

ESTUDO DOS FENÔMENOS DE SECAGEM DE BATATA
(*Solanum tuberosum*, L. cultivar Bintje)

22/92

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

ESTUDO DOS FENÔMENOS DE SECAGEM DE BATATA

(*Solanum tuberosum*, L. cultivar Bintje)

FERNANDA ELIZABETH XIDIEH MURR 5/96

Engenheira de Alimentos

Parer

Este exemplar corresponde a redação final da
tese defendida por Fernanda Elizabeth Xidieh
Murr e aprovada pela Comissão Julgadora
em 30.06.92.

Orientador:

PROF. DR. KIL JIN PARK

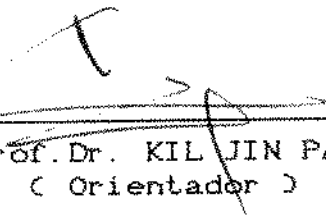
Tese apresentada como cumprimento parcial dos requisitos
para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Alimentos

Campinas - SP.

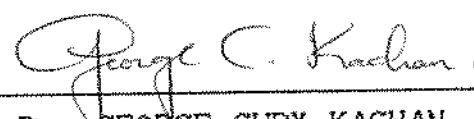
Fevereiro 1992

fun ho

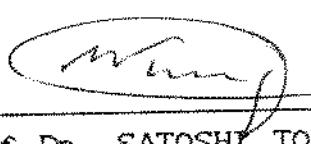
BANCA EXAMINADORA



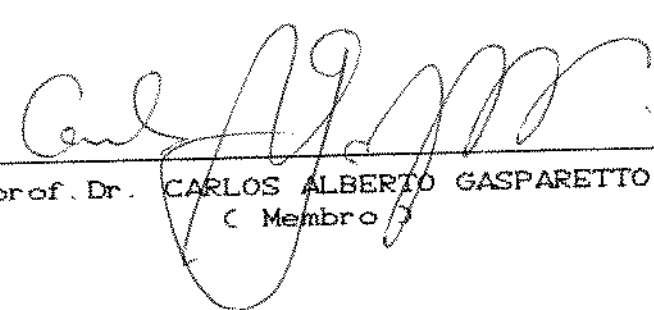
prof. Dr. KIL JIN PARK
(Orientador)



prof. Dr. GEORGE CURY KACHAN
(Membro)



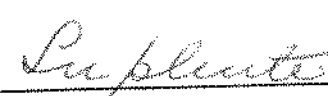
prof. Dr. SATOSHI TOBINAGA
(Membro)



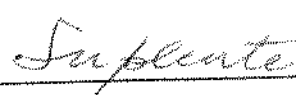
prof. Dr. CARLOS ALBERTO GASPARETTO
(Membro)



prof^a. Dr^a. ENNY THEREZINHA MARTUCCI
(Membro)



prof^a. Dr^a. FLORENCIA CECILIA MENEGALLI
(Membro)



prof. Dr. YOON KIL CHANG
(Membro)

Campinas, 30 de junho de 1992.

Dedico este trabalho a minha filha,

Tatiana

Uma homenagem aos meus pais,

Eda e Divo

e ao meu marido,

Miguel

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Kil Jin Park pela orientação precisa das idéias e da elaboração das etapas deste trabalho; pelo incentivo e apoio amigo indispensáveis à conquista deste título.

Aos componentes da pré-banca pelas valiosas sugestões na elaboração da versão final da tese: Dr. Carlos Alberto Gasparetto, Dra. Enny Therizinha Martucci, Dra. Florência Cecília Menegalli, Dr. George Cury Kachan, Dr. Satoshi Tobinaga e Dr. Yoon Kil Chang.

Ao professor Dr. Carlos Alberto Gasparetto pelo acompanhamento em algumas etapas do trabalho e pela colaboração na versão do resumo para o idioma inglês.

À professora Dra. Hilary C. Menezes pela utilização das instalações do Laboratório de Frutas e Hortalças da FEA-UNICAMP.

Ao professor Dr. Walter Esteves pela utilização das instalações do Laboratório de Óleos e Gorduras da FEA-UNICAMP.

Ao Dr. João Shojiro Tango pela utilização das instalações da Secção de Lípidos e Prótidos do ITAL.

Ao pesquisador Roberto M. de Moraes pela utilização das instalações da Secção de Química do ITAL.

Ao professor Dr. José Ferreira de Carvalho pela colaboração na análise estatística dos dados experimentais da condutividade térmica.

