4/0.01253**2)*
          (((1/(2.4048/0.01253)**2)*EXP(-
          ((2.4048/0.01253)**2)*D*t))
          +((1/(5.5201/0.01253)**2)*EXP(-
          ((5.5201/0.01253)**2)*D*t))
          +((1/(8.6537/0.01253)**2)*EXP(-
          ((8.6537/0.01253)**2)*D*t))
          +((1/(11.7915/0.01253)**2)*EXP(-
          ((11.7915/0.01253)**2)*D*t))
          +((1/(14.9309/0.01253)**2)*EXP(-
          ((14.9309/0.01253)**2)*D*t)));
      DER.D=-(4/0.01253**2)*t*(EXP(-
      ((2.4048/0.01253)**2)*D*t)
      +EXP(-((5.5201/0.01253)**2)*D*t)
      +EXP(-((8.6537/0.01253)**2)*D*t)
      +EXP(-((11.7915/0.01253)**2)*D*t)
      +EXP(-((14.9309/0.01253)**2)*D*t));
      DER.t=-(4/0.01253**2)*D*(EXP(-
      ((2.4048/0.01253)**2)*D*t)
      +EXP(-((5.5201/0.01253)**2)*D*t)
      +EXP(-((8.6537/0.01253)**2)*D*t)
      +EXP(-((11.7915/0.01253)**2)*D*t)
      +EXP(-((14.9309/0.01253)**2)*D*t));
  OUTPUT OUT=SAIDA
      PREDICTED=PADM U95=U L95=L
      RESIDUAL=RADM;
PROC PLOT DATA=SAIDA;
  BY CORRIDA;
  PLOT (RADM)*(PADM t)/VREF=0;
  PLOT PADM*t="1" ADM*t="2"/OVERLAY;RUN;

```

PROGRAMA C.6 - Programa SAS para leitura de dados para a equação de Sazhin.

```

OPTION LS=80;
LIBNAME SK 'DUA6:[KILJIN.EMPIR]';
DATA SK.DADOS5;
INFILE DADOS5;
INPUT CORRIDA $ TEMP VEL t X ADM X1 XE;
PROC SORT;
  BY CORRIDA;
PROC PRINT DATA=SK.DADOS5;
  ID CORRIDA;

```

PROGRAMA C.7 - Programa SAS para ajuste das curvas através da equação de Sazhin.

```

OPTION LS=80;
LIBNAME SK 'DUA6:[KILJIN.EMPIR]';
PROC NLIN DATA=SK.DADOS5;
  BY CORRIDA;
PARMS K=0.8 X1E=0.3;
MODEL t=1/(K*(X1-XE))*LOG((X1-X)*(X1E-XE)/(X1-X1E)/(X-XE));
  OUTPUT OUT=SAIDA
  PREDICTED=Pt
  RESIDUAL=Rt;
PROC PLOT DATA=SAIDA;
  BY CORRIDA;
PLOT X*t="1" X*Pt="2"/OVERLAY;
  PLOT Rt*Pt/VREF=0;
TITLE 'EQUACÃO DE SAZHIN';

```

PROGRAMA C.8 - Programa SAS para calcular a taxa de secagem a partir do modelo difusional.

```

OPTION LS=80;
LIBNAME SE 'DUA6:[KILJIN.LESHE5]';
DATA SE.DADOS1;
INFILE DADOS1;
INPUT CORRIDA $ TEMP VEL t X ADM;
  if TEMP=50 and VEL=0.5 then
do; D=0.00000100586; Xo=2.5300; Xe=0.1007; end;
  if TEMP=50 and VEL=1.0 then
do; D=0.00000108253; Xo=2.7481; Xe=0.0723; end;
  if TEMP=50 and VEL=1.5 then
do; D=0.00000159462; Xo=2.6158; Xe=0.1312; end;
  if TEMP=60 and VEL=0.5 then
do; D=0.00000946740; Xo=3.3243; Xe=0.0648; end;
  if TEMP=60 and VEL=1.0 then
do; D=0.00000165701; Xo=3.7686; Xe=0.0836; end;
  if TEMP=60 and VEL=1.5 then
do; D=0.00000235072; Xo=2.7511; Xe=0.0619; end;
  if TEMP=70 and VEL=0.5 then
do; D=0.00000152083; Xo=3.0313; Xe=0.0432; end;
  if TEMP=70 and VEL=1.0 then
do; D=0.00000199038; Xo=3.1981; Xe=0.0455; end;
  if TEMP=70 and VEL=1.5 then
do; D=0.00000231535; Xo=2.3901; Xe=0.0526; end;

  DX=(4/0.01253**2)*D*(Xo-Xe)*
    (EXP(-((2.4048/0.01253)**2)*D*t)
    +EXP(-((5.5201/0.01253)**2)*D*t)
    +EXP(-((8.6537/0.01253)**2)*D*t)
    +EXP(-((11.7915/0.01253)**2)*D*t)
    +EXP(-((14.9309/0.01253)**2)*D*t));

PROC SORT;
  by corrida;
PROC PLOT;
  by corrida;
  PLOT DX*X="*";
LABEL DX="-dX/dt";
run;
PROC PRINT;
  by corrida;
run;

```

PROGRAMA C.9 - Programa SAS para calcular a taxa de secagem a partir da equação de Sazhin.

```
OPTION LS=80;
LIBNAME SE 'DUA6:[KILJIN.EMPIR]';
DATA SE.DADOS5;
INFILE DADOS5;
INPUT CORRIDA $ TEMP VEL t X ADM X1 XE;
  if TEMP=50 and VEL=0.5 then do;K=0.0157;end;
  if TEMP=50 and VEL=1.0 then do;K=0.0138;end;
  if TEMP=50 and VEL=1.5 then do;K=0.0327;end;
  if TEMP=60 and VEL=0.5 then do;K=0.0154;end;
  if TEMP=60 and VEL=1.0 then do;K=0.0178;end;
  if TEMP=60 and VEL=1.5 then do;K=0.0309;end;
  if TEMP=70 and VEL=0.5 then do;K=0.0223;end;
  if TEMP=70 and VEL=1.0 then do;K=0.0218;end;
  if TEMP=70 and VEL=1.5 then do;K=0.0516;end;
DX=K*(X1-X)*(X-XE);
PROC SORT;
by corrida;
PROC PLOT;
  by corrida;
  PLOT DX*X="+";
LABEL DX="dX/dt";
run;
PROC PRINT;
  id corrida;
run;
```

FORTRAN

Algumas rotinas FORTRAN foram implementadas a partir de algoritmos apresentados no GERALD (1984), no Projeto de Criação de um Arquivo de Computação Científica - Projeto CRIACOCI, com início em 1988 por professores do Departamento de Produção Agropecuária da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP. O programa usado foi denominado PCC9.FOR e a rotina CUBSPL.FOR.

PROGRAMA C.10 - Programa FORTRAN utilizado para criação do banco de dados para a Spline Cúbica.

```

PROGRAM POLINOMIO
  DIMENSION XA(100),YA(100)
  CHARACTER*12 NOME
  PRINT *, 'DIGITE O NOME DO POLINOMIO -> '
  READ (*,110) NOME
110 FORMAT(A)
  OPEN(2,FILE=NOME)
  PRINT *, 'ENTRE COM O NUMERO DE PONTOS : '
  READ(*,*)N
  WRITE (2,10) N
10 FORMAT (I3)
*
  WRITE(*,15)
15 FORMAT(/,10X, 'ENTRE COM OS PARES ( X,Y ) : ')
*
  READ (*,*) ( XA(I), YA(I), I=1,N )
  WRITE (2,20) ( XA(I), YA(I), I=1,N )
20 FORMAT (F13.8,5X,F13.8)
*
  STOP
  END

```

PROGRAMA C.11 - Programa FORTRAN utilizado para implementação da subrotina Spline Cúbica, para a taxa de secagem.

```
*      PROJETO CRIACOCI - PCC9
*
*      ESTE PROGRAMA CALCULA A MATRIZ PARA DETERMINAR OS
COEFICIENTES
*      DE UMA SPLINE CUBICA ATRAVES DE UM CONJUNTO DE DADOS. O
SISTEMA
*      E ENTÃO RESOLVIDO PARA OBTER OS COEFICIENTES DAS
MESMAS EM CADA
*      SUBINTERVALO.
*
      DIMENSION
X(20),Y(20),A(20,4),S(20),H(20),C3X(20),C2X(20)
      DIMENSION C1X(20),CIX(20)
      CHARACTER*12 NOME
*
      OPEN(1,FILE='SPLINE3.RES')
*
      PRINT *, 'ENTRE COM O NOME DO POLINOMIO'
      READ (*,150) NOME
150  FORMAT (A)
      OPEN(2,FILE=NOME)
      READ (2,200)N
200  FORMAT (I3)
      WRITE (*,53)
53  FORMAT(/,10X,'ENTRE COM IEND (1,2,3) , ONDE
: ',/,15X,'1 , SE S(1)
      $= S(N) = 0',/,15X,'2 , SE S(1) = S(2) , S(N) = S(N-
1)',/,15X,'3 ,
      $SE S(1) , S(N) SAO EXTRAPOLADOS',/,15X,'4, SE S(1) FOR
EXTRAPOLADO,
      $CUBIC END (INITIAL) E S(N) = 0, FINAL LINEAR',/,
10X,'IEND = ', $)
      READ (*,'(I1)')IEND
      WRITE (1,65)IEND
65  FORMAT(10X,'IEND = ',I2,/)
      READ (2,300)(X(I),Y(I), I=1,N)
300  FORMAT (F13.8,5X,F13.8)
      DO 5 I=1,N-1
      H(I)=X(I+1)-X(I)
5  CONTINUE
      WRITE (1,60)
60  FORMAT(10X,'          X          Y',/,10X,'-----',/)
      DO 10 I=1,N
      WRITE (1,67)X(I),Y(I)
```

```

67 FORMAT(10X,2F9.3)
10 CONTINUE
  CALL CUBSPL(X,Y,S,N,IEND,A)
*  RESULTADOS
  WRITE (1,75)
75 FORMAT(//,'VETOR  S : ')
  WRITE (1,80)(S(J),J=1,N),(H(I),I=1,N-1)
80 FORMAT(//,9F8.4,//,'VETOR  H : ',//,9F8.4)
  DO 1000 I=1,N-1
    C3X(I)=(S(I+1)-S(I))/(6.*H(I))
    C2X(I)=S(I)/2.
    C1X(I)=(Y(I+1)-Y(I))/H(I)-H(I)*(2.*S(I)+S(I+1))/6.
    CIX(I)=Y(I)
1000 CONTINUE
  WRITE (1,100)
100 FORMAT(///,5X,'INTERVALOS'           C3X           C2X
  $C1X           CIX',/,5X,'-----'
  $-----',/)
  DO 120 I=1,N-1
    WRITE (1,110)X(I),X(I+1),C3X(I),C2X(I),C1X(I),CIX(I)
110 FORMAT(5X,'(',F7.3,' ',F7.3,')',4F13.8)
120 CONTINUE
  STOP
  END

```

PROGRAMA C.12 - Rotina Spline Cúbica usada no programa C.11.

SUBROUTINE CUBSPL(X,Y,S,N,IEND,A)

 SUBROUTINE CUBSPL : THIS ROUTINE COMPUTES THE MATRIX FOR
 FINDING THE COEFFICIENTS OF A CUBIC SPLINE THROUGH A SET
 OF DATA THE SYSTEM THEN SOLVED TO OBTAIN THE SECOND
 DERIVATIVE VALUES.

PARAMETERS ARE :

X,Y - ARRAYS OF X AND Y VALUES TO BE FITTED
 S - ARRAY OF SECOND DERIVATIVE VALUES AT THE POINTS
 N - NUMBER OF POINTS
 IEND - TYPE OF END CONDITION TO BE USED
 IEND= 1, LINEAR ENDS, S(1)=S(N)=0
 IEND= 2, PARABOLIC ENDS, S(1)=S(2), S(N)=S(N-1)
 IEND= 3, CUBIC ENDS, S(1),S(N) ARE EXTRAPOLATED
 IEND= 4, CUBIC END (INITIAL) AND S(N)=0(LINEAR)
 A - AUGMENTED MATRIX OF COEFFICIENTS AND R.H.S. FOR
 FINDING S

REAL X(N),Y(N),S(N),A(N,4),DX1,DY1,DX2,DY2,DXN1,DXN2
 INTEGER IEND,NM1,NM2,I,J

COMPUTE FOR THE N-2 ROWS

NM2 = N - 2
 NM1 = N - 1
 DX1 = X(2) - X(1)
 DY1 = (Y(2) - Y(1)) / DX1*6.0
 DO 10 I = 1,NM2
 DX2 = X(I+2) - X(I+1)
 DY2 = (Y(I+2) - Y(I+1)) / DX2*6.0
 A(I,1) = DX1
 A(I,2) = 2.0*(DX1 + DX2)
 A(I,3) = DX2
 A(I,4) = DY2 - DY1
 DX1 = DX2
 DY1 = DY2

10 CONTINUE