A Engenheira Regina Isabel Nogueira pelo companheirismo partilhado.

A Isabel de Fátima V. Gachet pela digitação deste trabalho.

Aos técnicos Ana E. Koon, Jane Barbutti e Márcio G. de Oliveira pela colaboração em algumas etapas das análises químicas.

A ABIA, Associação Brasileira das Indústrias de Alimentos pelas cópias deste trabalho.

A todos os amigos que pela sinceridade de sentimentos, sentem-se aqui incluídos.

SUMÁRIO

	Página
Sumário.....	vi
Lista de Tabelas.....	ix
Lista de Figuras.....	xvi
Nomenclatura.....	xviii
Resumo.....	xxii
Abstract.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Condutividade térmica.....	4
2.2. Umidade de equilíbrio.....	7
2.3. Secagem.....	15
2.3.1. Encolhimento.....	18
2.3.2. Normalização.....	21
2.3.2.1. Normalização através da Taxa de secagem.....	21
2.3.2.2. Normalização através da Adimensionalização.....	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1. Material.....	25
3.1.1. Condutividade térmica.....	25
3.1.2. Umidade de equilíbrio.....	25
3.1.3. Curvas de secagem.....	26

3.2.	Métodos.....	27
3.2.1.	Composição centesimal.....	27
3.2.2.	Condutividade térmica.....	28
3.2.3.	Unidade de equilíbrio.....	31
3.2.4.	Curva de secagem.....	32
3.2.5.	Área de superfície e volume.....	34
3.3.	Tratamento matemático.....	35
3.3.1.	Condutividade térmica.....	35
3.3.1.1.	Fontes de erro.....	37
3.3.2.	Unidade de equilíbrio.....	39
3.3.3.	Curva de secagem.....	43
3.3.3.1.	Encolhimento.....	43
3.3.3.2.	Modelo difusional.....	46
3.3.3.3.	Modelo difusional com encolhimento	49
3.3.3.4.	Modelo empírico.....	50
3.3.4.	Taxa de secagem.....	51
3.3.4.1.	Modelo difusional.....	51
3.3.4.2.	Modelo empírico.....	51
3.3.4.3.	Regressão linear.....	52
3.3.5.	Normalização.....	52
3.3.5.1.	Normalização através da Taxa de secagem.....	52
3.3.5.2.	Normalização através da Adimensionalização.....	55
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1.	Composição centesimal.....	61

4.2.	Condutividade térmica.....	62
4.3.	Umidade relativa.....	64
4.4.	Umidade de equilíbrio.....	65
4.5.	Encolhimento.....	70
4.6.	Modelo difusional.....	79
4.7.	Modelo difusional com encolhimento.....	99
4.8.	Modelo empírico para determinação do tempo de secagem.....	107
4.9.	Energia de ativação.....	109
4.10.	Taxa de secagem.....	111
	4.10.1. Modelo difusional.....	111
	4.10.2. Modelo empírico.....	113
	4.10.3. Regressão linear.....	113
4.11.	Normalização.....	115
	4.11.1. Normalização através da Taxa de secagem.....	115
	4.11.2. Normalização através da Adimensionalização.....	118
5.	CONCLUSÕES.....	124
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
7.	ANEXOS.....	140
	Anexo A.....	141
	Anexo B.....	143
8.	APÊNDICE A.....	165

LISTA DE TABELAS

Tabela no.	Assunto	Página
4.1	Variação da composição centesimal de batata (<i>Solanum tuberosum</i> , L. cultivar Bimtje) "in natura".....	61
4.2	Umidade relativa média do ar de secagem em função da velocidade e temperatura.....	65
4.3	Valores experimentais de umidade de equilíbrio (Xe) para dessorção de água em batata	66
4.4	Parâmetros estimados pelo modelo de BET por regressão não linear com dados das isotermas de dessorção de batata para n entre 1 e 10.....	67
4.5	Parâmetros estimados pelo modelo de BET por regressão não linear com dados das isotermas de dessorção de batata para n entre 15 e 25.....	67
4.6	Constantes estimadas pela regressão linear com dados das isotermas de dessorção de batata numa faixa de atividade de água entre 0,0427 e 0,6999.....	68
4.7	Parâmetros calculados pela equação linearizada de BET para batata numa faixa de atividade de água de 0,0427 e 0,6999.....	68