```

C
C -----
C
C ADJUST FIRST AND LAST ROWS APPROPRIATE TO END CONDITION.
C
C     GO TO (20,50,80,90),IEND
C
C FOR IEND = 1, NO CHANGE IS NEEDED.
C
C 20 GO TO 100
C
C FOR IEND =2, S(1)=S(2), S(N)=S(N-1), PARABOLIC ENDS.
C
C 50 A(1,2) = A(1,2) + X(2) - X(1)
C   A(NM2,2) = A(NM2,2) + X(N) - X(NM1)
C   GO TO 100
C
C FOR IEND = 3, CUBIC ENDS, S(1), S(N) ARE EXTRAPOLATED.
C
C 80 DX1 = X(2) - X(1)
C   DX2 = X(3) - X(2)
C   A(1,2) = (DX1 + DX2) * (DX1 + 2.0*DX2) / DX2
C   A(1,3) = (DX2*DX2 - DX1*DX1) / DX2
C   DXN2 = X(NM1) - X(NM2)
C   DXN1 = X(N) - X(NM1)
C   A(NM2,1) = (DXN2*DXN2 - DXN1*DXN1) / DXN2
C   A(NM2,2) = (DXN1 + DXN2) * (DXN1 + 2.0*DXN2) / DXN2
C   GO TO 100
C
C FOR IEND = 4, S(1) IS EXTRAPOLED, AND S(N) = 0
C 90 DX1 = X(2) - X(1)
C   DX2 = X(3) - X(2)
C   A(1,2) = (DX1+DX2) * (DX1+2.0*DX2) /DX2
C   A(1,3) = (DX2*DX2 - DX1*DX1) /DX2
C   GO TO 100
C
C -----
C
C NOW WE SOLVE THE TRIDIAGONAL SYSTEM. FIRST REDUCE.
C
C 100 DO 110 I = 2,NM2
C     A(I,2) = A(I,2) - A(I,1)/A(I-1,2)*A(I-1,3)
C     A(I,4) = A(I,4) - A(I,1)/A(I-1,2)*A(I-1,4)
C 110 CONTINUE
C
C -----
C

```


ANEXO D - Isotermas de dessorção de umidade da banana (*Musa acuminata* subgrupo Cavendish cultivar Nanica).

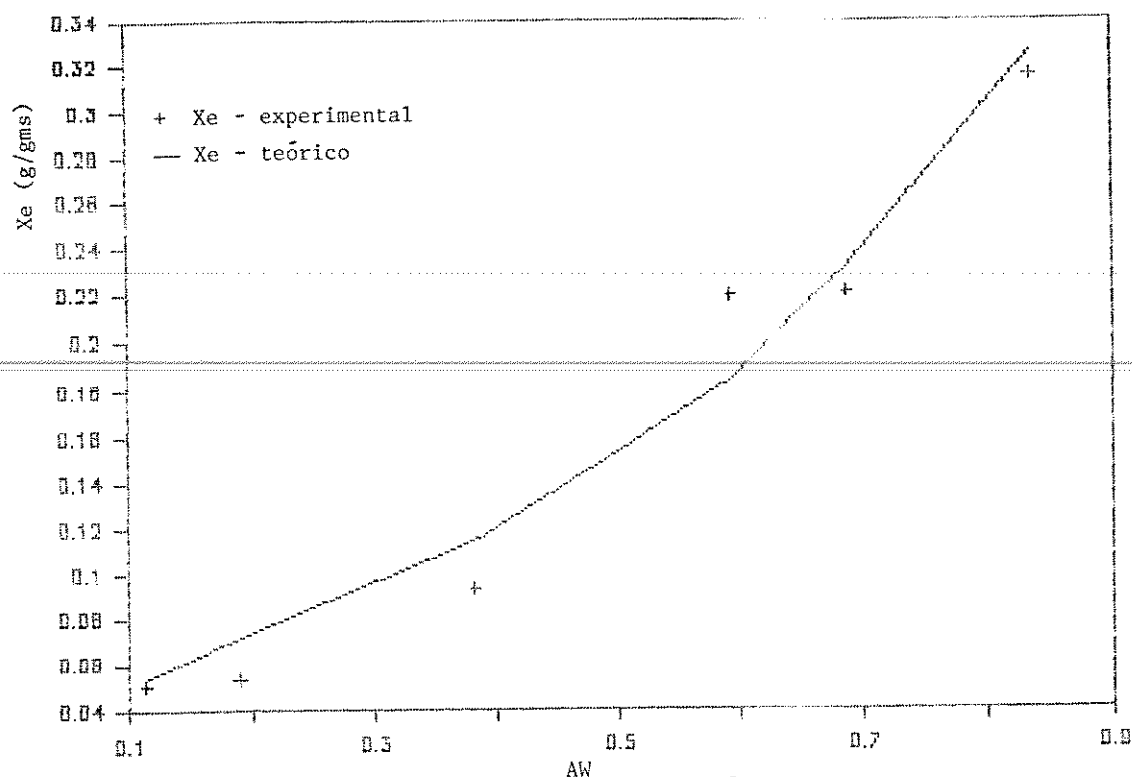


FIGURA D1 - Isoterma de dessorção de umidade para 50°C, ajustada pelo modelo de BET com dez camadas polimoleculares.

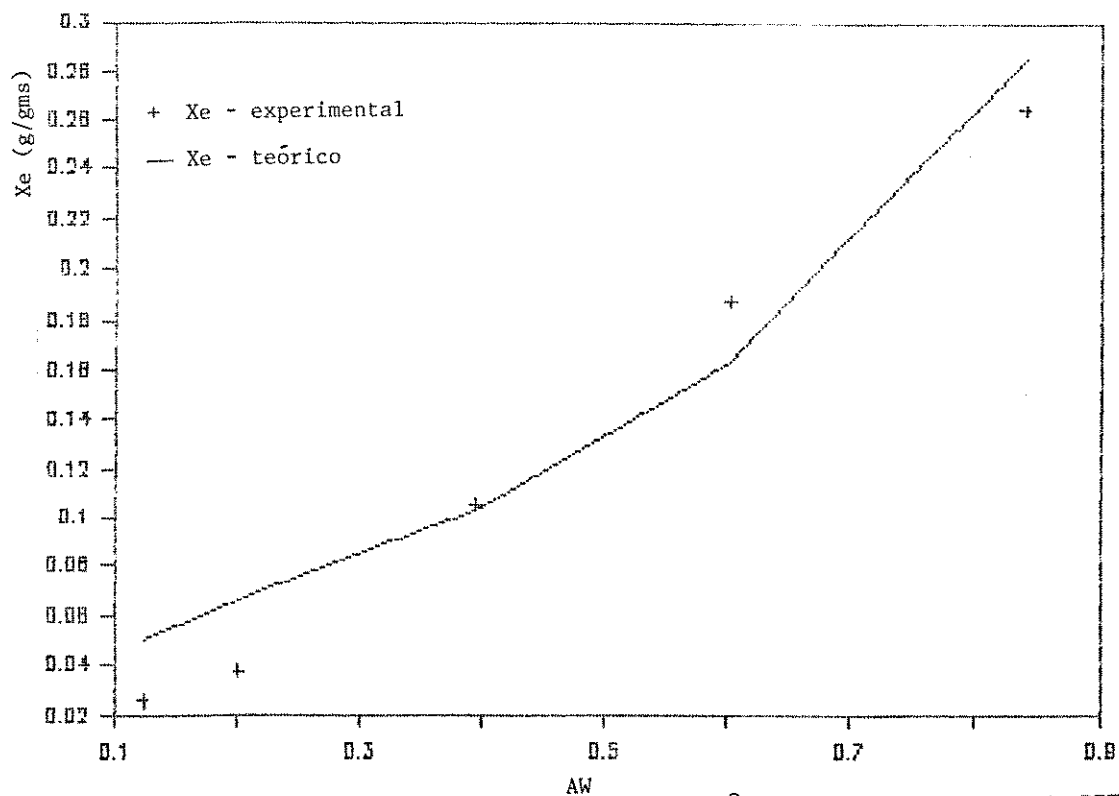


FIGURA D2 - Isoterma de dessorção de umidade para 60°C, ajustada pelo modelo de BET com dez camadas polimoleculares.

0.04 = 0,04

Extender a equivalência para os demais valores

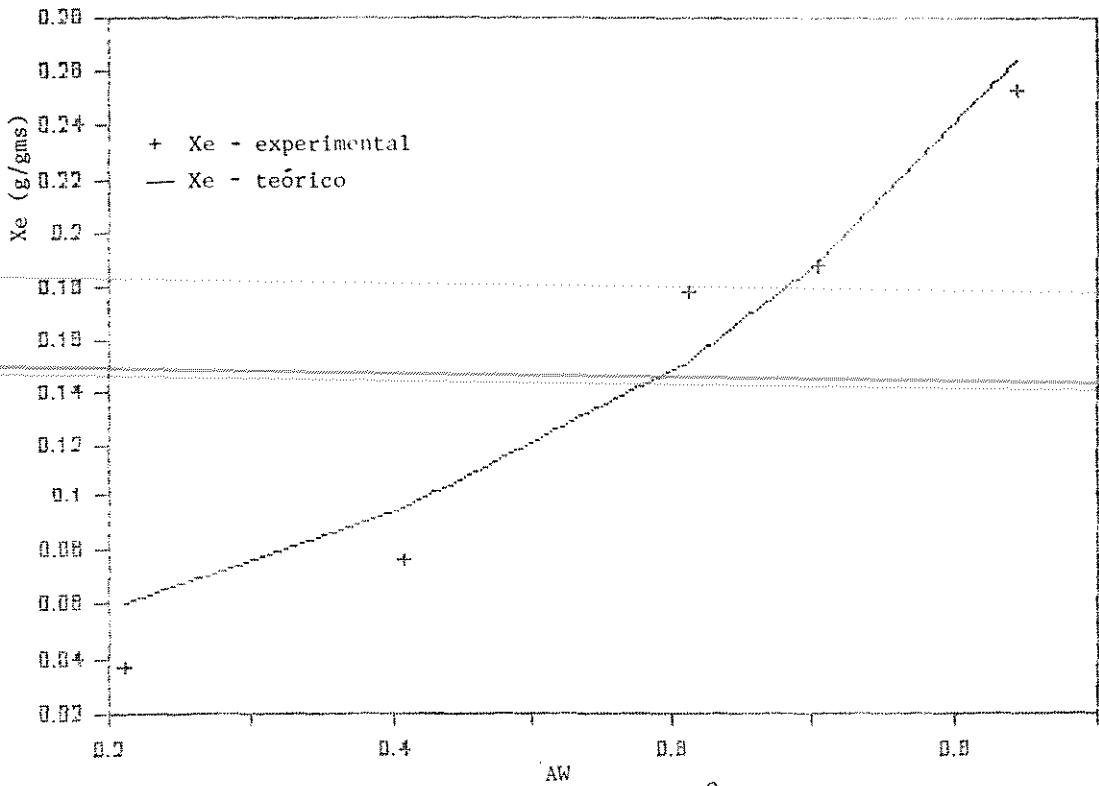


FIGURA D3 - Isoterma de dessorção de umidade para 70°C, ajustada pelo modelo de BET com dez camadas polimoleculares.

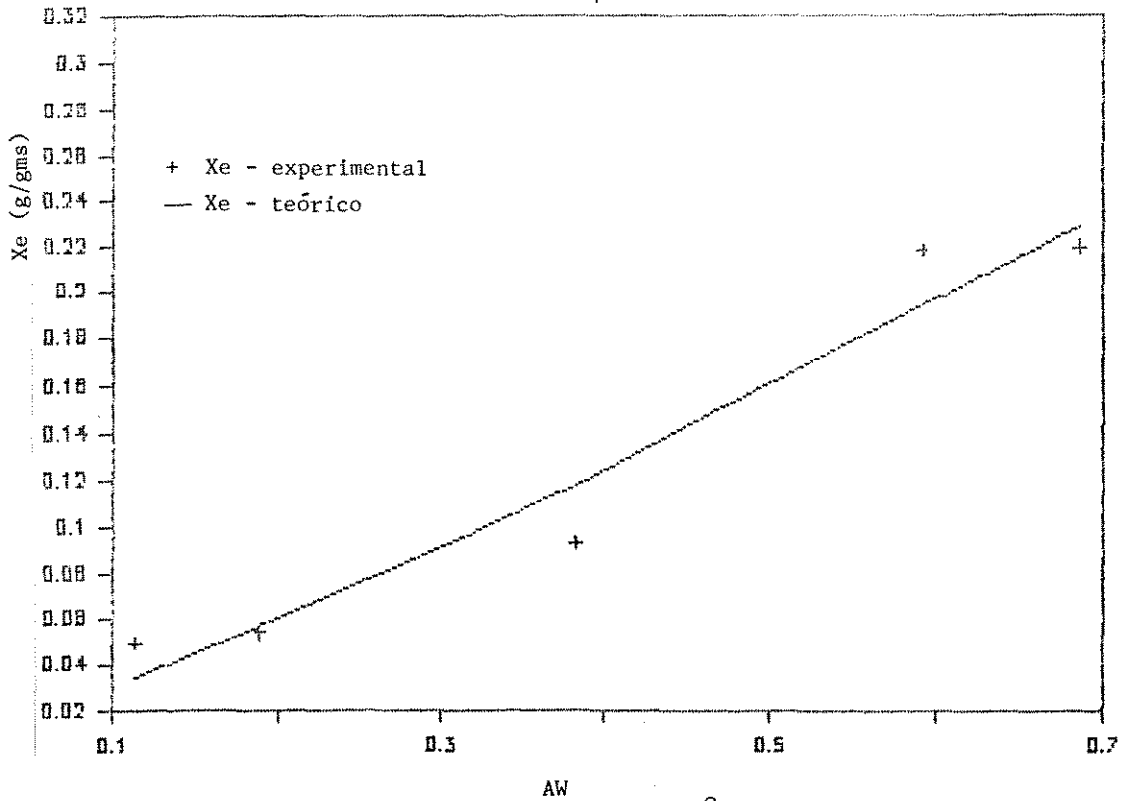


FIGURA D4 - Isoterma de dessorção de umidade para 50°C, ajustada pelo modelo de BET com cinco camadas polimoleculares.

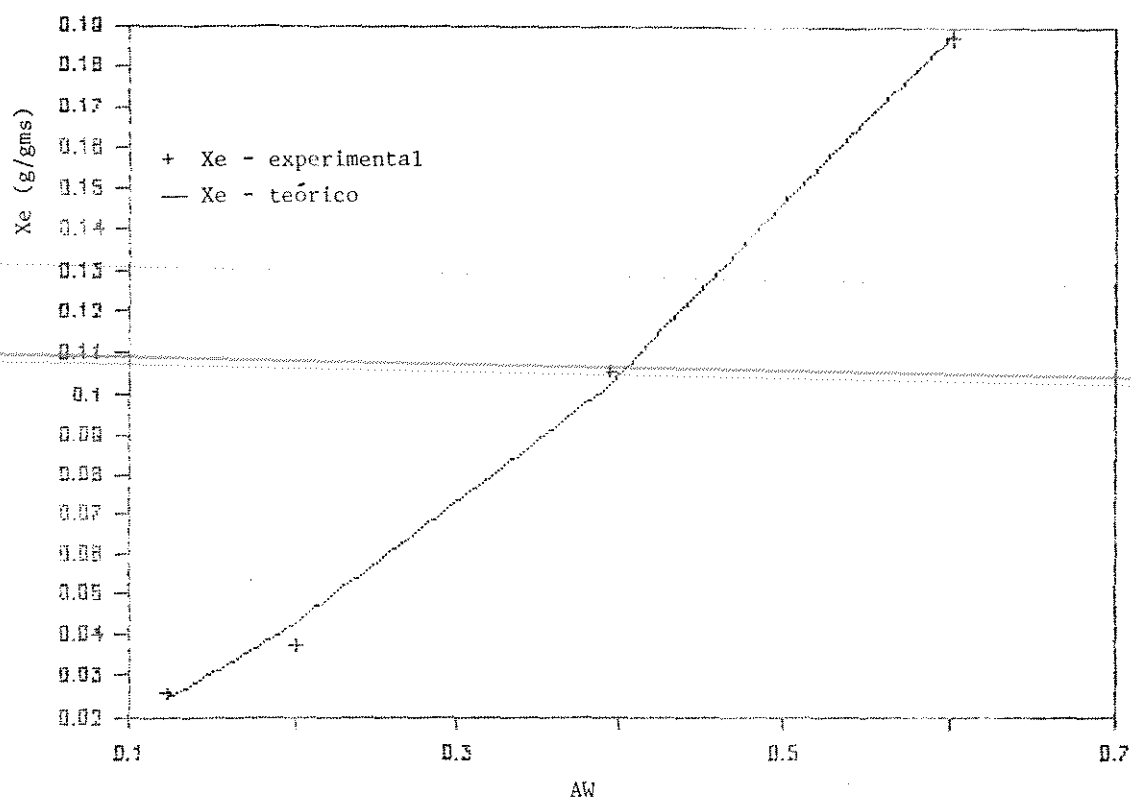


FIGURA D5 - Isotherma de dessorção de unidade para 60°C, ajustada pelo modelo de BET com cinco camadas polimoleculares.

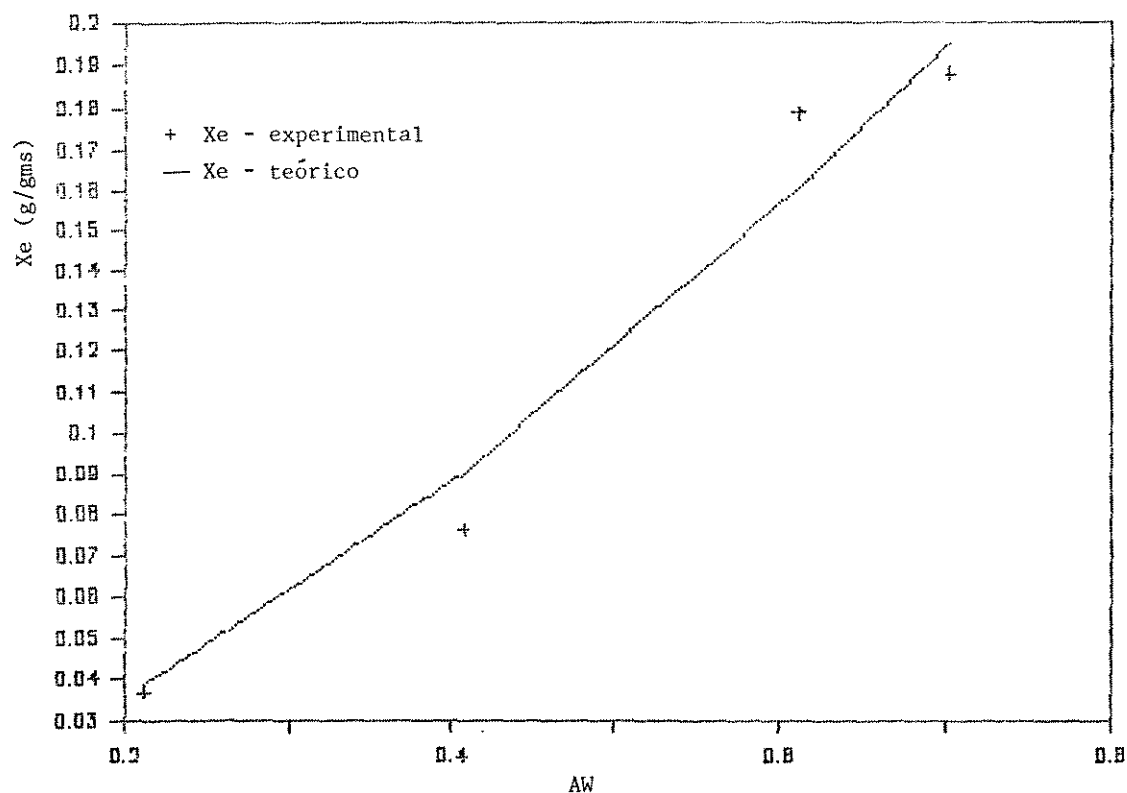