4.8	Parâmetros estimados por regressão não linear do modelo de GAB para batata numa faixa de atividade de água de 0,0427 e 0,6999.....	69
4.9	Valores de umidade de equilíbrio (X_e) de batata para temperaturas do ar de 35, 45 e 55°C e velocidade de 0,6 e 0,8m/s.....	70
4.10	Valores experimentais da área de superfície, volume e conteúdo de umidade inicial e final das amostras de batata com ar de secagem à 35°C.....	71
4.11	Valores experimentais da área de superfície, volume e conteúdo de umidade inicial e final das amostras de batata com ar de secagem à 45°C.....	72
4.12	Valores experimentais da área de superfície, volume e conteúdo de umidade inicial e final das amostras de batata com ar de secagem à 55°C.....	73
4.13	Valores dos parâmetros das equações empíricas de encolhimento estimados pelo método de regressão não linear.....	74
4.14	Valores dos parâmetros da equação de 2º grau para encolhimento estimados pelo método de regressão linear.....	76
4.15	Dados das curvas de secagem de batata na temperatura de 35°C e velocidade do ar de 0,6 e 0,8 m/s.....	80

4.16	Dados das curvas de secagem de batata na temperatura de 45°C e velocidade do ar de 0,6 e 0,8 m/s.....	81
4.17	Dados das curvas de secagem de batata na temperatura de 55°C e velocidade do ar de 0,6 e 0,8 m/s.....	82
4.18	Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio inicial das amostras de batata, para n entre 1 e 4	86
4.19	Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio inicial das amostras de batata, para n entre 5 e 20	86
4.20	Erro percentual do desvio assintótico em relação ao valor da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio inicial das amostras de batata.....	87
4.21	Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio médio das amostras de batata, para n entre 1 e 4.....	88
4.22	Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio médio das amostras de batata, para n entre 5 e 20	89

4.23	Erro percentual do desvio assintótico em relação ao valor da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio médio das amostras de batata.....	89
4.24	Variação percentual no valor da difusividade efetiva em função da temperatura do ar de secagem.....	92
4.25	Variação percentual no valor da difusividade efetiva em função da velocidade do ar de secagem.....	93
4.26	Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio médio das amostras de batata, para n entre 1 e 4 com dados da 1 ^a fase das curvas de secagem	95
4.27	Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio médio das amostras de batata, para n entre 5 e 20 com dados da 1 ^a fase das curvas de secagem	95
4.28	Erro percentual do desvio assintótico em relação ao valor da difusividade efetiva estimada para dados da 1 ^a fase das curvas de secagem	96
4.29	Equação da reta e coeficiente de correlação estimados pela regressão linear com dados da 1 ^a fase das curvas de secagem.....	97

4.30	Valores da difusividade efetiva obtidas pelo ajuste da regressão linear baseado no raio médio das amostras, com dados da 1 ^a fase das curvas de secagem	98
4.31	Valores experimentais do adimensional de concentração para temperatura do ar de secagem de 35°C.....	99
4.32	Valores experimentais do adimensional de concentração para temperatura do ar de secagem de 45°C.....	100
4.33	Valores experimentais do adimensional de concentração para temperatura do ar de secagem de 55°C.....	100
4.34	Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional considerando encolhimento, para n entre 1 e 4 com dados das curvas de secagem de batata.....	102
4.35	Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional considerando encolhimento, para n entre 5 e 20 com dados das curvas de secagem de batata.....	103
4.36	Erro percentual do desvio assintótico em relação ao valor da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional com encolhimento.....	104
4.37	Variação percentual no valor da difusividade efetiva considerando encolhimento e em função de temperatura do ar.....	105

4.38	Variação percentual no valor da disusividade efetiva considerando encolhimento e em função da velocidade do ar.....	105
4.39	Valores da difusividade efetiva estima pelo modelo difusional baseado no raio inicial, raio médio e considerando encolhimento.....	106
4.40	Valores da umidade de equilíbrio inicial (X_{1e}) e da constante K_s do modelo empírico estimados com os dados das das curvas de secagem.....	108
4.41	Intervalo de tempo de X_{1e} nas curvas de secagem de batata.....	108
4.42	Equação da reta para cálculo da energia de ativação com raio inicial, raio médio e considerando encolhimento.....	110
4.43	Valores da energia de ativação (E_a) com raio inicial, raio médio e considerando encolhimento em função da velocidade do ar de secagem.....	111
4.44	Valores da temperatura de búlbo úmido (T_{bu}) para as condições experimentais do ar de secagem numa pressão atmosférica de 712 mmHg.....	115
4.45	Valores dos números adimensionais de: Biot de calor(Bi_q), Biot de massa(Bi_m), Fourier(Fo) e Kossovich(Ko) para as condições experimentais.....	119