FIGURA D6 - Isotherma de dessorção de unidade para 70°C, ajustada pelo modelo de BET com cinco camadas polimoleculares.

ANEXO E - Curvas de secagem de banana (*Musa acuminata*
subgrupo Cavendish cultivar Nanica).

TABELA E.1 - Curva de secagem de banana para temperatura 50°C
e velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m.s⁻¹.

0,5 m.s ⁻¹			1,0 m.s ⁻¹			1,5 m.s ⁻¹		
t (h)	X (g/g ms)	ADM	t (h)	X (g/g ms)	ADM	t (h)	X (g/g ms)	ADM
0	2.5300	1.0000	0	2.7481	1.0000	0	2.6158	1.0000
1	2.3027	0.9064	1	2.4615	0.8929	1	2.2207	0.8410
2	2.1147	0.8290	2	2.2581	0.8169	2	1.9700	0.7401
3	1.9794	0.7734	3	2.0885	0.7535	3	1.8353	0.6859
4	1.8350	0.7139	4	1.9406	0.6982	4	1.6483	0.6106
5	1.7383	0.6741	5	1.8175	0.6522	5	1.5427	0.5681
6	1.6391	0.6333	6	1.7055	0.6104	6	1.4460	0.5292
7	1.5533	0.5979	7	1.6056	0.5730	7	1.3522	0.4914
8	1.4692	0.5633	8	1.5209	0.5414	8	1.2682	0.4576
9	1.4136	0.5405	10	1.3577	0.4804	9	1.1871	0.4250
10	1.3506	0.5145	12	1.2270	0.4315	10	1.1174	0.3969
11	1.2817	0.4862	14	1.1225	0.3925	11	1.0495	0.3696
12	1.2226	0.4618	16	1.0272	0.3569	12	0.9823	0.3426
13	1.1687	0.4396	18	0.9454	0.3263	13	0.9295	0.3213
14	1.1091	0.4151	20	0.8686	0.2976	14	0.8729	0.2985
15	1.0583	0.3942	22	0.7932	0.2694	15	0.8208	0.2775
17	0.9699	0.3578	24	0.7335	0.2471	17	0.7301	0.2411
19	0.8921	0.3258	26	0.6812	0.2276	19	0.6557	0.2111
21	0.8210	0.2965	28	0.6304	0.2086	21	0.5831	0.1819
23	0.7561	0.2698	30	0.5863	0.1921	23	0.5218	0.1572
25	0.7546	0.2692	32	0.5435	0.1761	25	0.4668	0.1351
27	0.6663	0.2328	34	0.5051	0.1617	27	0.4266	0.1189
29	0.6107	0.2099	46	0.3407	0.1003	29	0.3956	0.1064
31	0.5742	0.1949	52	0.2836	0.0790	31	0.3587	0.0916
47	0.3261	0.0928	55	0.2684	0.0733	48	0.2176	0.0348
50	0.2934	0.0793	70	0.2070	0.0503	51	0.2026	0.0287
54	0.2698	0.0696	76	0.1923	0.0448	55	0.1894	0.0234
71	0.1841	0.0343	94	0.1626	0.0338	72	0.1599	0.0116
74	0.1742	0.0303	100	0.1558	0.0312	75	0.1597	0.0115
78	0.1614	0.0250	118	0.1203	0.0179			
174	0.1481	0.0195	124	0.1160	0.0163			
191	0.1144	0.0056	143	0.1073	0.0131			
194	0.1139	0.0054	148	0.1024	0.0113			
198	0.1061	0.0022	167	0.1017	0.0110			

2.5300 = 2,5300 - estender a equivalência para os demais valores.