4.46	Valores dos parâmetros estimados por regressão não linear para 8 modelos em função do adimensional de concentração.....	123
------	---	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura no.	Assunto	Página
3.1	Esquema do sistema de obtenção de dados de condutividade térmica.....	29
3.2	Detalhes da sonda de medição da condutividade térmica.....	29
4.1	Comparação entre os dados experimentais e os calculados pelos modelos de secagem uniforme, de Kilpatrick e equações empíricas de encolhimento de batata.....	75
4.2	Comparação entre os dados experimentais e os estimados pela equação de 2º grau para a relação das áreas no encolhimento de batata.....	77
4.3	Comparação entre os dados experimentais e os estimados pela equação de 2º grau para a relação dos volumes no encolhimento de batata.....	78
4.4	Efeito da temperatura sobre o conteúdo de umidade das amostras de batata com velocidade do ar de secagem de 0,6 m/s nas temperaturas de 35, 45 e 55°C.....	83

4.5	Efeito da temperatura sobre o conteúdo de umidade das amostras de batata com velocidade do ar de secagem de 0,8 m/s nas temperaturas de 35, 45 e 55°C.....	84
4.6	Curvas de secagem em função do $\ln$ do adimensional de concentração para as condições experimentais do ar de secagem.....	101
4.7	Curvas de taxa de secagem obtidas pelo modelo difusional em função do conteúdo de umidade.....	112
4.8	Curvas de taxa de secagem obtidas por regressão linear para a 1 ^a fase em função do conteúdo de umidade.....	114
4.9	Normalização das curvas de secagem pela adimensionalização das taxas em função do conteúdo de umidade.....	116
4.10	Normalização das curvas de secagem pela adimensionalização das taxas em função do conteúdo de umidade para a 1 ^a fase das curvas de secagem.....	117

NOMENCLATURA

A	área de superfície	(m^2)
Ao	área de superfície inicial	(m^2)
α	coeficiente de primeira ordem	
bn	raízes da função de Bessel Jo	
CB	constante de BET	
CG	constante de Guggenheim	
C	concentração para conteúdo de umidade	$(kg\ H_2O/kg\ ms.m)$
Ce	concentração para conteúdo de umidade de equilíbrio	$(kg\ H_2O/kg\ ms.m^3)$
Co	concentração para conteúdo de umidade inicial	$(kg\ H_2O/kg\ ms.m^3)$
CP	fator de correção de proprie- dade das multicamadas	
cp	calor específico	$(J/kg.K)$
cpms	calor específico da massa seca	$(J/kg\ ms.K)$
Cw	concentração para conteúdo de umidade 100%	$(kg\ H_2O/kg\ ms.m^3)$
D	difusividade efetiva	(m^2/s)
DPA	desvio padrão assintótico	
Ea	energia de ativação	(J/mol)
ed	taxa de evaporação	$(kg\ H_2O/kg\ ms.s)$

gc	gradiente de concentração	(kg H ₂ O/m ³)
h	coeficiente de transferência de calor	(W/m ² .K)
H ₁	calor de sorção na primeira camada	(J/kg)
H ₂	calor de sorção das multica- madas	(J/kg)
H _{VL}	calor latente de vaporização	(W.s/kg)
k	coeficiente de condutividade térmica	(W/m.K)
K _s	coeficiente de taxa de secagem	
km	coeficiente convectivo de transferência de massa	(m/s)
L	comprimento	(m)
ms	conteúdo de massa seca	(kg ms)
n	número de camadas moleculares	
pa	pressão de vapor do ar	(Pa)
pw	pressão de vapor de saturação	(Pa)
Q	fluxo de calor	(J/s)
R	constante universal dos gases	(J/g mol.K)
r	raio do cilindro	(m)
$\bar{r}$	raio médio do cilindro (média aritmética entre raio inicial e final)	(m)
rc	coeficiente de correlação	
rm	raio médio	(m)
ro	raio inicial	(m)