TABELA E.2 - Curva de secagem de banana para temperatura 60°C
e velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m.s⁻¹.

0,5 m.s ⁻¹			1,0 m.s ⁻¹			1,5 m.s ⁻¹		
t (h)	X (g/g ms)	ADM	t (h)	X (g/g ms)	ADM	t (h)	X (g/g ms)	ADM
0	3.3243	1.0000	0	3.7686	1.0000	0	2.7511	1.0000
1	3.0143	0.9049	1	3.2380	0.8560	1	2.4059	0.8716
2	2.7645	0.8282	2	2.9304	0.7725	2	2.0811	0.7509
3	2.5851	0.7732	3	2.6483	0.6960	3	1.7914	0.6431
4	2.4635	0.7359	4	2.5028	0.6565	4	1.5972	0.5709
5	2.3211	0.6922	5	2.2247	0.5810	5	1.4186	0.5045
6	2.1968	0.6541	6	2.0245	0.5267	6	1.2591	0.4452
7	2.0918	0.6219	7	1.8795	0.4873	7	1.1184	0.3929
8	1.9475	0.5776	8	1.7190	0.4438	8	1.0050	0.3507
9	1.8506	0.5479	9	1.6105	0.4143	9	0.8875	0.3070
10	1.7503	0.5171	10	1.4808	0.3792	10	0.7882	0.2701
11	1.6531	0.4873	11	1.3709	0.3493	11	0.7036	0.2386
13	1.4819	0.4347	12	1.2682	0.3215	13	0.5641	0.1867
15	1.3456	0.3929	13	1.1733	0.2957	15	0.4529	0.1454
17	1.2205	0.3546	14	1.0877	0.2725	17	0.3577	0.1100
19	1.1224	0.3245	15	0.9978	0.2481	19	0.3046	0.0903
21	1.0369	0.2982	17	0.8648	0.2120	21	0.2582	0.0730
23	0.9655	0.2763	19	0.7331	0.1763	23	0.2278	0.0617
25	0.9031	0.2572	21	0.6430	0.1518	25	0.2044	0.0530
27	0.8318	0.2353	23	0.5745	0.1332	27	0.1798	0.0439
29	0.7760	0.2182	25	0.5237	0.1194	50	0.1195	0.0214
44	0.4711	0.1247	27	0.4903	0.1104	71	0.0921	0.0112
47	0.4429	0.1160	29	0.4420	0.0973	78	0.0855	0.0088
51	0.4093	0.1057	31	0.4165	0.0903	95	0.0718	0.0037
68	0.3555	0.0892	47	0.3189	0.0638			
71	0.3474	0.0867	50	0.3144	0.0626			
75	0.3437	0.0856	54	0.2960	0.0576			
92	0.3141	0.0765	71	0.2661	0.0495			
95	0.3127	0.0761	74	0.2601	0.0479			
			78	0.2519	0.0457			
			79	0.2501	0.0452			

3.3243 = 3,3243 - extender a equivalência para os demais valores.

TABELA E.3 - Curva de secagem de banana para temperatura 70°C e velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m.s⁻¹.

0,5 m.s ⁻¹			1,0 m.s ⁻¹			1,5 m.s ⁻¹		
t (h)	X (g/g ms)	ADM	t (h)	X (g/g ms)	ADM	t (h)	X (g/g ms)	ADM
0	3.0313	1.0000	0	3.1981	1.0000	0	2.3901	1.0000
1	2.6166	0.8612	1	2.8076	0.8761	1	2.0194	0.8414
2	2.3902	0.7855	2	2.4384	0.7590	2	1.7220	0.7142
3	2.1776	0.7143	3	2.1915	0.6807	3	1.5306	0.6323
4	1.9756	0.6467	4	1.9004	0.5884	4	1.3715	0.5642