r	raio característico do cilindro	
*	(= r _o ou r _m)	(m)
T	temperatura	(°C)
T _{bu}	temperatura de bulbo úmido	(°C)
t	tempo	(s)
t _o	tempo de correção	(s)
U	umidade em base úmida	
V	velocidade do ar	(m/s)
V _f	volume final	(m ³)
V _o	volume inicial	(m ³)
X	conteúdo de umidade da amostra	(kg H ₂ O/kg ms)
X _{cr}	conteúdo de umidade crítica	(kg H ₂ O/kg ms)
X _e	conteúdo de umidade de equilí- brio	(kg H ₂ O/kg ms)
X _M	conteúdo de umidade na mono- camada molecular	(kg H ₂ O/kg ms)
X _o	conteúdo de umidade inicial	(kg H ₂ O/kg ms)
X _R	umidade relativa	
α	difusividade térmica	(m ² /s)
β	parâmetro adimensional	
δ	parâmetro de encolhimento	
γ	parâmetro de encolhimento	
ρ	densidade	(kg/m ³)
ρ _o	densidade inicial	(kg/m ³)
Ø	diâmetro	(m)
ν	parâmetro de encolhimento	

ρ parâmetro de encolhimento

Números adimensionais:

Bi_q número de Biot de calor
 Bi_m número de Biot de massa
 Fo_m número de Fourier de massa
 Ko número de Kossovich
 N_{Gr} número de Grashof
 N_{Pr} número de Prandtl

Lista de Abreviaturas

AC açúcar
Am amido
CI cinzas
DEN densidade
FI fibras
GO gordura
PRO proteína
TEMP temperatura
UM água

RESUMO

Utilizando a batata (*Solanum tuberosum*, L. cultivar Bintje), desenvolveu-se um estudo experimental quantitativo dos fenômenos que ocorrem durante o processo de secagem: o de transporte de calor, através do estudo da condutividade térmica; o de transporte de massa pelo estudo das isotermas de desorção e das curvas de secagem levando-se em conta o fenômeno do encolhimento da amostra.

A determinação experimental da condutividade térmica foi feita por meio do método transiente da sonda linear na faixa de 20 a 27°C e amostras com umidades de 60 a 90% (b.u.). Para a condutividade obtida, foi proposta a correlação: $k = 0,17 \exp(1,5 U) \text{ (W/m.K)}$.

Os dados experimentais das isotermas de dessorção nas temperaturas de 35, 45 e 55°C, com umidade relativa obtida através de soluções de sais variando de 0.0427 a 0.6999, foram ajustadas pelo modelo de BET linearizado.

As corridas experimentais de secagem foram conduzidas em leito fixo, nas temperaturas de 35, 45 e 55°C, com umidade relativa variando de 16 a 43%. A melhor correlação das curvas de secagem foi obtida utilizando o modelo difusional aplicado à adimensional de concentração de umidade, sendo que os valores de difusividade efetiva foram

de $3,0 \times 10^{-4}$ à $4,0 \times 10^{-4}$ (m^2/s), com energia de ativação de 14,3 à 20,4 KJ/mol. Para a normalização dos dados experimentais foram utilizados adimensionais de concentração em função dos números adimensionais de: Biot de calor, Biot de massa, Fourier e Kossovich. Das correlações propostas, a que melhor se ajustou foi:

$$(C-C_e)/(C_o-C_e) = [Bi_m / (Bi_m + Ko)]^{-0.4} \exp [a + b Fo_m + c Fo_m^2 + d Fo_m^3]$$

Uma análise dos valores numéricos do adimensional de Biot de massa, e das variações nos valores da difusividade efetiva em função da velocidade do ar de secagem, mostrou que as resistências externas têm influência nos processos de secagem.

ABSTRACT

Experimental studies of potato (*Solanum tuberosum*, L. cultivar Bintje) was conducted about the phenomena during the drying process: heat transfer, through thermal conductivity; mass transfer, through desorption isotherms and drying behaviour and taking into account the shrinkage of the sample.

Thermal conductivity was measured by the probe method for moisture content within the range 60 - 90% w/w at temperatures of 20 to 27°C, which showed to be a function of moisture content only and adjusted to $k = \exp(-1.77 + 1.5 U)$ (W/m.K).

Experimental desorption isotherms at temperatures of 35, 45 and 55°C for relative moisture from 0.0427 to 0.6999 were adjusted by the linear BET model.

Experiments for drying were conducted in fixed bed at temperatures of 35, 45 and 55°C and relative moisture from 16 to 43%. Best correlation for drying curves were obtained with diffusional model in terms of a non dimensional moisture concentration. Effective diffusivity lied within 3.0×10^{-10} to 4.9×10^{-10} (m²/s) with activation energy of 14.3 to 20.4 KJ/mol. Data were normalized in terms of non dimensional moisture concentration as function of

heat and mass Biot, Fourier and Kossovich. Best correlation was:

$$(C-C_e)/(C_o-C_e) = [Bi_m / (Bi_q Ko)]^{-0.1} \exp [a + b Fo_m + c Fo_m^2 + d Fo_m^3]$$

Analysing Biot values and increments of effective diffusivity as function of velocity of drying air the conclusion is that external resistance is important

1. INTRODUÇÃO

A batata conhecida também como batata inglesa ou batatinha é um tubérculo da família *Solanum* sendo que a espécie cultivada é *Solanum tuberosum*, L..

Originária da América do Sul tem seu habitat natural na Cordilheira dos Andes e nas Ilhas do Arquipélago Chileno.

No Brasil encontramos a cultura introduzida nos estados da região Centro-Sul, principalmente em São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

A produção brasileira em 1990, foi de 2,08 milhões de toneladas, cultivadas em 151.571 hectares (Instituto de Economia Agrícola, 1991).

Sob o aspecto alimentar a batata é considerada como fonte de carboidratos, sais minerais, vitaminas e segundo dados fornecidos pela FAO é a quarta fonte mundial de alimento sendo apenas ultrapassada pelo arroz, milho e trigo (EMBRAPA - UEPAE, 1978).

O processamento da batata é tão antigo como sua

própria origem. Em certas regiões do Peru, lá pelo ano 200 A.C., já se produzia uma espécie de batata desidratada. O produto era deixado para congelar durante a noite e para descongelar durante o dia. O suco era espremido por meio de pisoteamento, cuja operação era repetida inúmeras vezes até reduzir o conteúdo de umidade à um nível conveniente para armazenagem (VITTI, 1967).

No Brasil a batata é consumida principalmente "in natura".

Entre os vários produtos de batata processada para uso alimentar, os que utilizam a secagem como uma das etapas do processamento são: batata em flocos, flaketes, granulada, em cubos e farinha de batata.

Devido à crescente diversificação de produtos alimentícios processados industrialmente, a determinação das propriedades termo-físicas têm se tornado cada vez mais necessárias.

Nos processos e no projeto de equipamentos que envolvem transferência de calor como secagem, refrigeração e congelamento torna-se de grande importância o conhecimento das propriedades termo-físicas. Em especial, quando se deseja conhecer o tempo de duração de um dado processo, os coeficientes fenomenológicos do material precisam ser conhecidos.

Pretendeu-se estudar o comportamento da

condutividade térmica em função da composição da matéria prima, batata (*Solanum tuberosum*, L.) e aprofundar os conhecimentos fenomenológicos do processo de secagem em leito fixo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Condutividade Térmica

Existem dois métodos que podem ser usados na determinação experimental da condutividade térmica que são classificados genericamente como método do regime permanente e método do regime transiente.

O método do regime permanente necessita de testes de longa duração para estabilizar o fluxo de calor e em consequência isto pode causar alterações na composição original dos alimentos.

O método do regime transiente foi originalmente proposto em 1888 por Schleiermacher, Stallene e Pyk revisaram o método em 1931, conforme QASHOU, NIX, VACHON e LOWERY (1970), mas só foi utilizado para determinação de condutividade térmica de líquidos por van der HELD, HARDEBOL E KALSHOVEN (1953) e finalmente foi aplicado em alimentos por Morley em 1966 apud HOUGH e CALVELO (1978).

O método do regime transiente, que utiliza as

técnicas do fio quente e da sonda, baseia-se no fato de que a taxa de aumento da temperatura, em qualquer ponto de um corpo sólido infinito aquecido por uma fonte de calor linear, depende da difusividade térmica do corpo.

SWEAT, HAUGH e STADELMAN (1973) ressaltam que as técnicas do fio quente e da sonda necessitam de um tempo de medição muito curto, evitando o problema de migração de umidade. Desta forma o método transiente apresenta vantagens para a determinação da condutividade térmica dos materiais biológicos em particular os que possuem altas concentrações de umidade.