5	1.8198	0.5946	5	1.6888	0.5212	5	1.2091	0.4948
6	1.6934	0.5523	6	1.5246	0.4692	6	1.0687	0.4347
7	1.5464	0.5031	7	1.3774	0.4225	7	0.9714	0.3931
8	1.4266	0.4630	8	1.2402	0.3790	8	0.8723	0.3507
9	1.3220	0.4280	9	1.1144	0.3391	9	0.7918	0.3162
10	1.2425	0.4014	10	1.0261	0.3111	10	0.7176	0.2845
11	1.1487	0.3700	11	0.9299	0.2805	11	0.6464	0.2540
12	1.0691	0.3433	13	0.7645	0.2281	13	0.5248	0.2020
13	0.9854	0.3153	15	0.6586	0.1945	15	0.4280	0.1606
14	0.9249	0.2951	17	0.5535	0.1611	17	0.3585	0.1309
15	0.8759	0.2787	19	0.4852	0.1395	19	0.3048	0.1079
17	0.7607	0.2401	21	0.4359	0.1238	21	0.2638	0.0904
19	0.6718	0.2104	23	0.3989	0.1121	23	0.2296	0.0757
21	0.5906	0.1832	25	0.3667	0.1019	25	0.2037	0.0646
23	0.5178	0.1580	27	0.3476	0.0958	27	0.1830	0.0558
25	0.4598	0.1394	29	0.3232	0.0881	29	0.1636	0.0475
27	0.4209	0.1264	31	0.3085	0.0834	31	0.1472	0.0405
29	0.3903	0.1162	47	0.2309	0.0588	33	0.1360	0.0357
31	0.3686	0.1089	50	0.2303	0.0586	48	0.0774	0.0106
52	0.2423	0.0666	54	0.2194	0.0552	51	0.0703	0.0076
54	0.2390	0.0655	71	0.1940	0.0471	55	0.0620	0.0040
72	0.2341	0.0639	78	0.1919	0.0464			
74	0.2282	0.0619	95	0.1622	0.0370			
79	0.2234	0.0603						

3.0313 = 3,0313 - estender a equivalência para os demais valores.

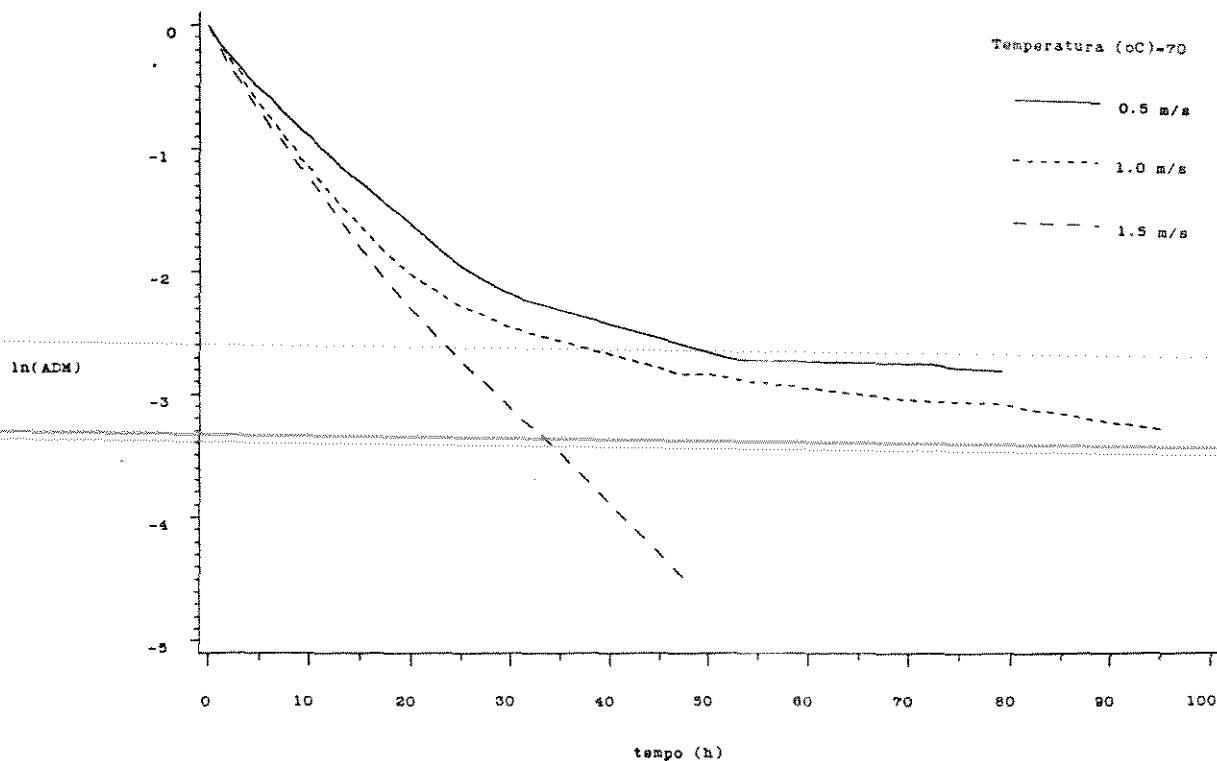


FIGURA F1 - Curva de secagem expressa em função do $\ln(ADM)$ versus t para 50°C com 0,5 m/s, 1,0 m/s e 1,5 m/s.

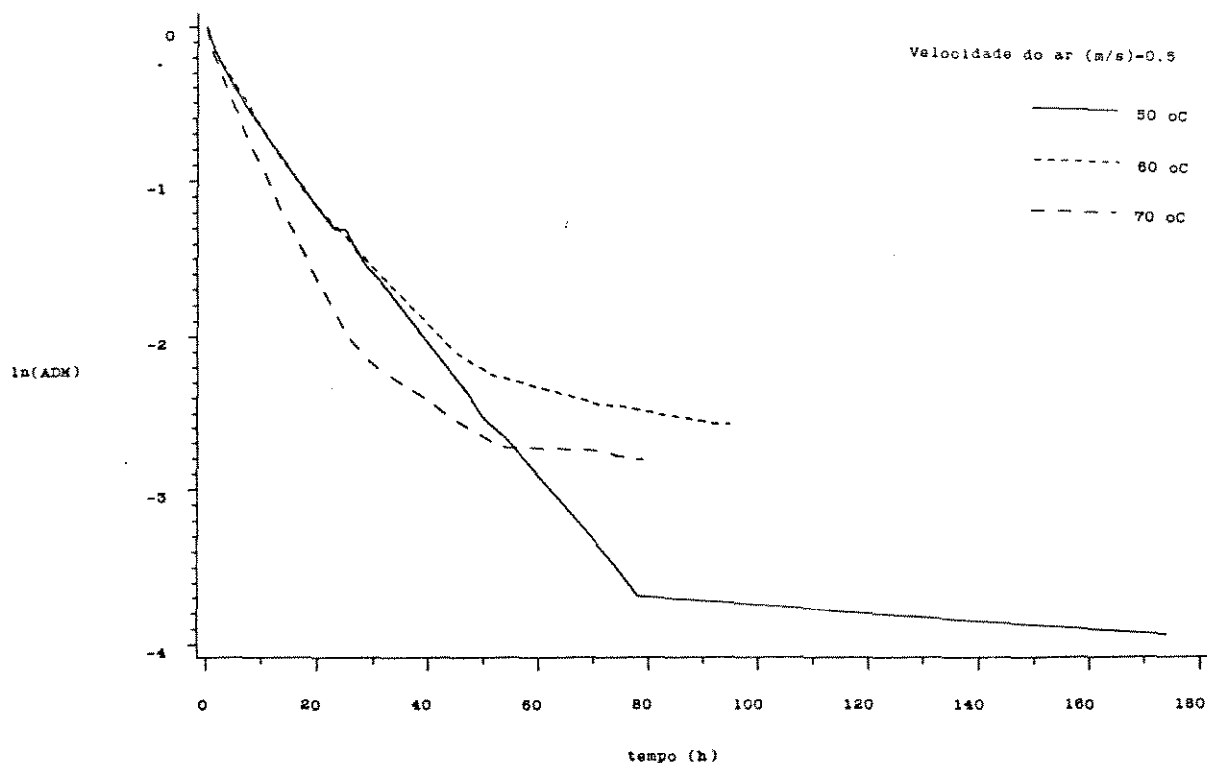


FIGURA F2 - Curva de secagem expressa em função do $\ln(ADM)$ versus t para 60°C com 0,5 m/s, 1,0 m/s e 1,5 m/s.

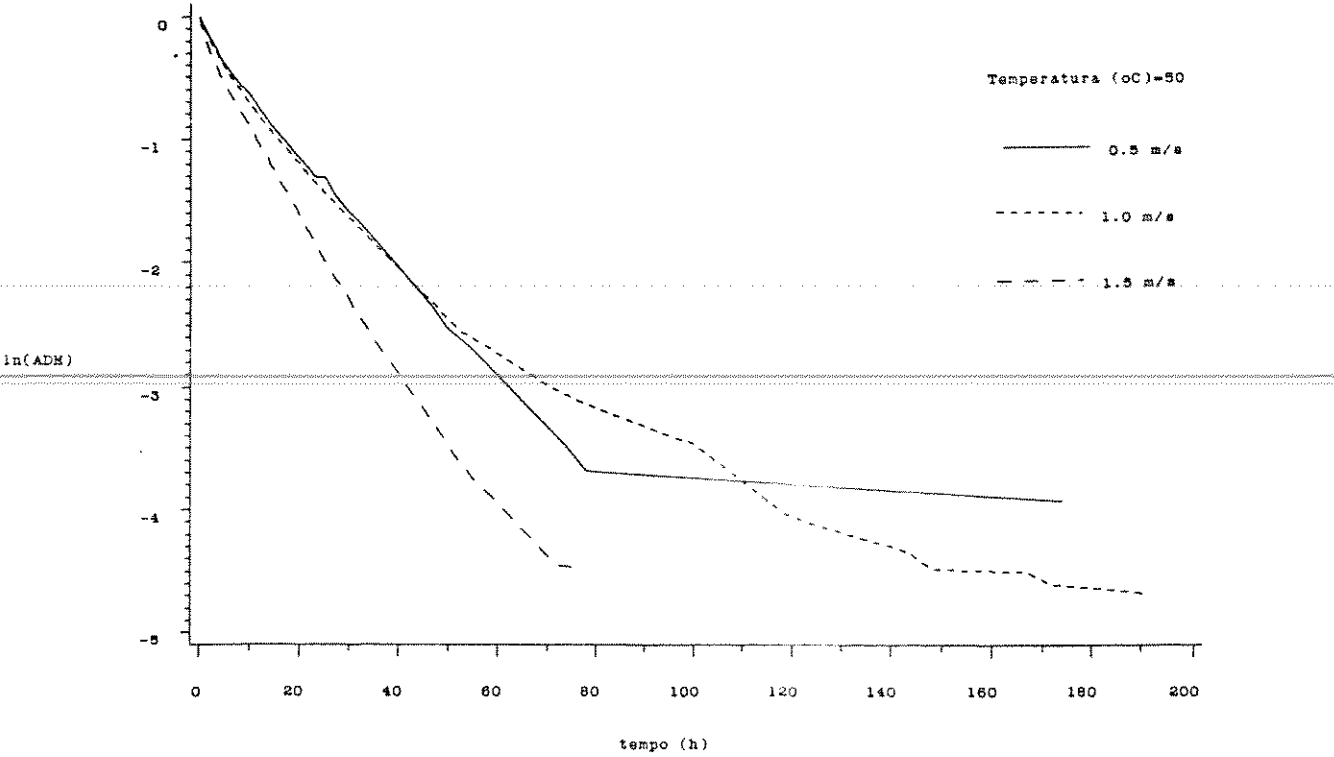


FIGURA F3 - Curva de secagem expressa em função de $\ln(ADM)$ versus t para 70°C com 0,5 m/s, 1,0 m/s e 1,5 m/s.

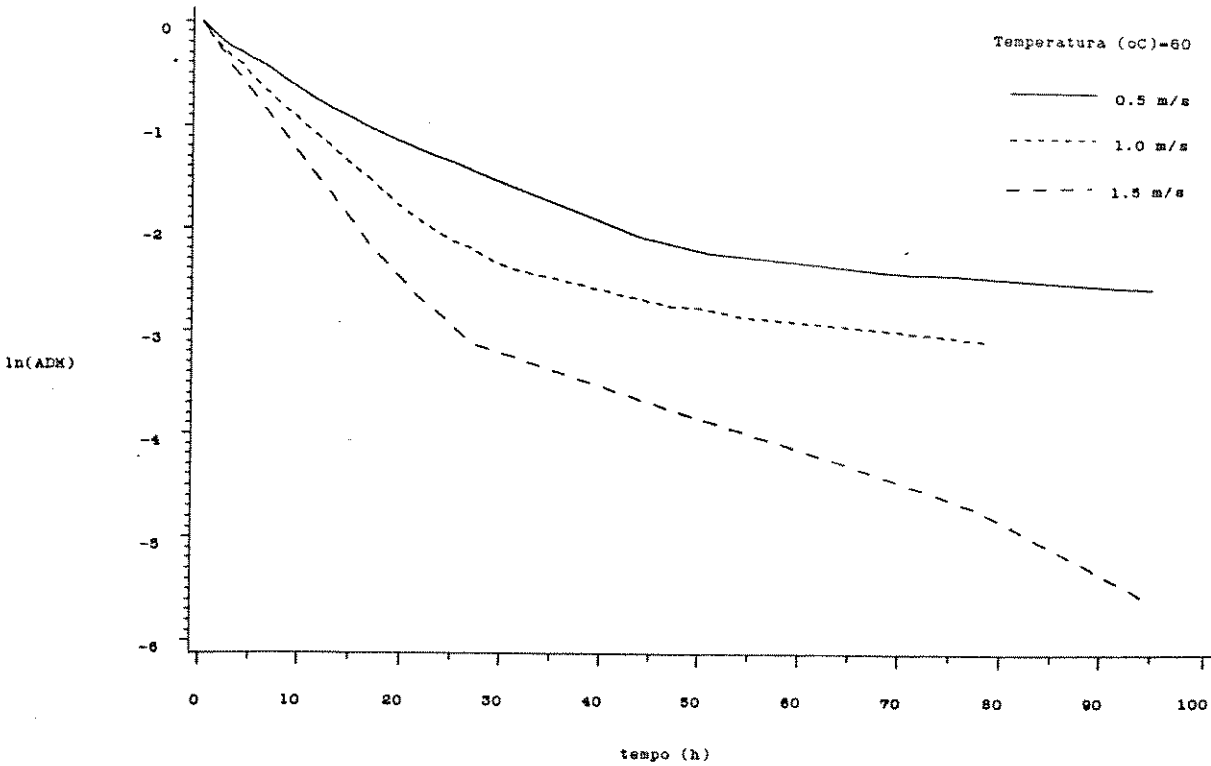


FIGURA F4 - Curva de secagem expressa em função de $\ln(ADM)$ versus t para 0,5m/s com 50°C, 60°C e 70°C.

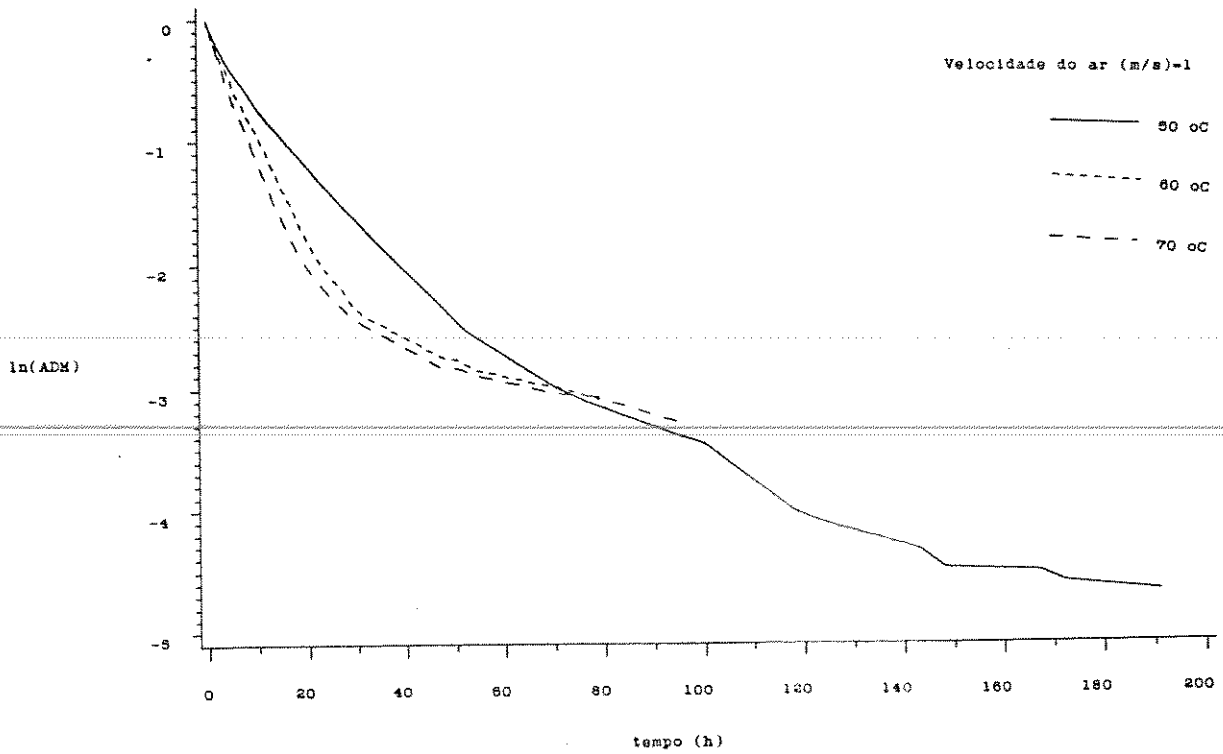


FIGURA F5 - Curva de secagem expressa em função de $\ln(ADM)$ versus t para 1,0 m/s com 50°C, 60°C e 70°C.

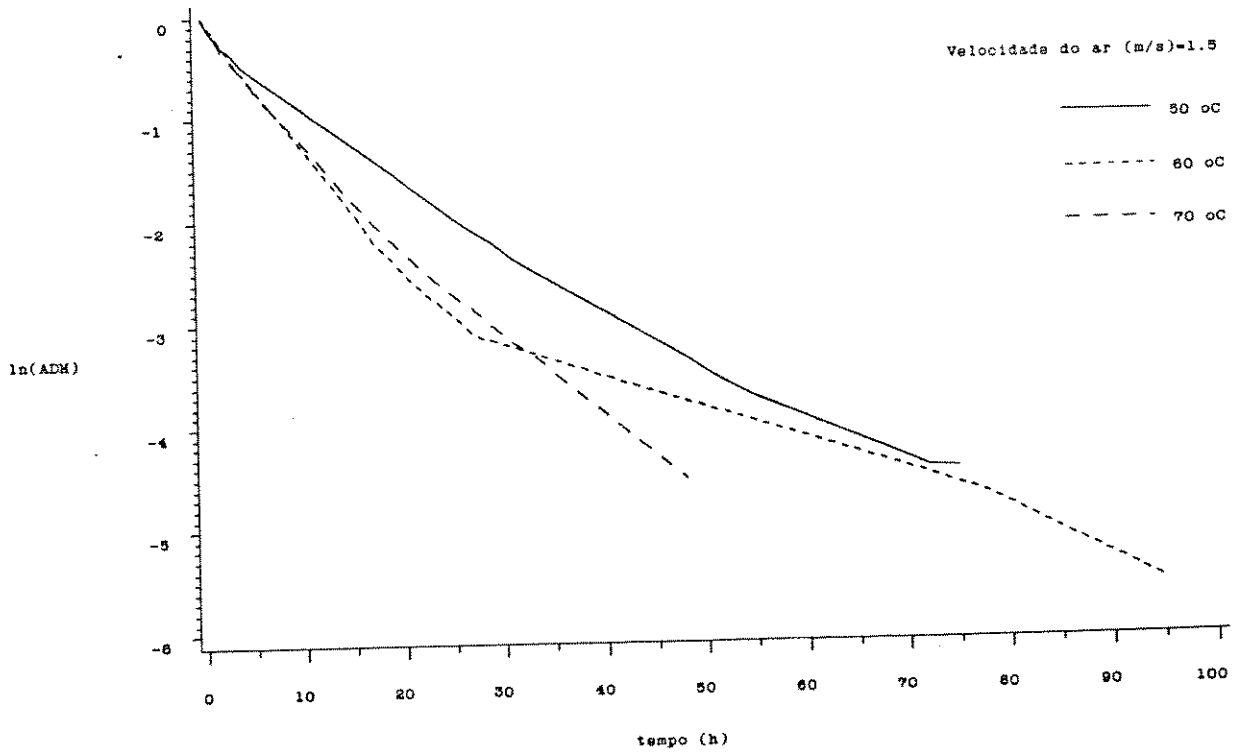


FIGURA F6 - Curva de secagem expressa em função de $\ln(ADM)$ versus t para 1,5 m/s com 50°C, 60°C e 70°C.