Dos pesquisadores que utilizaram a técnica do fio quente em alimentos podemos citar: QASHOU, NIX, VACHON LOWERY (1970) que trabalharam com carne moída; RAO, BARNARD e KENNY (1975) que determinaram a condutividade e difusividade térmica de batata e abóbora enfatizando que além da umidade, a densidade do produto também afeta o valor da condutividade; SHARMA e THOMPSON (1973) determinaram a condutividade térmica de grãos de sorgo para diferentes níveis de umidade e apresentaram um modelo de cálculo em função do conteúdo de umidade.

A técnica da sonda tem sido amplamente utilizada para a determinação experimental da condutividade térmica em alimentos

SWEAT, HAUGH e STADELMAN (1973) determinaram o efeito do tempo de pós-morte e da temperatura no valor da condutividade da carne branca e escura de galinha,

concluindo que o tipo de carne e a temperatura influenciam os valores da mesma.

SWEAT (1974) determinou a condutividade térmica de varias frutas e legumes e concluiu que o conteúdo de umidade é a propriedade que mais afeta o valor da condutividade. A temperatura também pode ser incluída pois tem efeito sobre a condutividade da água. A densidade tem importância apenas para os alimentos muito menos densos que a água. O modelo apresentado para o cálculo da condutividade em função do conteúdo de umidade, $U(\%)$ foi: $k = 0,148 + 0,00493 U$ (W/m.K).

CANEDO, MARSÓN e CARVELO (1975) determinaram a condutividade térmica de carne de vaca encontrando resultados compatíveis com a literatura. Observaram uma variação muito maior entre os valores obtidos de medições efetuadas em pontos distintos numa mesma amostra do que a que existe entre sucessivas determinações em um mesmo ponto, devido a não homogeneidade do material. Observaram também que a resistência térmica de contato não influenciou o valor de condutividade quando se comprimiu a amostra lateralmente.

DAVIDOVICH, BOERI e LUPIN (1978) determinaram a condutividade térmica de merluza para uma faixa de temperatura entre -20° e 30°C obtendo bons resultados para temperaturas acima de 0°C . Entretanto para valores abaixo e próximos à 0°C , a porcentagem de água sem congelar invalida

o conceito de meio sólido aplicado na dedução matemática sugerindo a necessidade de um novo tipo de sonda.

HOUGH e CALVELO (1978) estudaram a validade do método de sonda para a determinação da condutividade térmica em alimentos congelados e concluíram que para assegurar um erro experimental menor que 2% os parâmetros de medição como, potência máxima, tempo mínimo e máximo, devem ser cuidadosamente escolhidos.

PASSOS, FORTES e MELLO (1982) utilizando a técnica da sonda determinaram a condutividade térmica de pasta de mandioca, para duas variedades, e apresentaram um modelo de condutividade em função do conteúdo de umidade, U (%bu):

$$k = 0.1209 + 4.184 \cdot 10^{-9} U \text{ (W/m.K)}.$$

2.2. Umidade de Equilíbrio

A afinidade existente entre a água e os outros componentes de um produto definem a sua higroscopicidade que é muito marcante nos produtos alimentícios e torna-se uma característica fundamental a influenciar os processos de manuseio, processamento, estocagem e consumo de materiais biológicos. LABUZA (1968), NGODDY e BAKKER-ARKEMA (1970), GUSTAFSON e HALL (1974), TEIXEIRA NETO e QUAST (1977).

Quando um material biológico é exposto a uma determinada umidade ele reage no sentido de ajustar sua

própria umidade a uma condição de equilíbrio com o ambiente. Isto ocorre quando a pressão de vapor da água na superfície do material se iguala à pressão de vapor de água do ar que o envolve, TREYBAL (1968).

O nível de umidade que o produto alcança, quando deixado por um longo tempo em contato com uma determinada condição atmosférica, é definido como umidade de equilíbrio, GUSTAFSON e HALL (1974).

LEWIS (1921) introduziu o conceito de umidade de equilíbrio na secagem, relacionado à taxa de secagem com a umidade livre, que é o conteúdo de umidade total menos a umidade de equilíbrio.

O conteúdo de umidade de equilíbrio é importante nos processos de secagem porque ele representa o valor limite para uma dada condição de umidade relativa e temperatura, CHEN (1971).

A quantidade de água que é absorvida ou perdida pelo produto é controlada pela pressão parcial do vapor de água da atmosfera ambiente assim como pela temperatura do produto e outras características físicas do material.