ANEXO G - Curvas de secagem ajustadas pelo modelo difusional com cinco termos da série de Fourier (n=5)

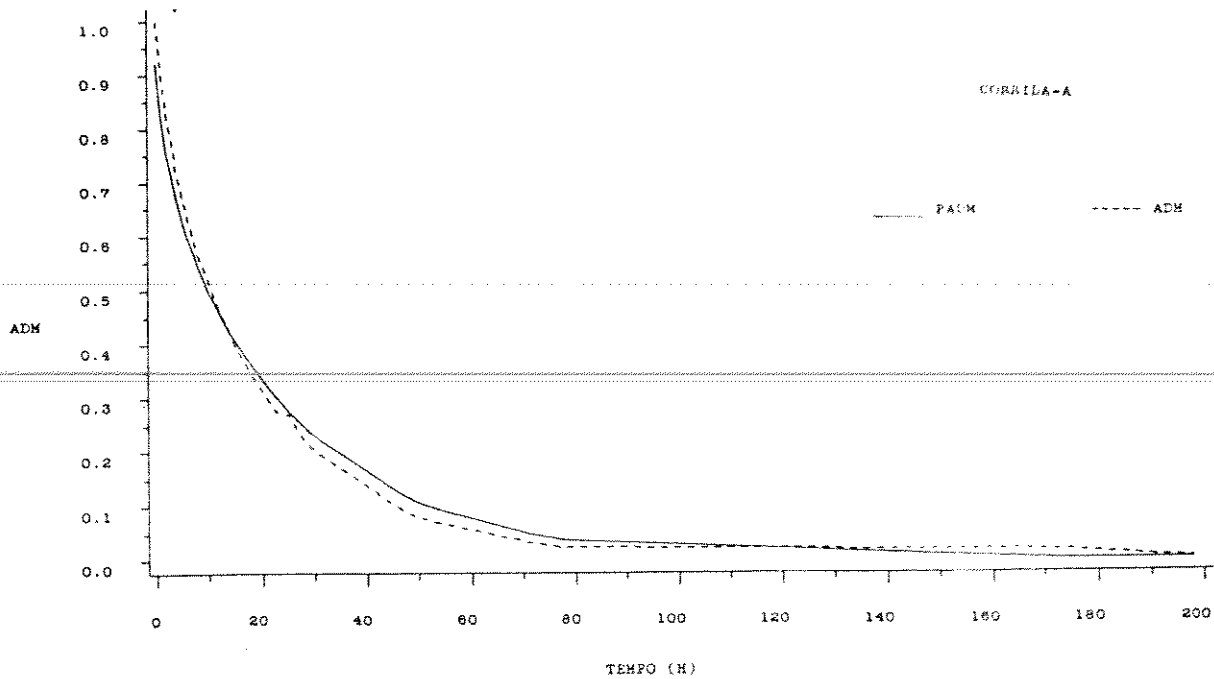


FIGURA G1 - Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 50°C e 0,5 m/s

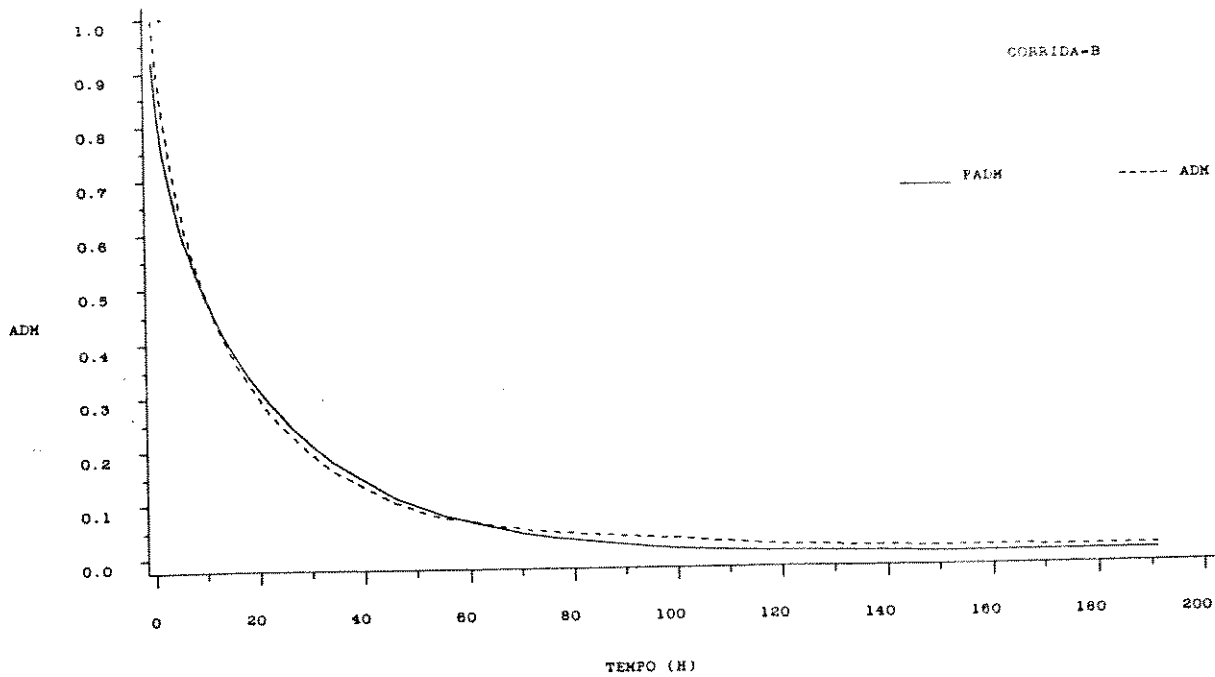


FIGURA G2 - Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 50°C e 1,0 m/s

0.1 = 0,1

Extender a equivalência para os demais valores

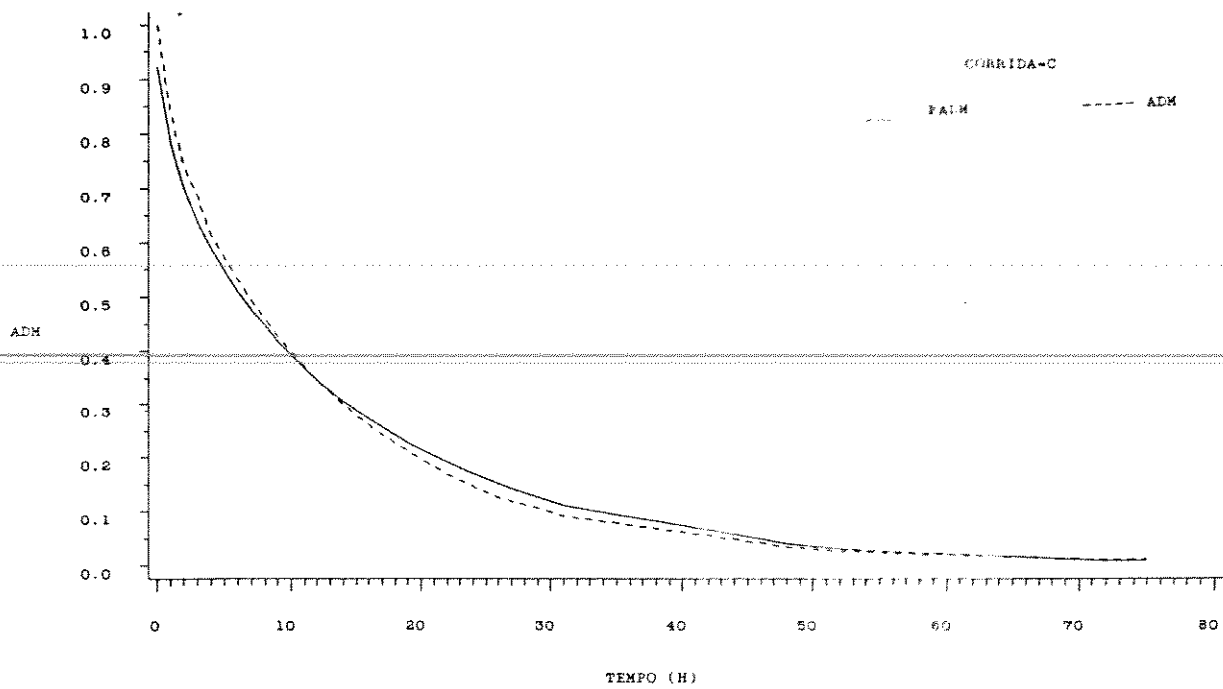


FIGURA G3 - Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 50°C e 1,5 m/s

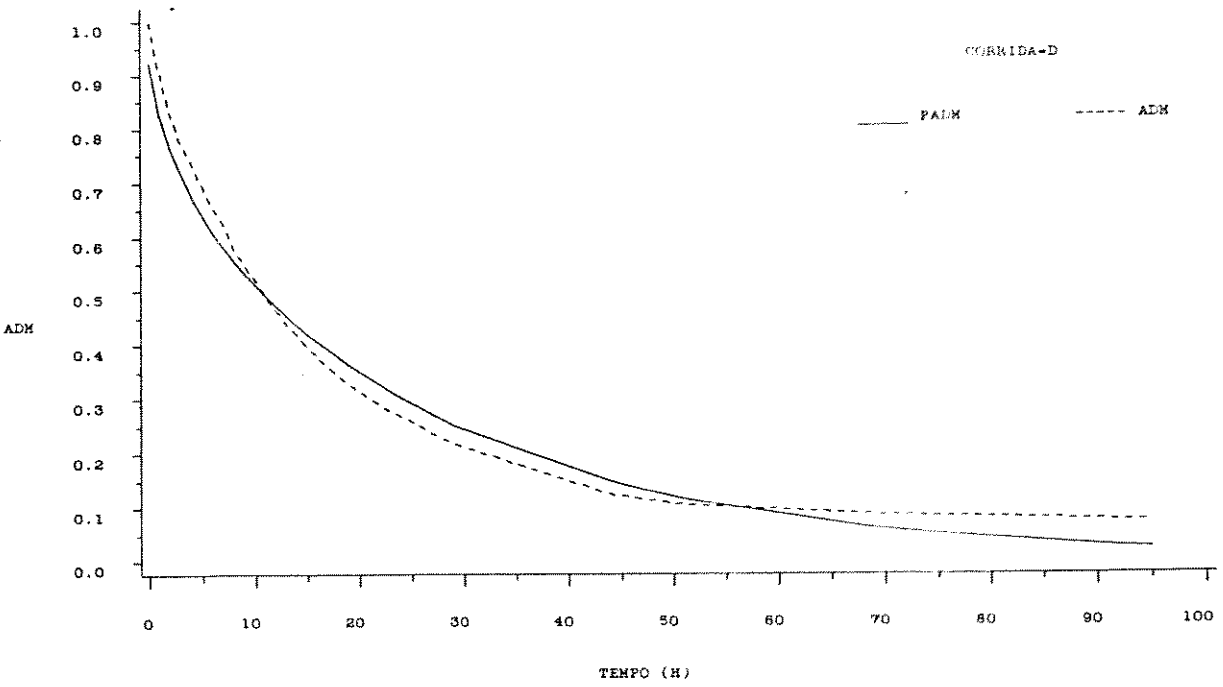


FIGURA G4 - Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 60°C e 0,5 m/s

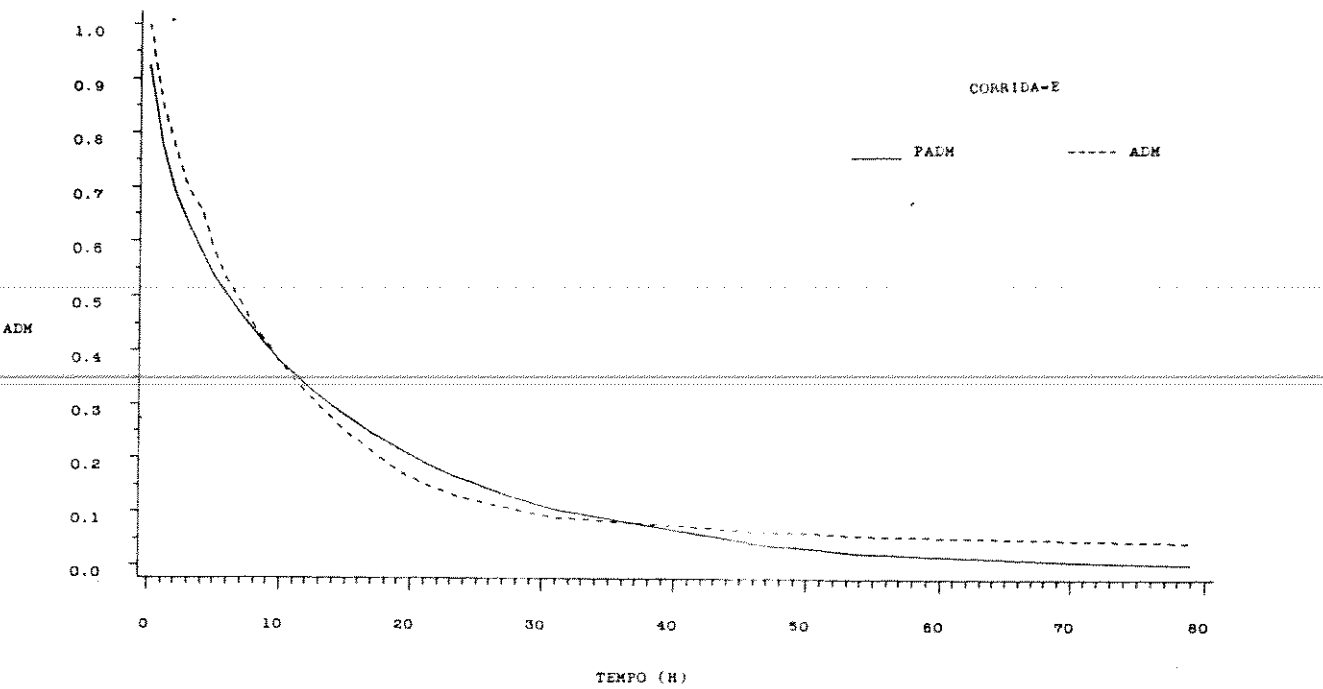


FIGURA G5 - Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 60°C e 1,0 m/s

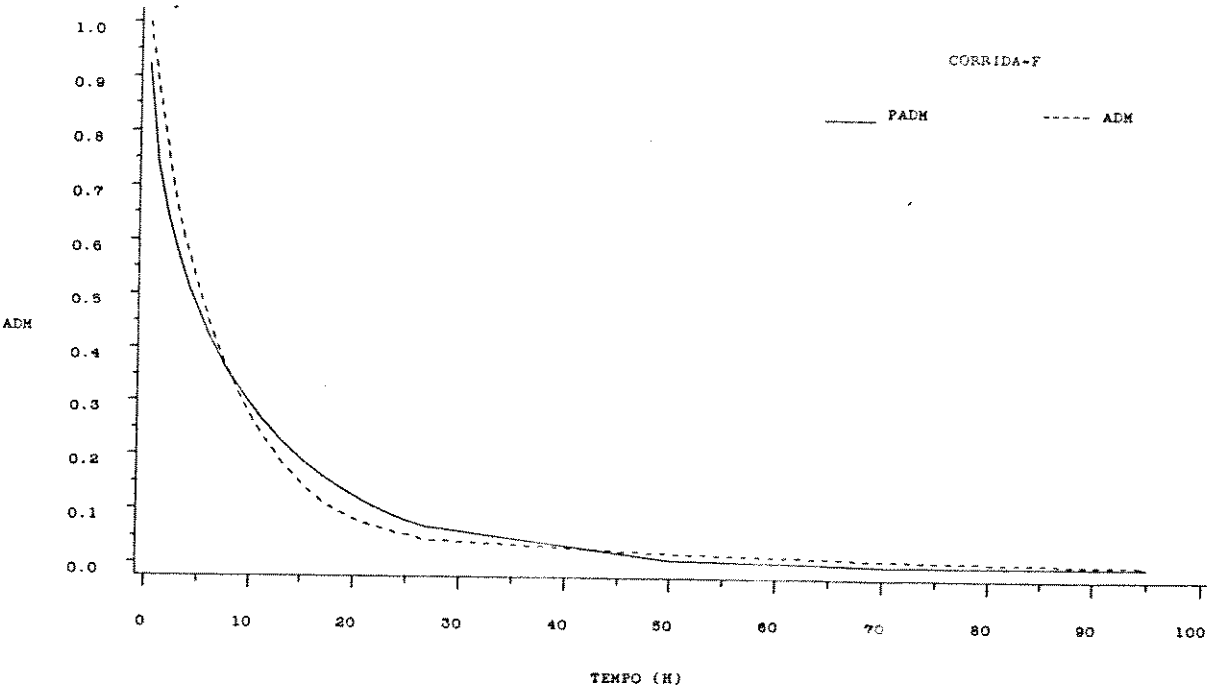


FIGURA G6 - Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 60°C e 1,5 m/s

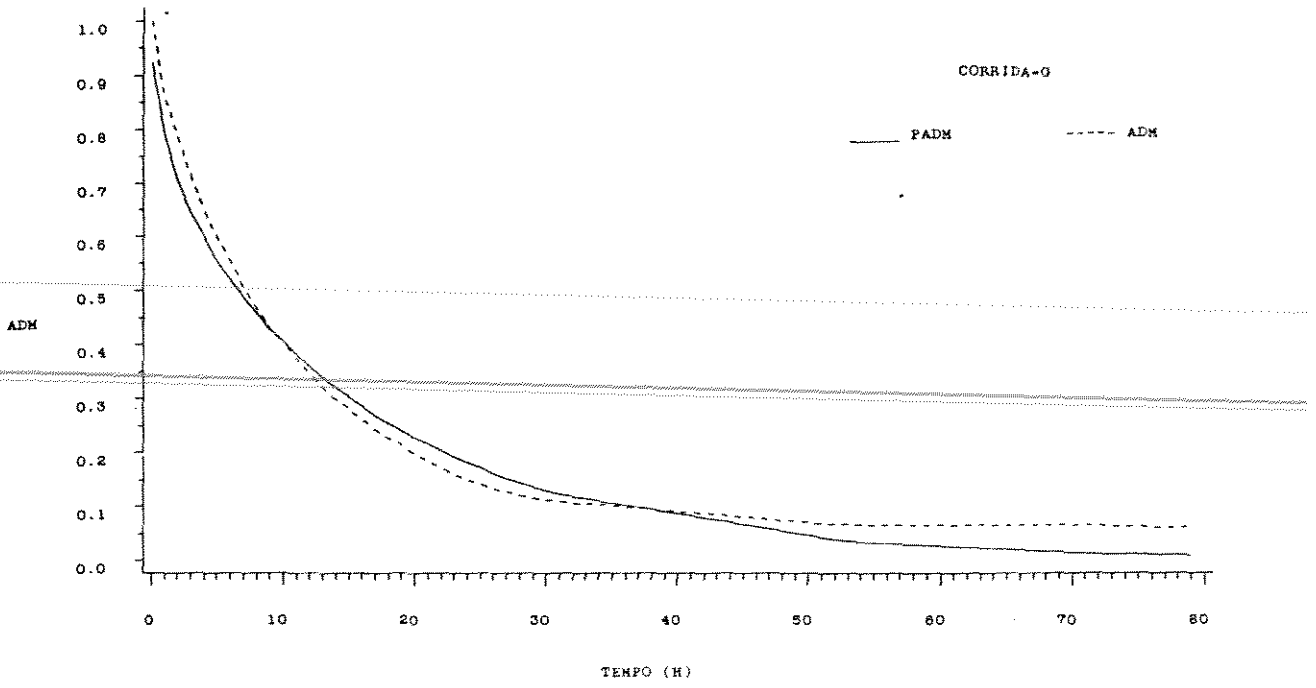


FIGURA G7 - Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 70°C e 0,5 m/s

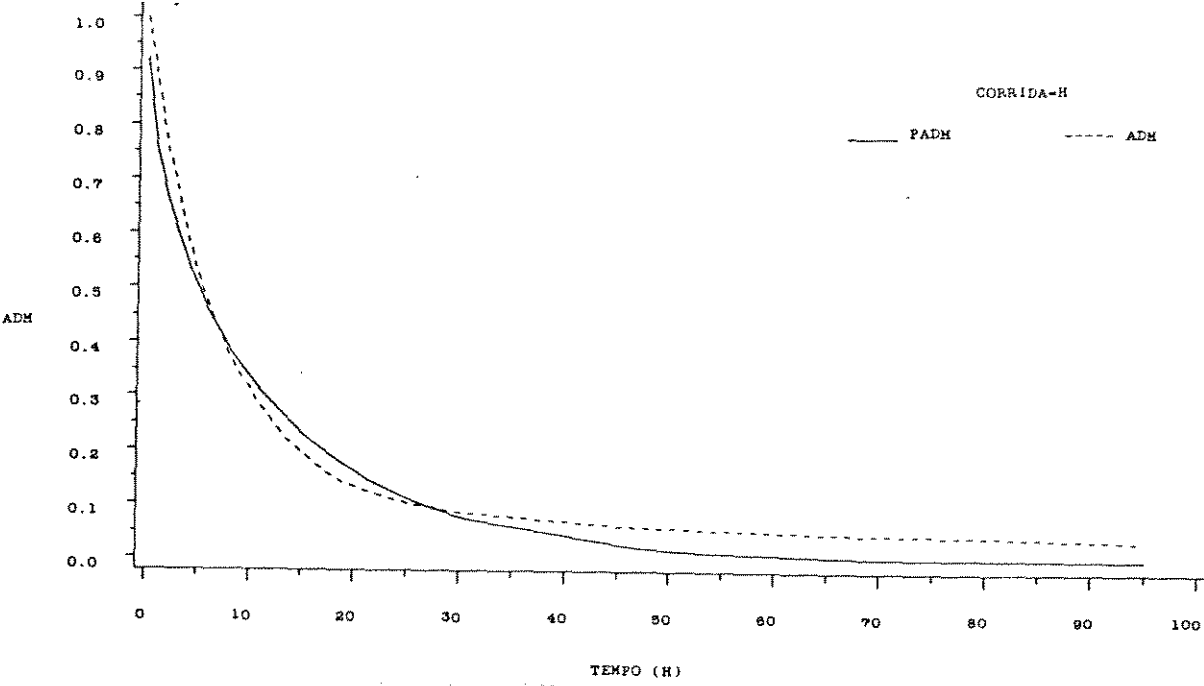


FIGURA G8 - Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 70°C e 1,0 m/s

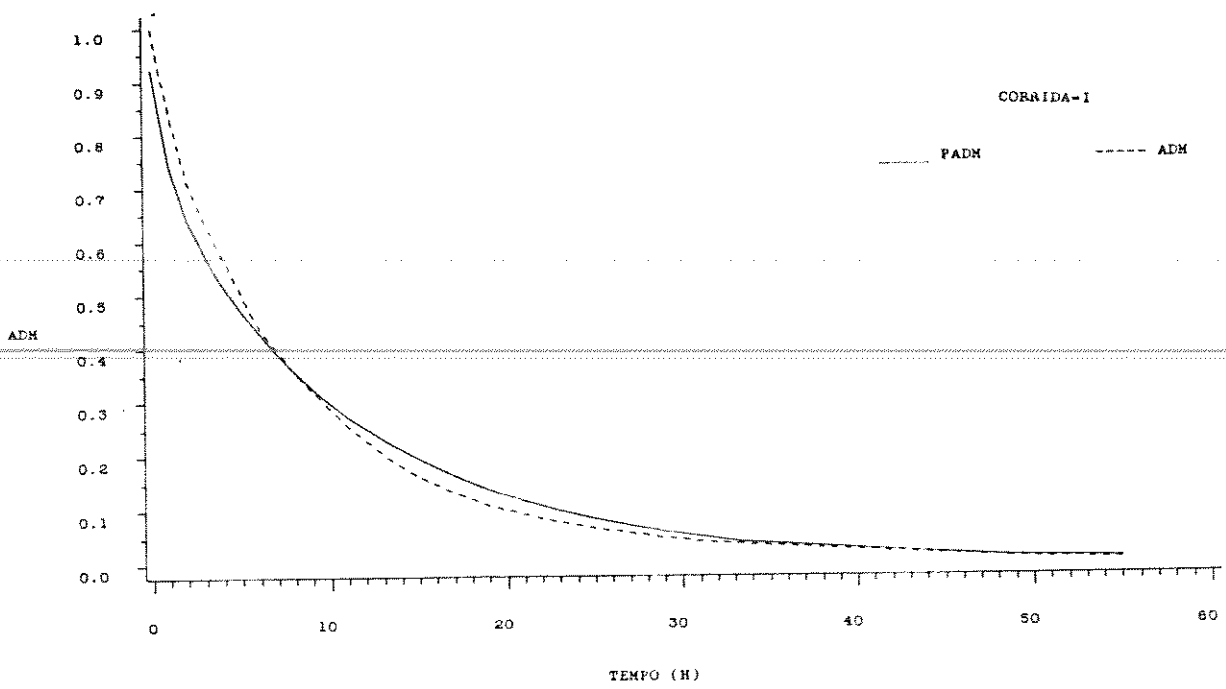


FIGURA G9 - Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 70°C e 1,5 m/s

ANEXO H - Curvas de Secagem ajustadas pela equação de Sazhin

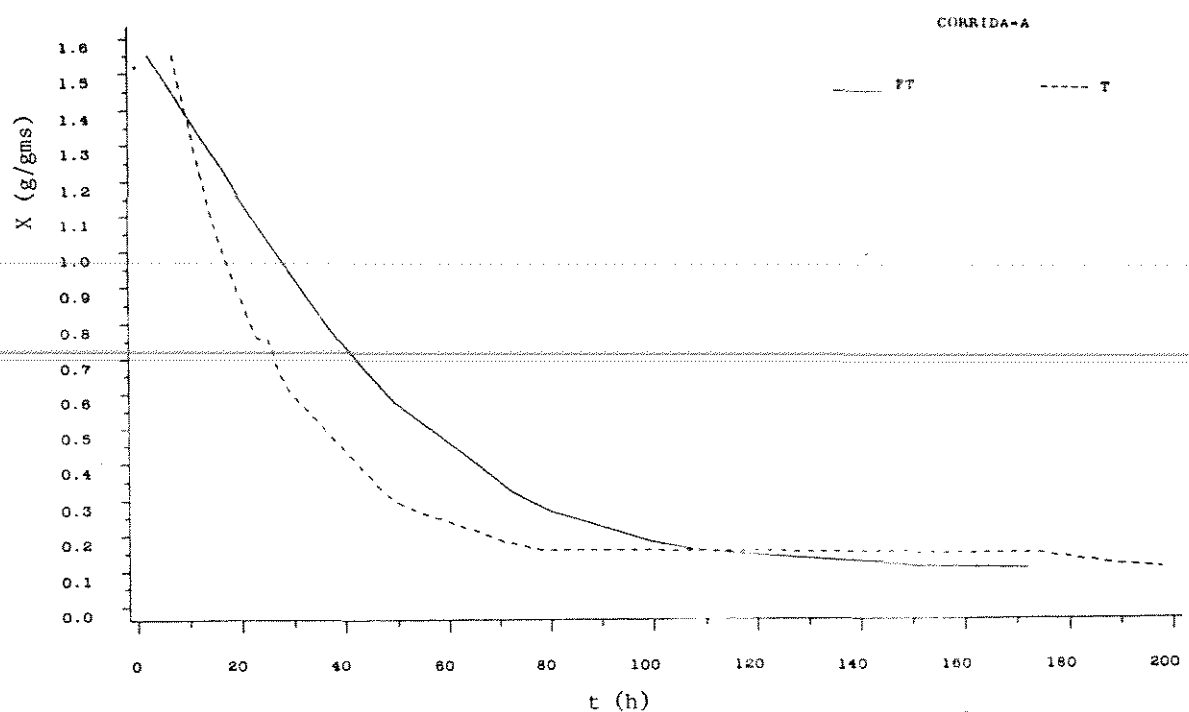


FIGURA H1 - Curva de secagem ajustada pela equação de Sazhin para 50°C e 0,5 m/s

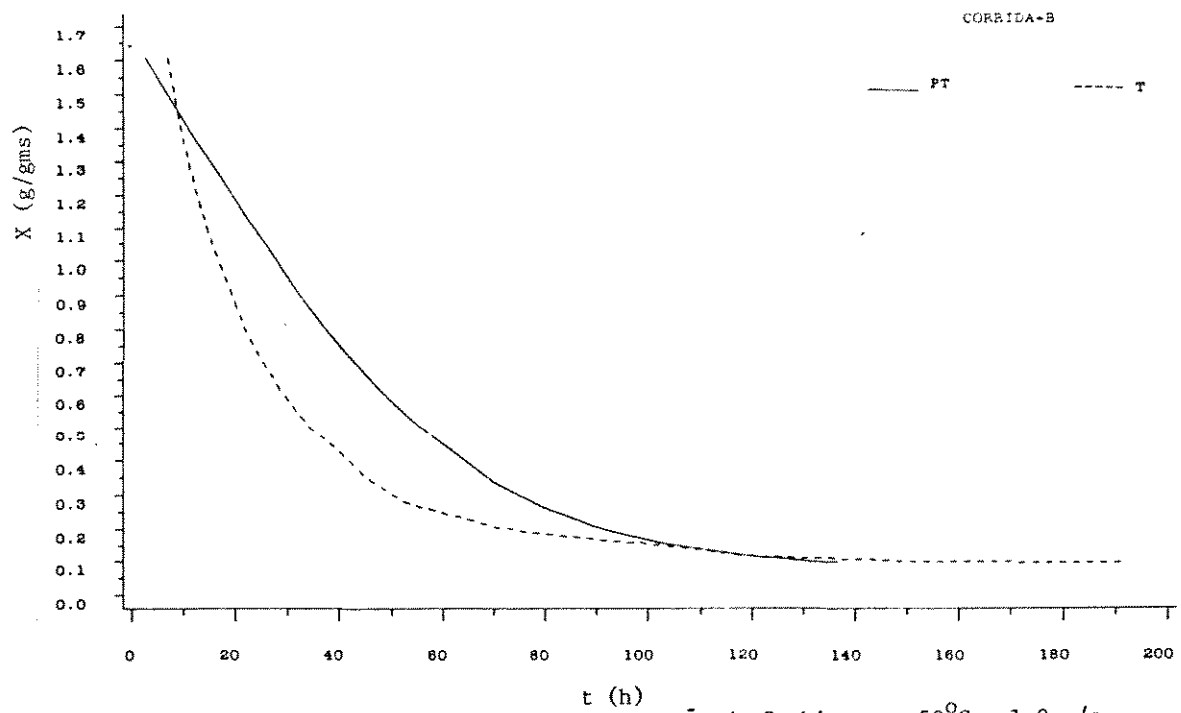


FIGURA H2 - Curva de secagem ajustada pela equação de Sazhin para 50°C e 1,0 m/s

0.1 = 0,1

Extender a equivalência para os demais valores

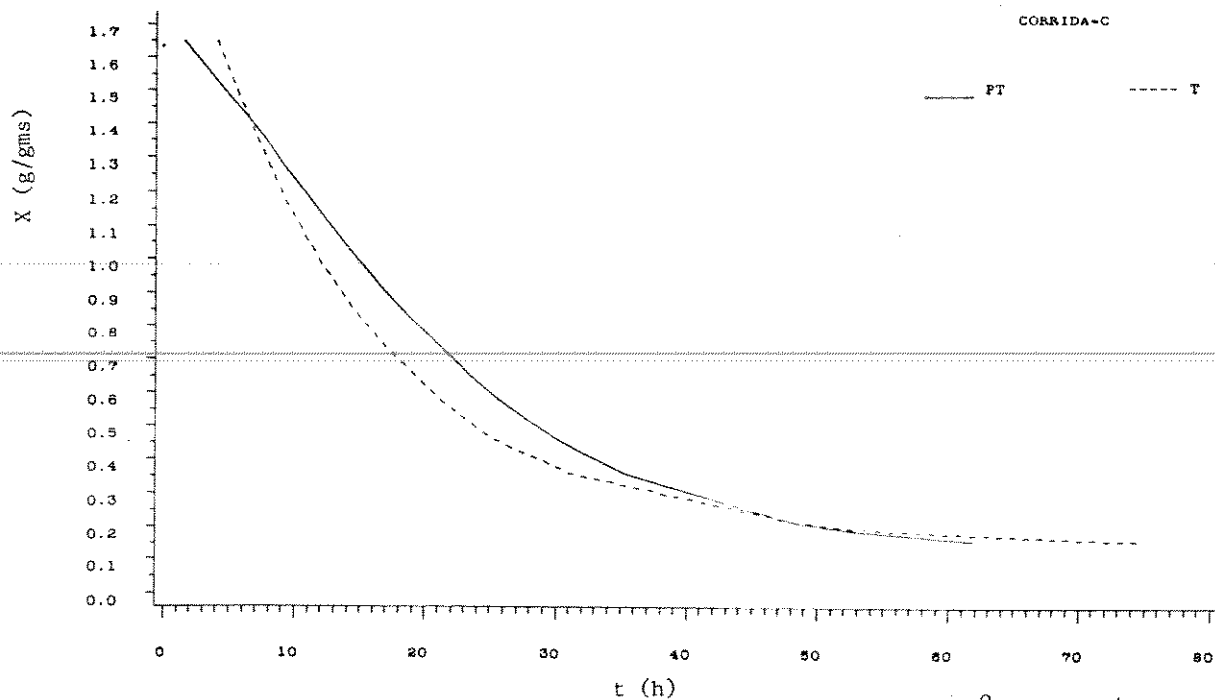


FIGURA H3 - Curva de secagem ajustada pela equação de Sazhin para 50°C e 1,5 m/s

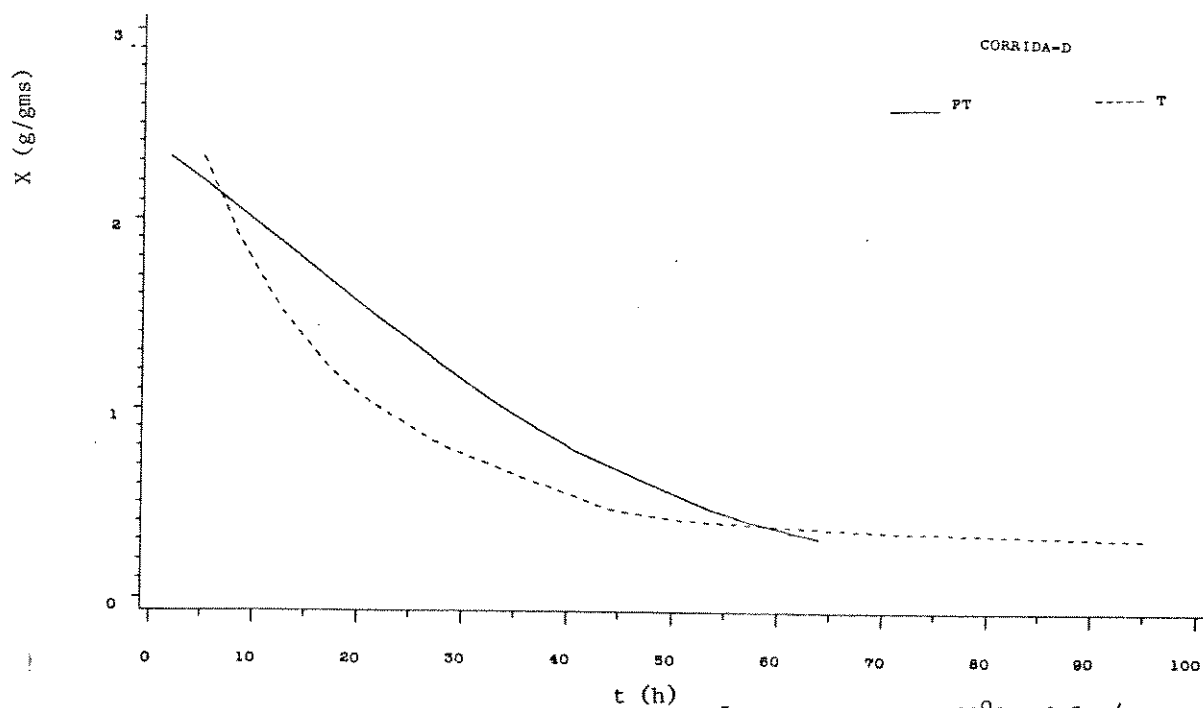


FIGURA H4 - Curva de secagem ajustada pela equação de Sazhin para 60°C e 0,5 m/s

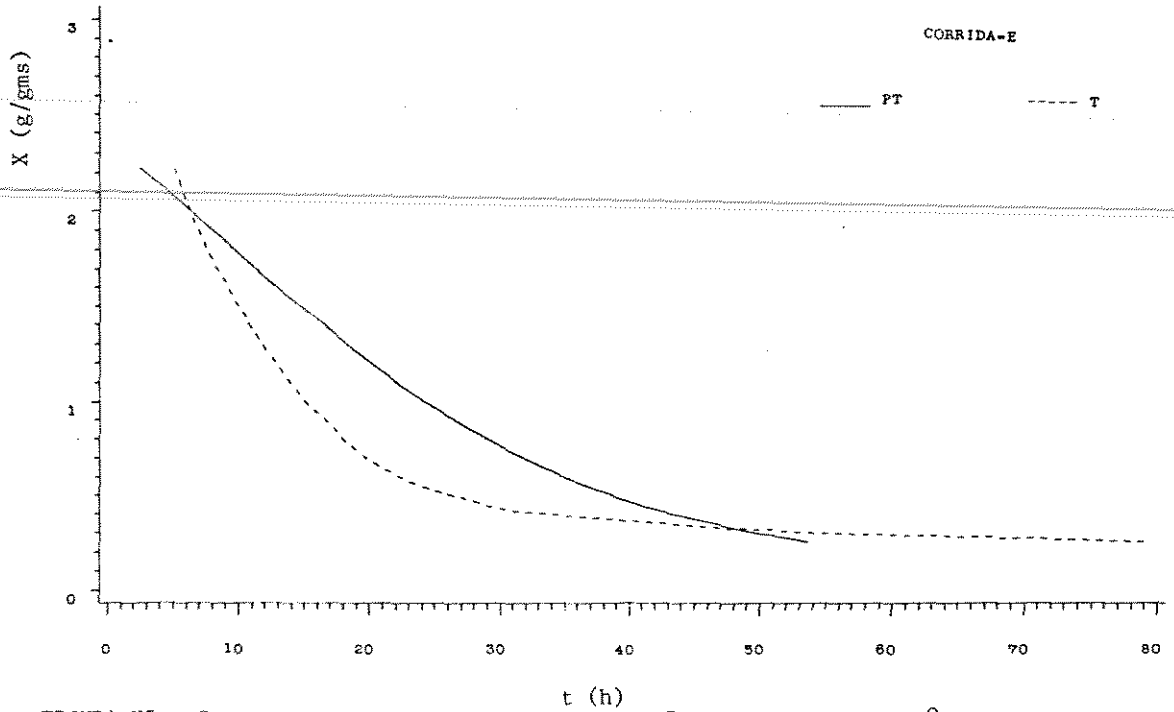


FIGURA H5 - Curva de secagem ajustada pela equação de Sazhin para 60°C e 1,0 m/s

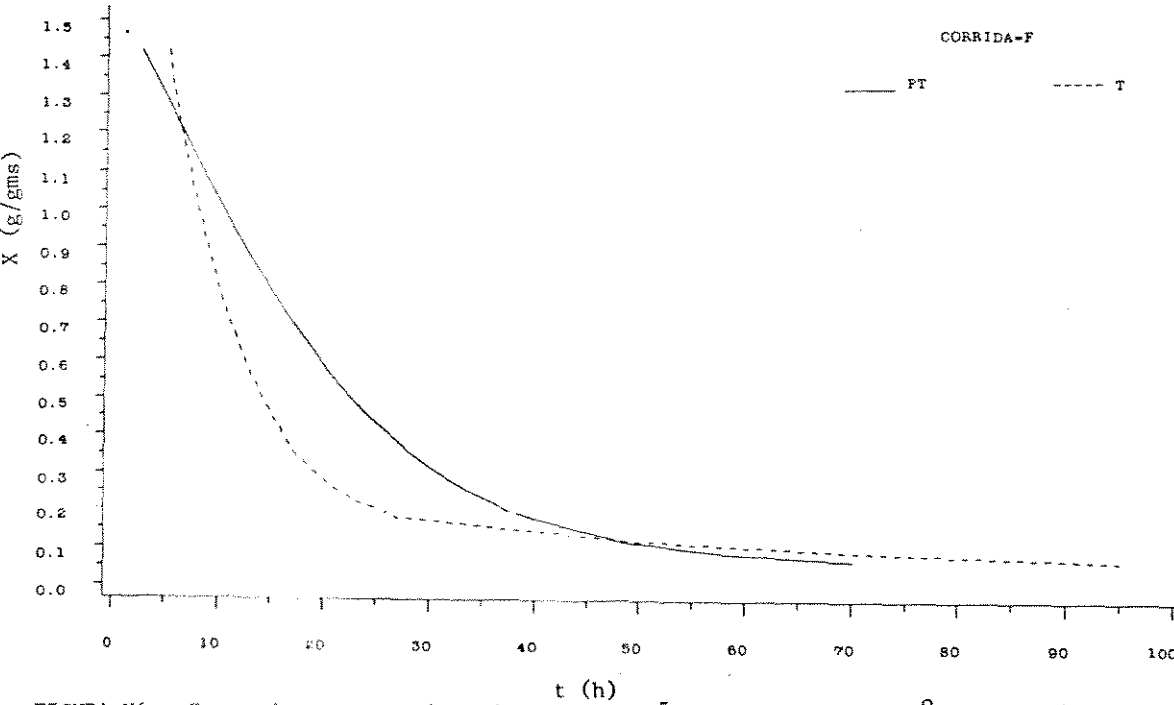


FIGURA H6 - Curva de secagem ajustada pela equação de Sazhin para 60°C e 1,5 m/s

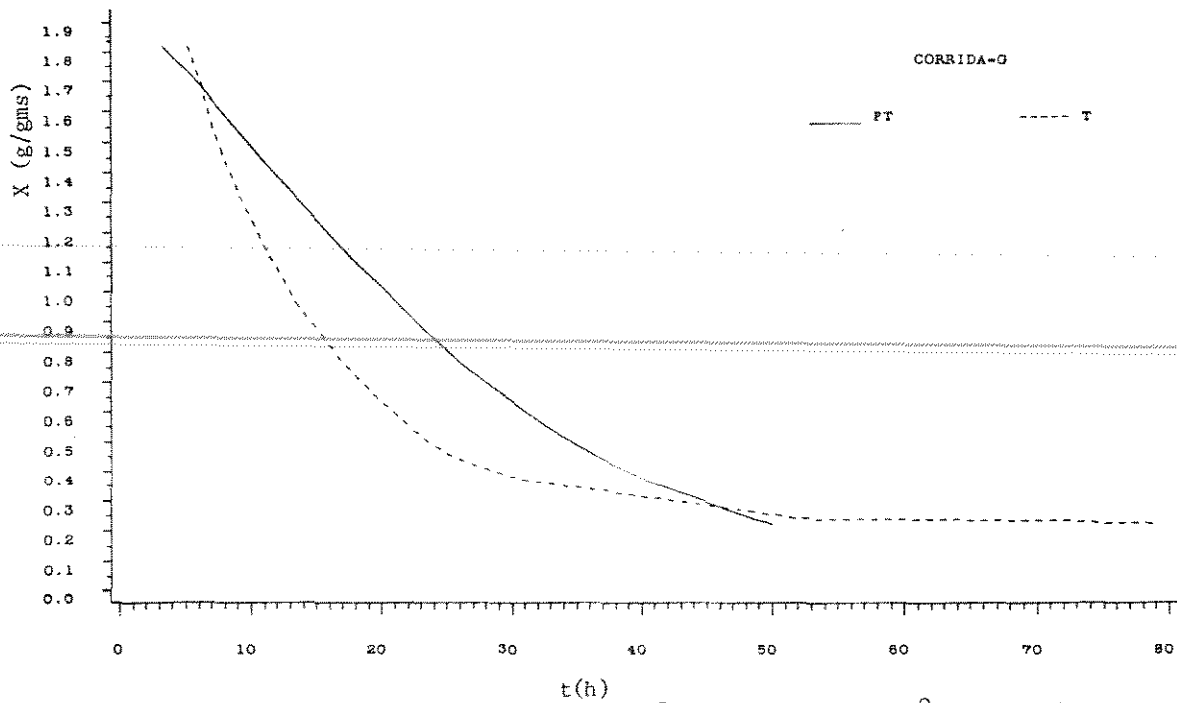


FIGURA H7 - Curva de secagem ajustada pela equação de Sazhin para 70°C e 0,5 m/s

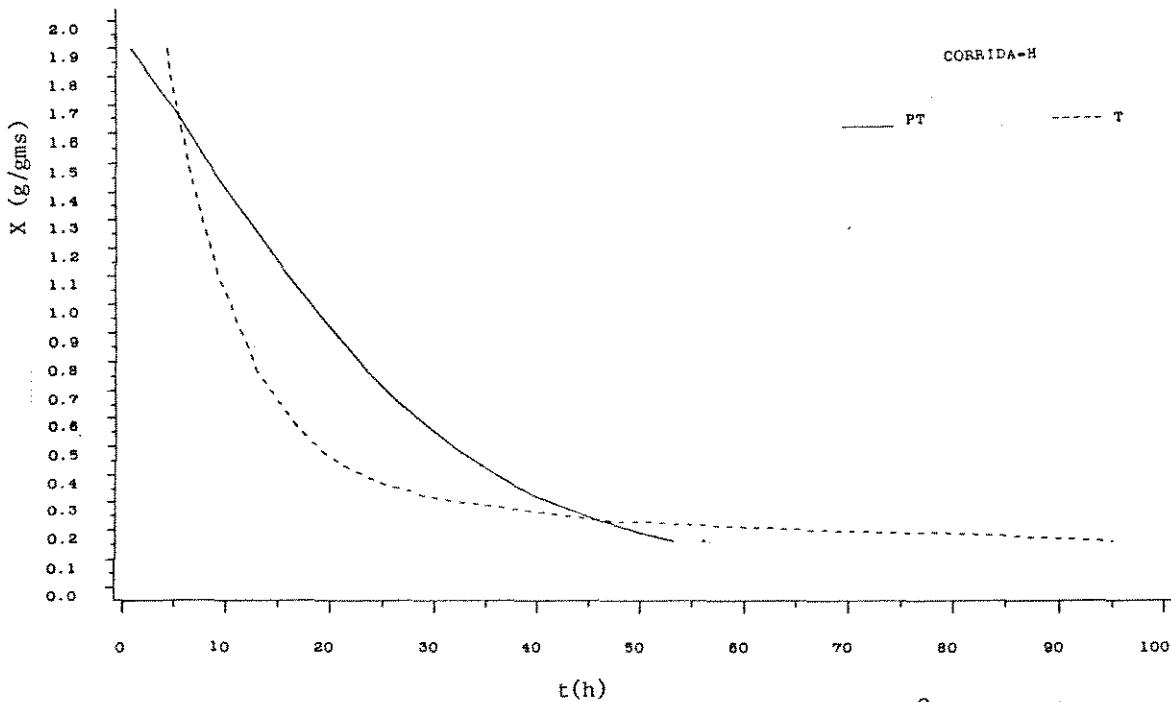


FIGURA H8 - Curva de secagem ajustada pela equação de Sazhin para 70°C e 1,0 m/s

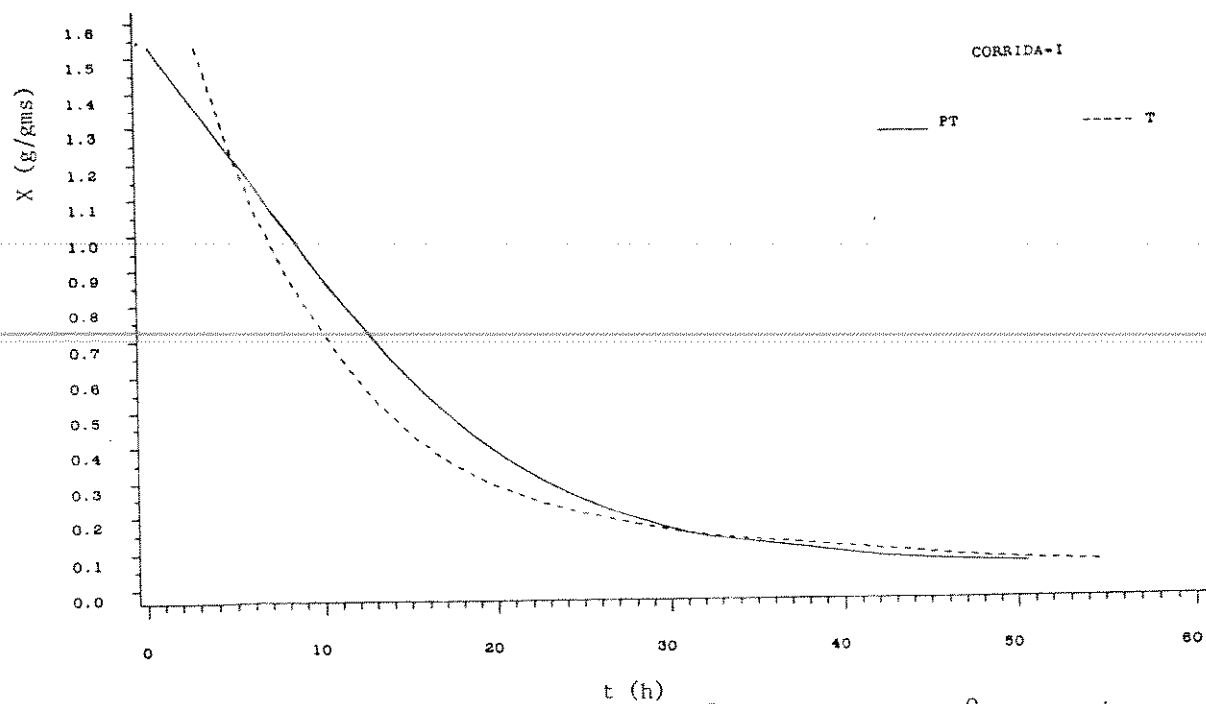


FIGURA H9 - Curva de secagem ajustada pela equação de Sazhin para 70°C e 1,5 m/s

ANEXO I - Curvas de taxa de secagem ($-dX/dt$) em função do conteúdo de umidade (X) obtidas pelo modelo difusional, pela equação de Sazhin e pelo uso de funções splines cúbicas

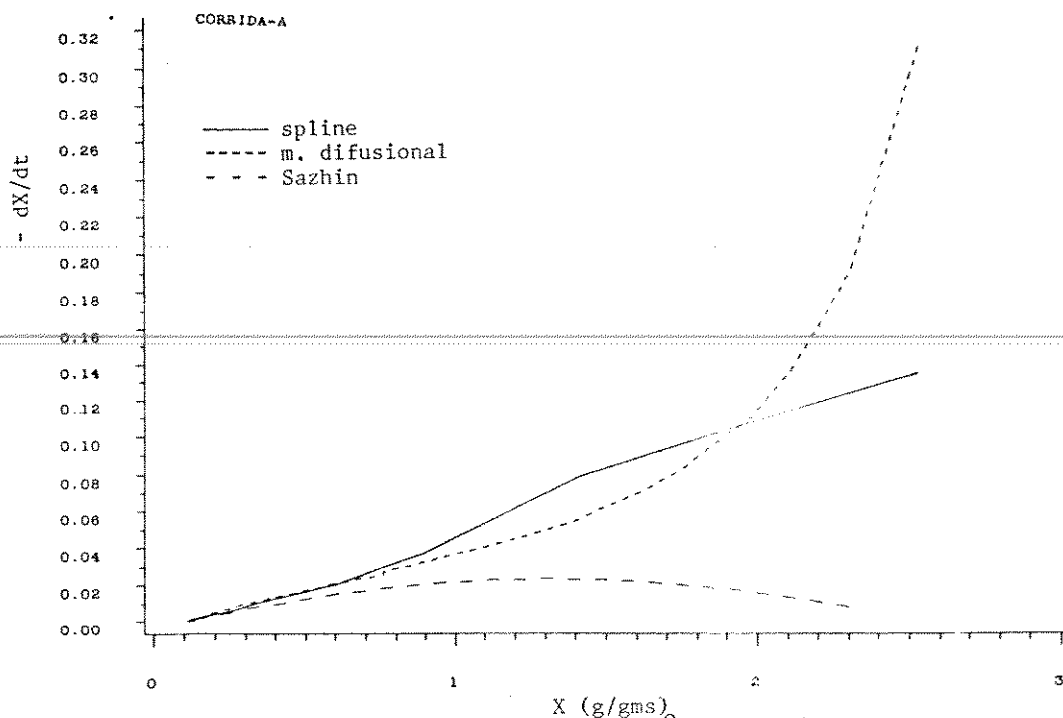


FIGURA I1 - Curvas de taxa de secagem para 50°C e 0,5 m/s

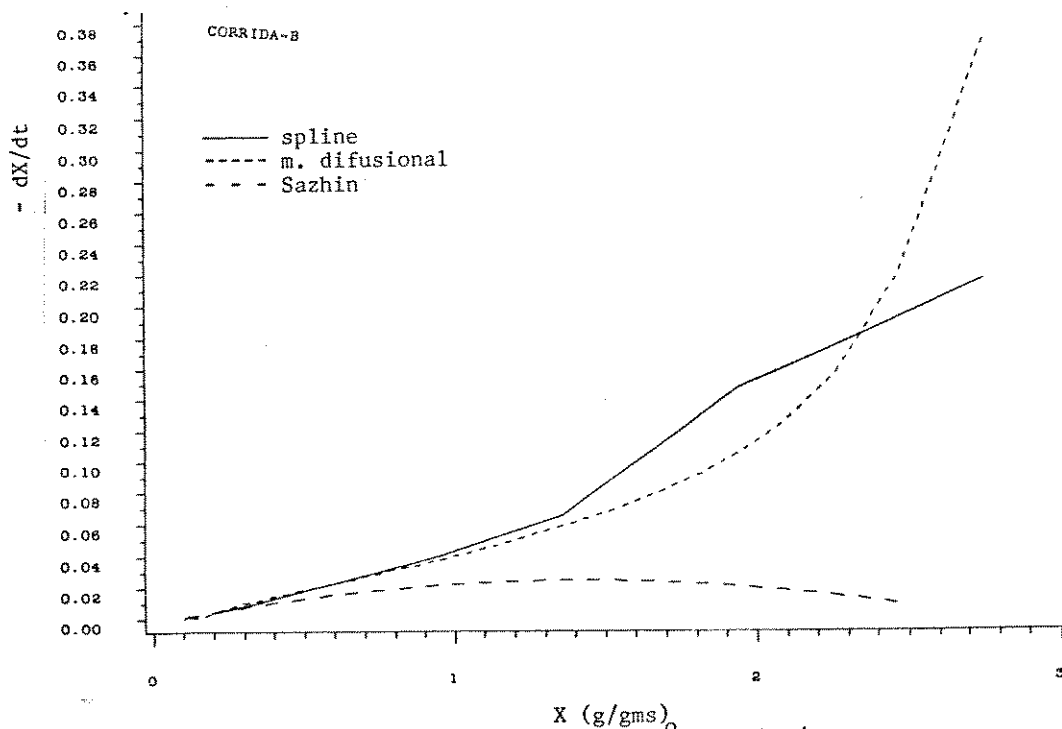


FIGURA I2 - Curvas de taxa de secagem para 50°C e 1,0 m/s

0,02 = 0,02

Extender a equivalência para os demais valores

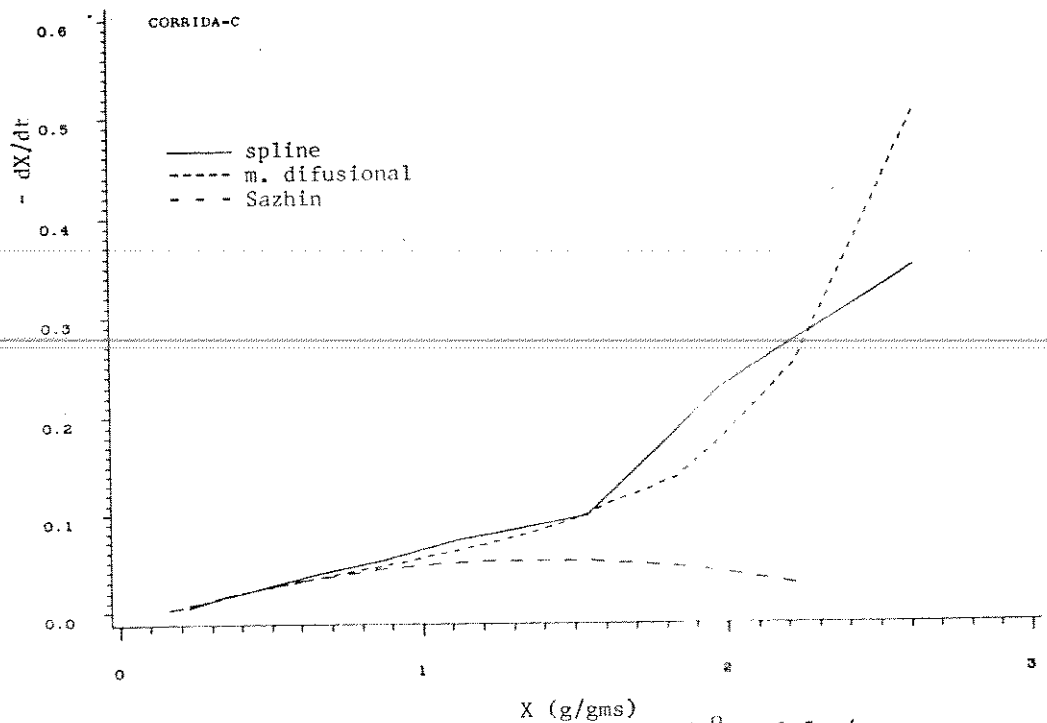


FIGURA I3 - Curvas de taxa de secagem para 50°C e 1,5 m/s

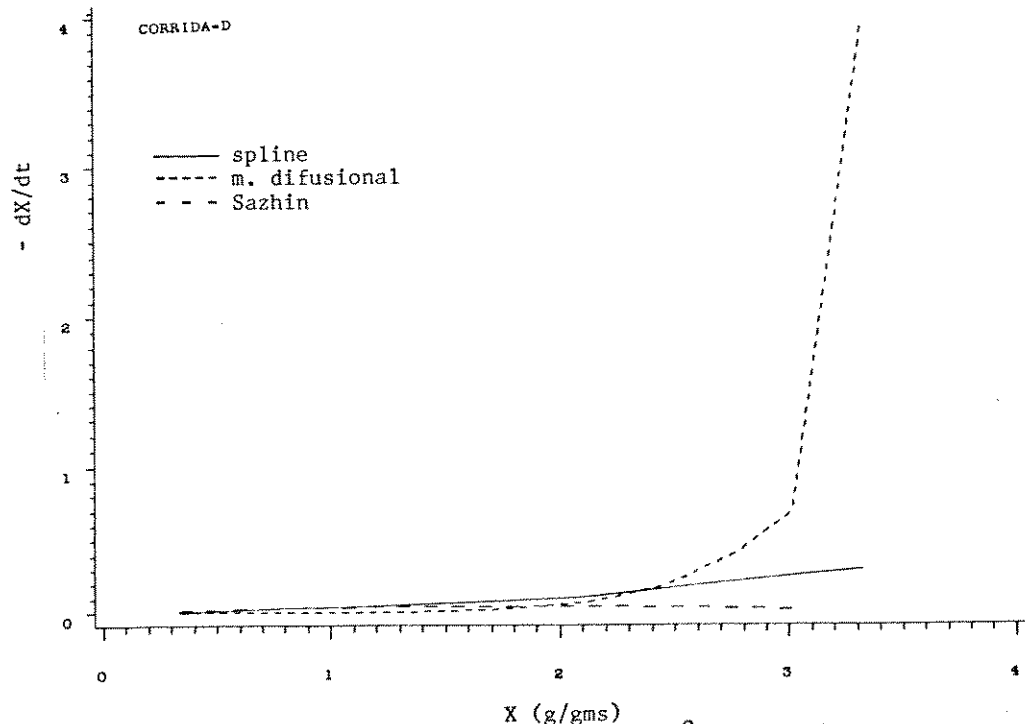


FIGURA I4 - Curvas de taxa de secagem para 60°C e 0,5 m/s

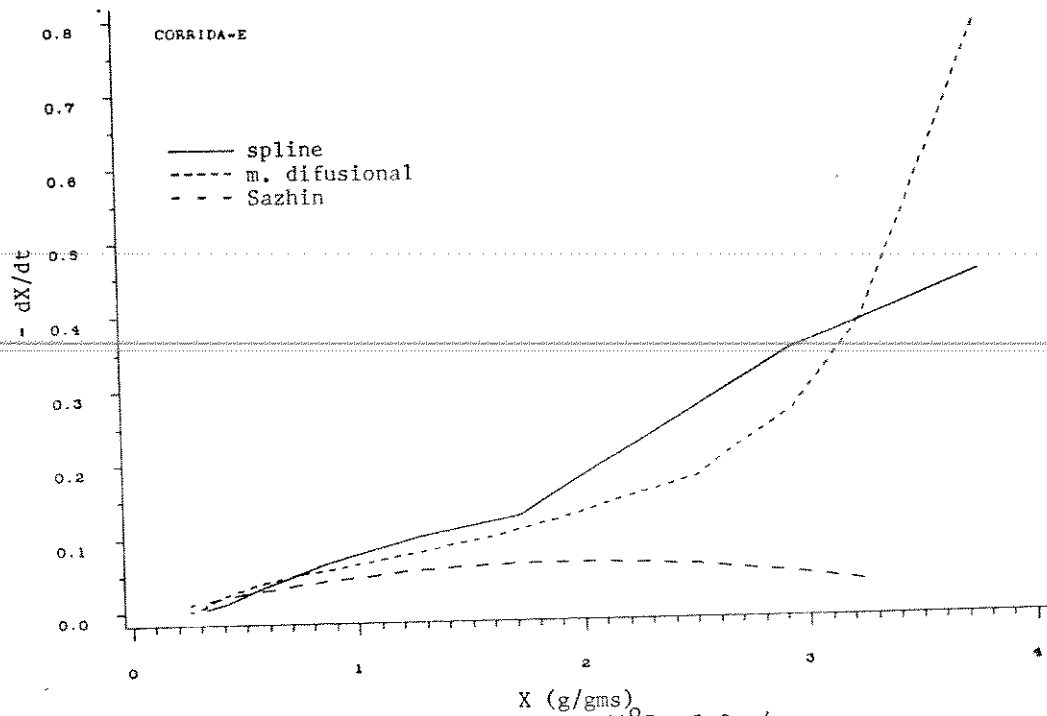


FIGURA I5 - Curvas de taxa de secagem para 60°C e 1,0 m/s

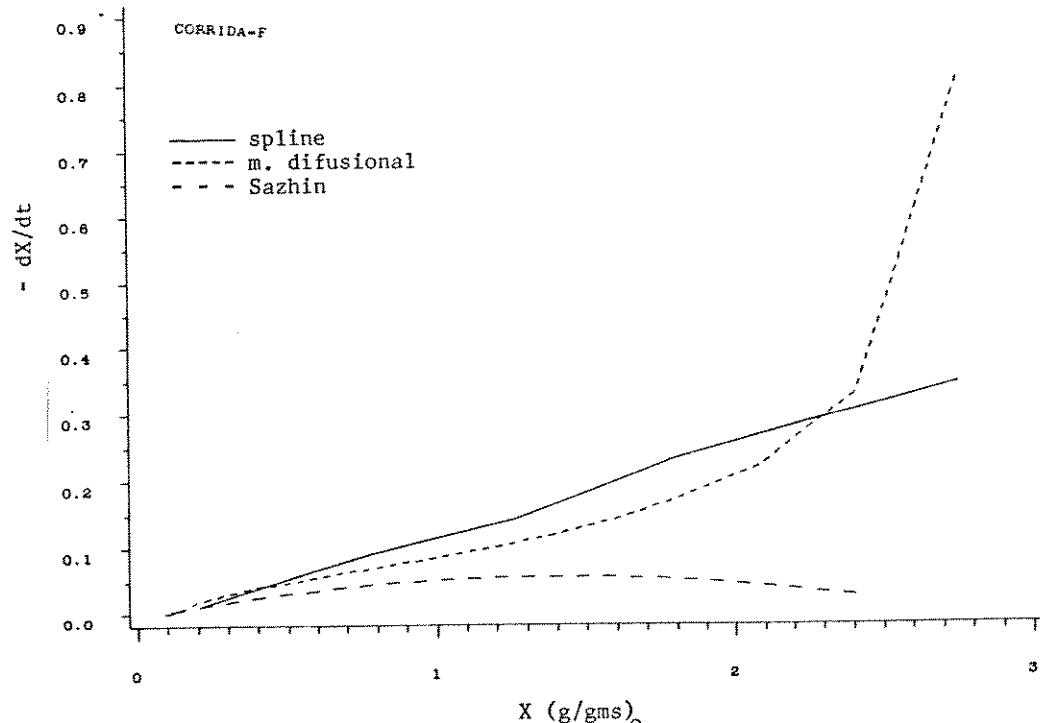


FIGURA I6 - Curvas de taxa de secagem para 60°C e 1,5 m/s

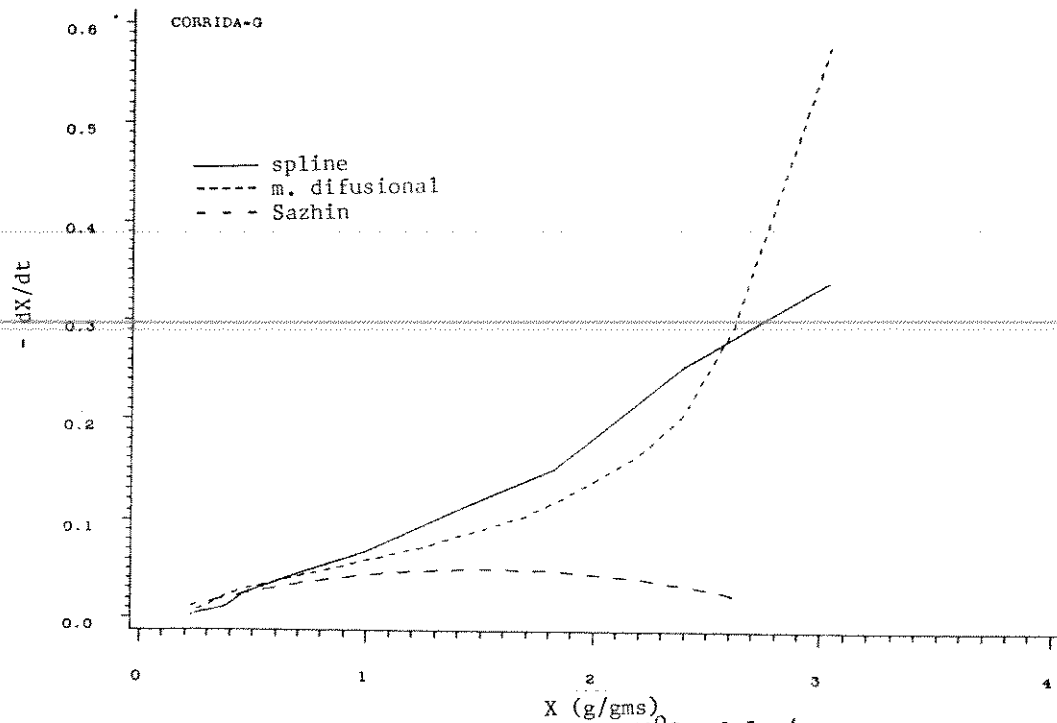


FIGURA I7 - Curvas de taxa de secagem para 70°C e 0,5 m/s

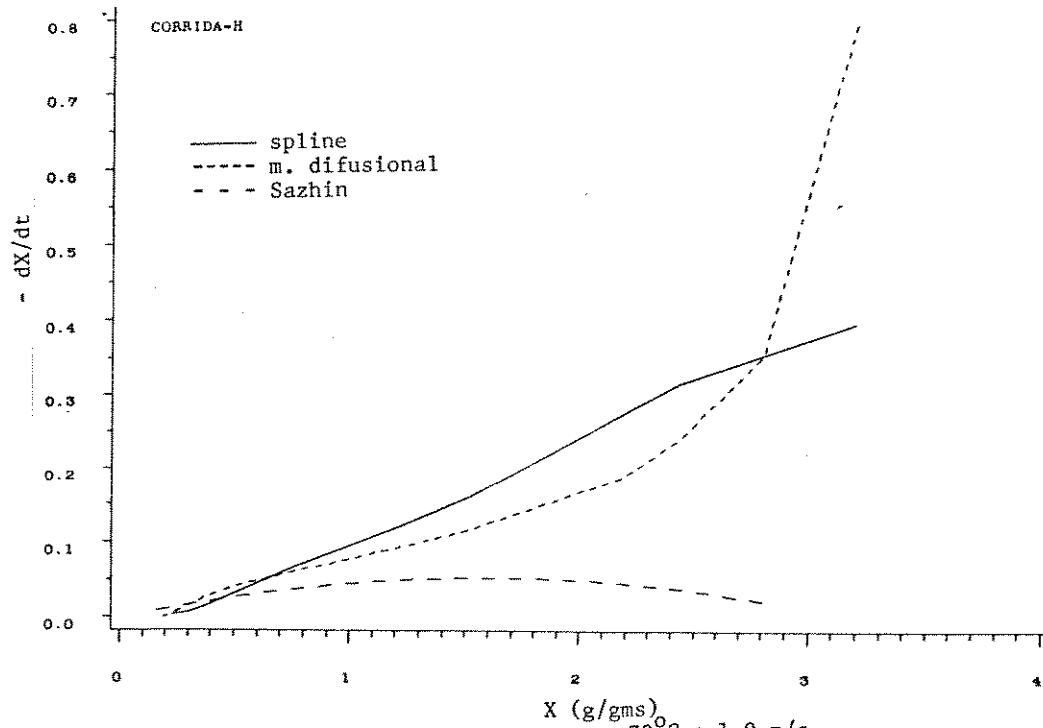


FIGURA I8 - Curvas de taxa de secagem para 70°C e 1,0 m/s

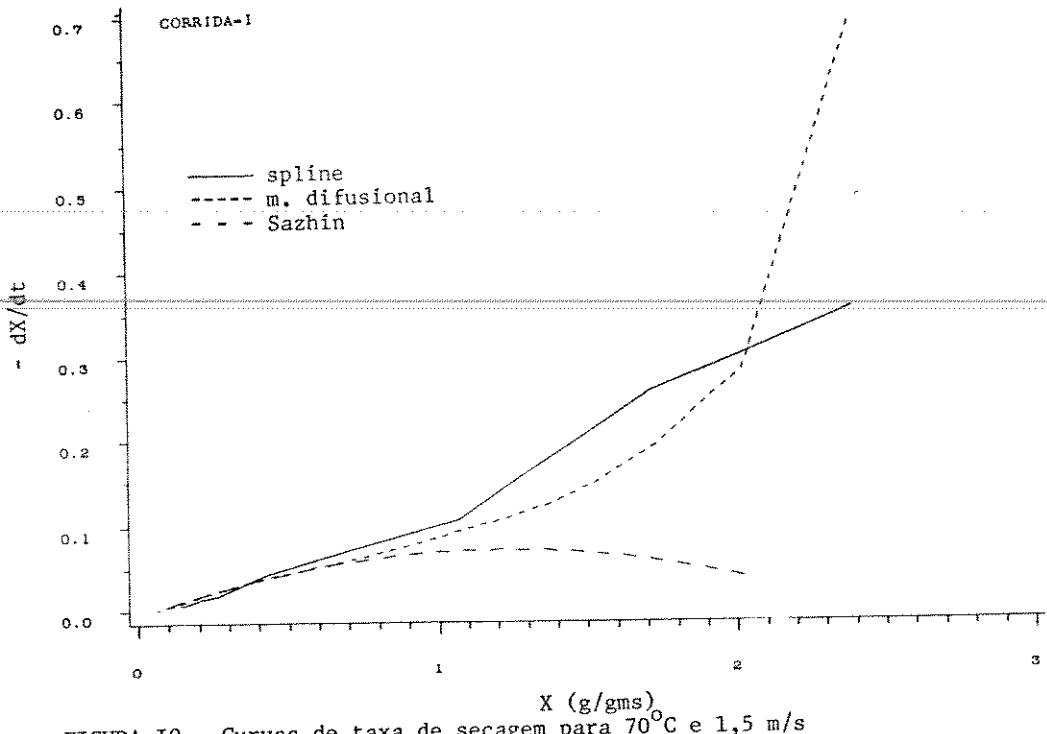


FIGURA I9 - Curvas de taxa de secagem para 70°C e 1,5 m/s

ANEXO J - Curvas de taxa de secagem adimensionalizadas $((-dX/dt)/y)$ versus o conteúdo de umidade (X), para o modelo difusional.

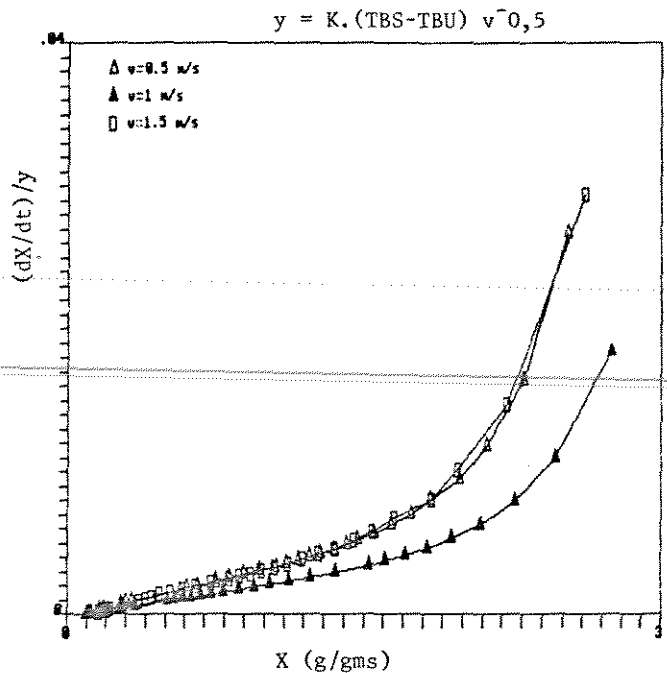


FIGURA J1 - Curva de taxa de secagem adimensionalizada utilizando a equação com $v^{-0,5}$ para 50°C com $v=0,5$ m/s, $v=1,0$ m/s e $v=1,5$ m/s

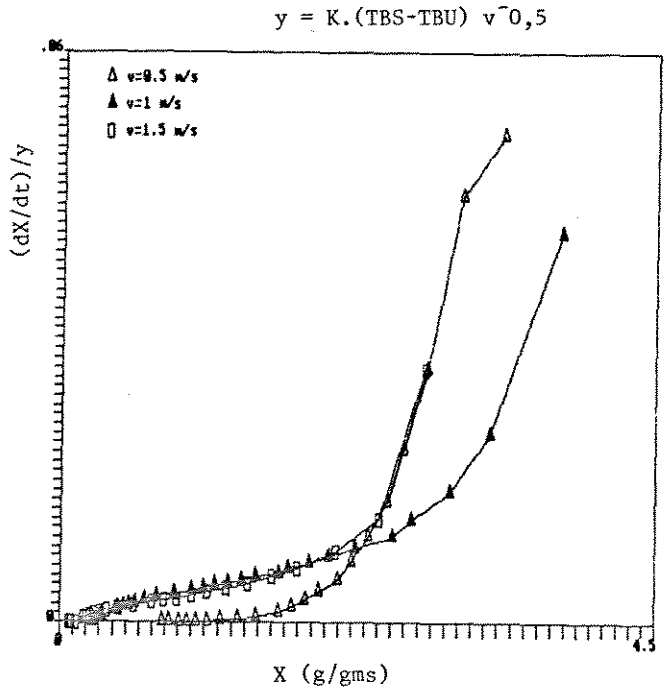


FIGURA J2 - Curva de taxa de secagem adimensionalizada utilizando a equação com $v^{-0,5}$ para 60°C com $v=0,5$ m/s, $v=1,0$ m/s e $v=1,5$ m/s

0.04 = 0,04

Extender a equivalência para os demais valores

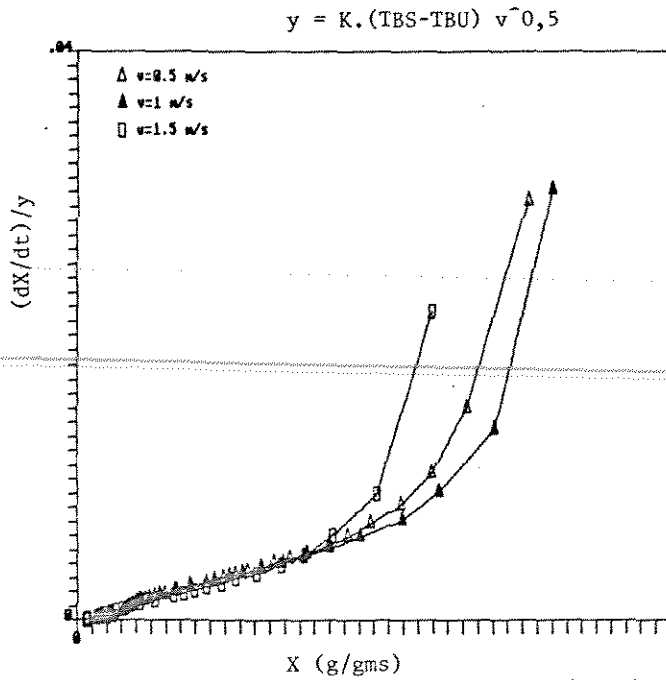


FIGURA J3 - Curva de taxa de secagem adimensionalizada utilizando a equação com $v^{-0,5}$ para 70°C com $v=0,5\text{ m/s}$, $v=1,0\text{ m/s}$ e $v=1,5\text{ m/s}$

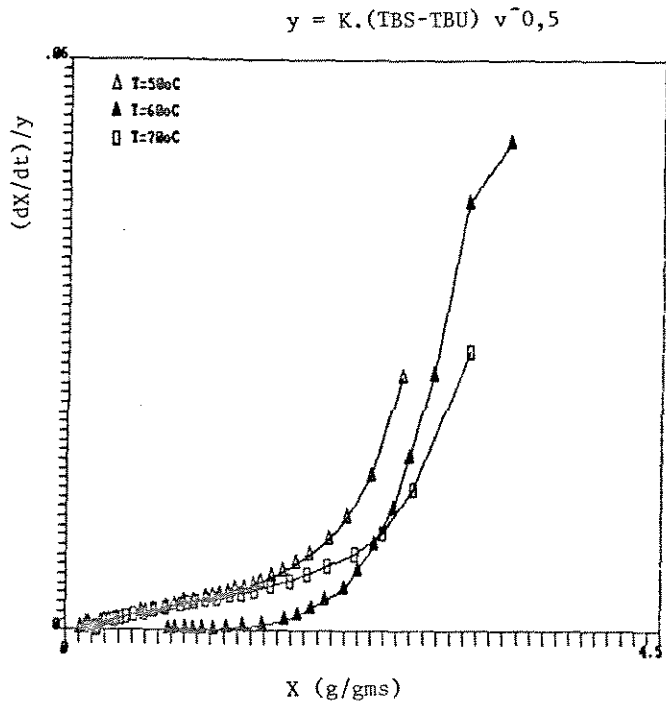


FIGURA J4 - Curva de taxa de secagem adimensionalizada utilizando a equação com $v^{-0,5}$ para $0,5$ m/s com $T=50^\circ\text{C}$, $T=60^\circ\text{C}$ e $T=70^\circ\text{C}$.

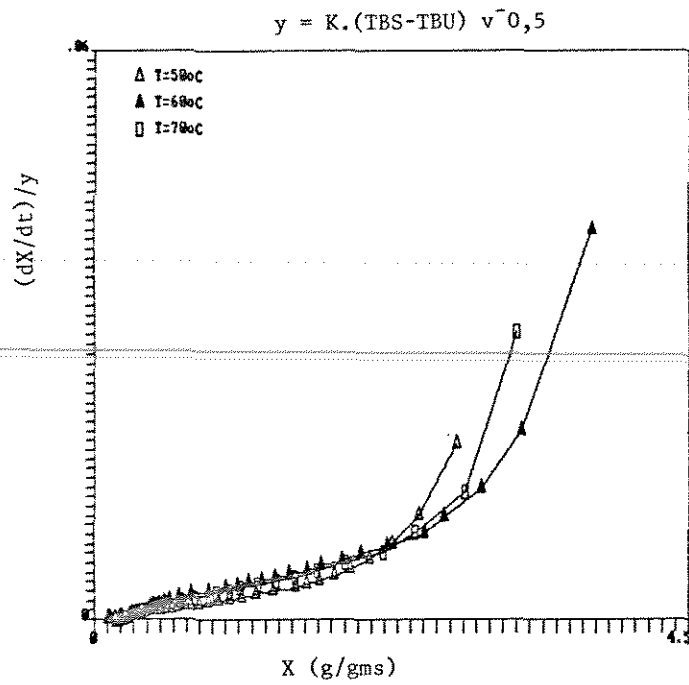


FIGURA J5 - Curva de taxa de secagem adimensionalizada utilizando a equação com $v^{-0,5}$ para 1,0 m/s com $T=50^{\circ}\text{C}$, $T=60^{\circ}\text{C}$ e $T=70^{\circ}\text{C}$.

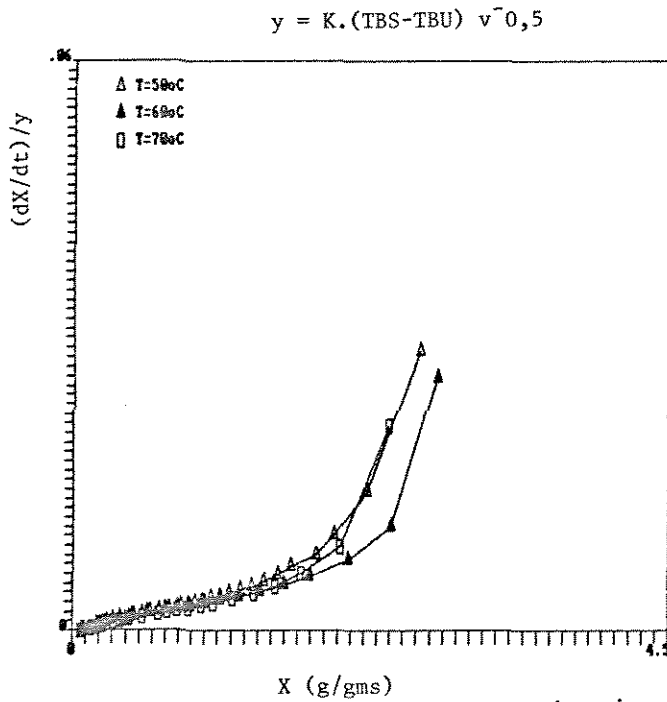


FIGURA J6 - Curva de taxa de secagem adimensionalizada utilizando a equação com $v^{-0,5}$ para 1,5 m/s com $T=50^{\circ}\text{C}$, $T=60^{\circ}\text{C}$ e $T=70^{\circ}\text{C}$.

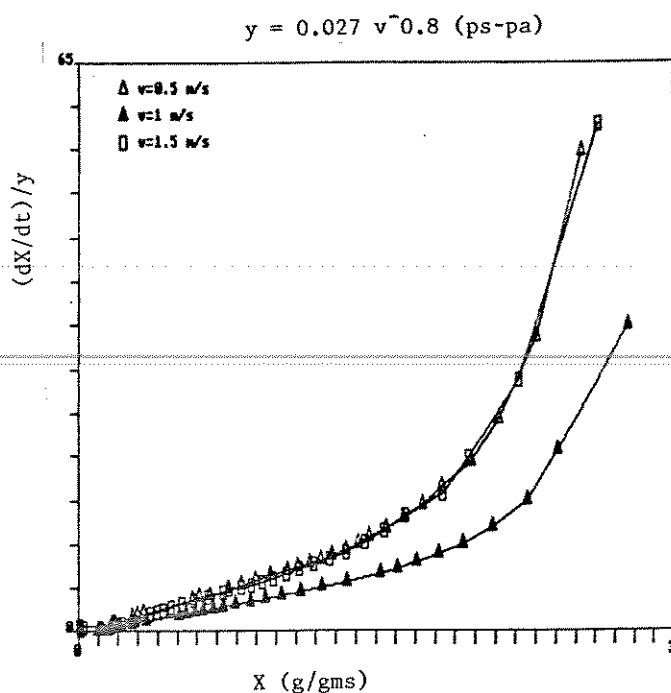


FIGURA J7 - Curva de taxa de secagem adimensionalizada utilizando a equação com $v^{-0.8}$ para 50°C com $v=0,5\text{m/s}$, $v=1,0\text{m/s}$ e $v=1,5\text{m/s}$.

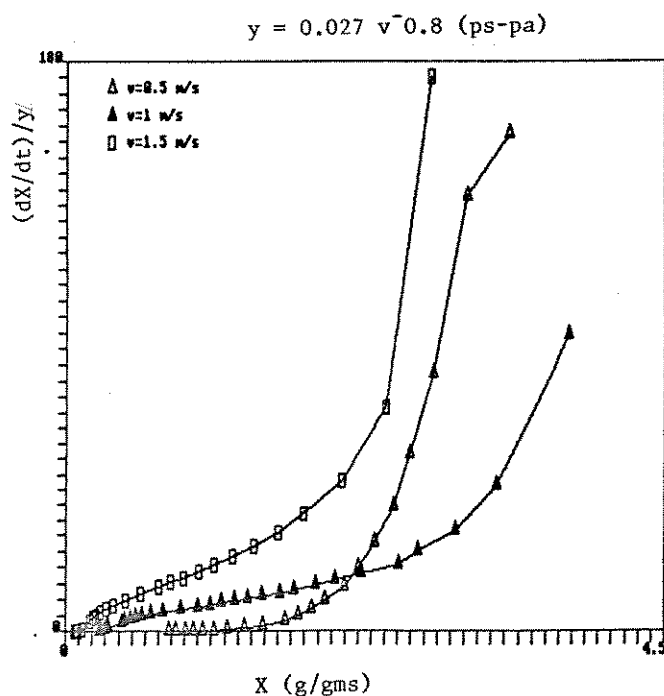


FIGURA J8 - Curva de taxa de secagem adimensionalizada utilizando a equação com $v^{-0.8}$ para 60°C com $v=0,5\text{m/s}$, $v=1,0\text{m/s}$ e $v=1,5\text{m/s}$.

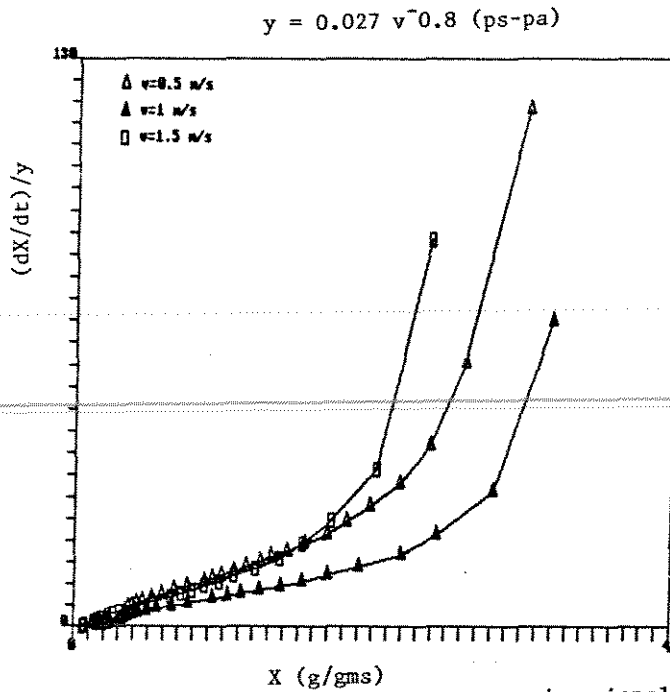


FIGURA J9 - Curva de taxa de secagem adimensionalizada utilizando a equação com $v^{-0.8}$ para 70°C com $v=0,5\text{m/s}$, $v=1,0\text{m/s}$ e $v=1,5\text{m/s}$.

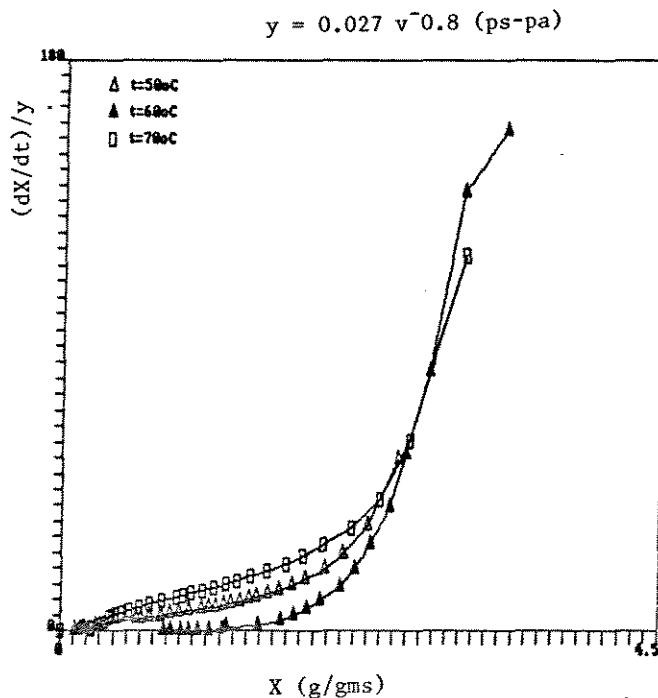


FIGURA J10 - Curva de taxa de secagem adimensionalizada utilizando a equação com $v^{-0.8}$ para $0,5\text{m/s}$ com $T=50^{\circ}\text{C}$, $T=60^{\circ}\text{C}$ e $T=70^{\circ}\text{C}$.

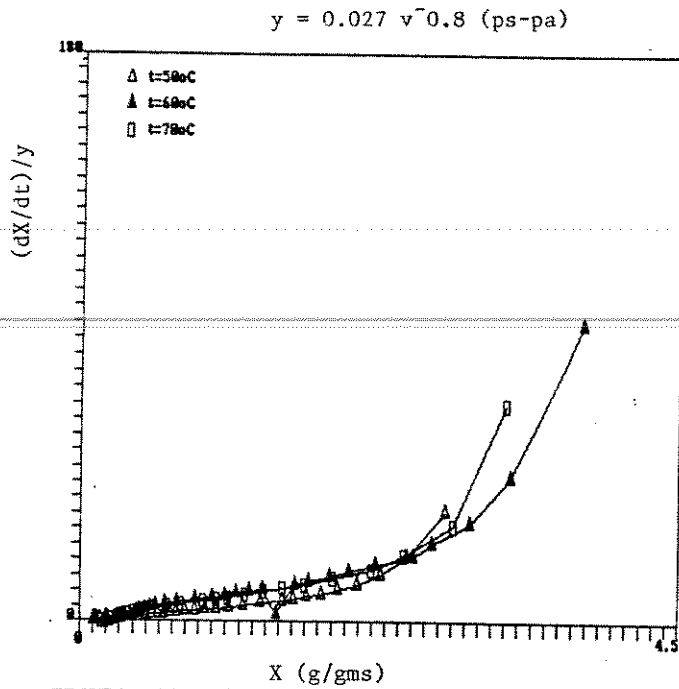


FIGURA J11 - Curva de taxa de secagem adimensionalizada utilizando a equação com $v^{-0.8}$ para 1,0m/s com $T=50^{\circ}\text{C}$, $T=60^{\circ}\text{C}$ e $T=70^{\circ}\text{C}$.

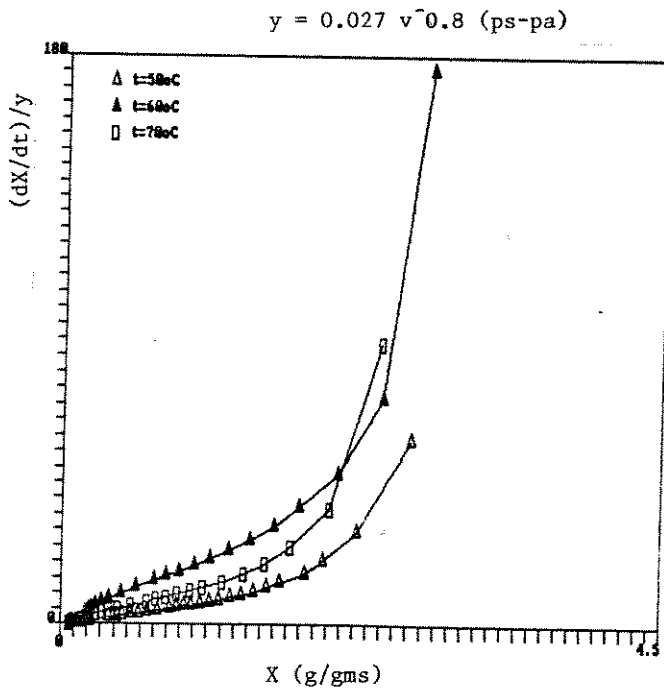


FIGURA J12 - Curva de taxa de secagem adimensionalizada utilizando a equação com $v^{-0.8}$ para 1,5m/s com $T=50^{\circ}\text{C}$, $T=60^{\circ}\text{C}$ e $T=70^{\circ}\text{C}$.