A relação entre pressão parcial do vapor de água do meio e a umidade de equilíbrio é descrita por uma isoterma de sorção, que se obtém quando é construído gráfico de conteúdo de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa do ambiente ao qual o produto é exposto a uma dada temperatura, LABUZA (1968).

Uma isoterma de sorção pode ser obtida em duas direções: a isoterma de adsorção é obtida quando um material completamente seco é colocado em ambientes com diversos incrementos de umidade relativa e são medidos os ganhos de peso do material devido a água; a isoterma de dessorção é obtida quando o material inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições ambientais criadas para adsorção sendo medidas as perdas de peso do material, devido a saída de água.

Uma isoterma de sorção pode apresentar três regiões dependendo da condição da água presente: a primeira região representa a adsorção na monocamada molecular de um filme de água e está entre 0 e 35% de umidade relativa; a segunda região que representa a adsorção nas camadas adicionais acima da monocamada e localiza-se entre 35 e 60% de umidade relativa e a terceira região 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 de umidade de equilíbrio torna-se necessário um ambiente com umidade relativa controlada. O método de controle de umidade mais empregado é o que utiliza compostos químicos, tais como soluções aquosas de ácido sulfúrico e de sais. Cada solução apresenta um grau de ajuste de umidade que pode ser obtido variando-se a sua concentração.

YOUNG (1967) fez uma revisão sobre o controle de umidade usando soluções de sais e mostrou que observadas algumas precauções experimentais tais como: material da câmara não higroscópica, temperatura constante e uma boa área de superfície de contato, podem gerar valores de umidade relativa com um erro de 2%.

GREENSPAN (1977) apresentou uma tabela contendo valores de umidade relativa de equilíbrio de 28 soluções aquosas saturadas de sais binários para intervalos de temperatura de 5°C.

Os métodos experimentais utilizados para a obtenção de curvas de sorção de materiais sólidos foram classificados por GÁL (1975) em:

a - Métodos Gravimétricos - determinação da umidade pelo peso da amostra em equilíbrio com diferentes pressões de vapor.

a.1 - Métodos com registro contínuo da mudança de peso: neste caso a balança é parte integrante do sistema sem necessidade de interromper o processo de sorção para obtenção de peso.

a.2 - Método com registro descontínuo de mudança de peso: a balança não é parte integrante do sistema e a determinação do peso é feita separadamente por métodos apropriados. Esta técnica permite um

exame visual para detectar mudanças físicas na amostra

a.2.1 - Sistema estático: as amostras são colocadas em dessecadores contendo soluções aquosas de sais ou de ácido sulfúrico e deixados até atingir o equilíbrio que é detectado pelo peso constante da amostra.

a.2.2 - Sistema dinâmico: prevê a agitação do ar em contato com as amostras do sistema (que pode ser construído como o sistema estático) diminuindo o tempo para atingir o equilíbrio.

a.3 - Sistema dinâmico: com circulação de ar transfere-se o vapor de água para a amostra (adsorção) e da amostra para o ar (dessorção). A maioria desses equipamentos permitem a programação e o controle da umidade relativa e automação da operação de pesagem.

b. - Métodos Manométrico e Higrométrico: usado em processo de controle de qualidade para determinação rápida da atividade de água (umidade relativa).

- c - Métodos especiais: métodos não convencionais que utilizam membrana de célula de pressão para determinar a atividade de água de materiais com alto conteúdo de umidade.

LABUZA (1968) estudou o efeito da composição de alimentos na forma das isotermas e para alguns casos sugere que a determinação da atividade de água pode ser feita levando-se em consideração o percentual de cada componente, ou seja, a soma de peso percentual de cada componente multiplicado pela quantidade de água que sorveria sozinho.

Para relacionar aspectos de estabilidade na estocagem KUMAR E BALASUBRAMANYAM (1986) utilizaram soluções aquosas de sais a 27°C para determinar a atividade de água de 16 produtos alimentícios divididos em 4 grupos segundo o tipo de constituinte presente em maior percentagem: amido, gordura, proteína e os altamente higroscópicos.

Inúmeros gráficos de isotermas de alimentos e de componentes de alimentos foram apresentados por IGLESIAS e CHIRIFE (1982).

TEIXEIRA NETO E QUAST (1977) utilizando método estático com soluções aquosas de ácido sulfúrico e soluções saturadas de sais determinaram as isotermas de adsorção para 40 alimentos.

IGLÉSIAS, CHIRIFE E BOQUET (1980) estudaram isotermas de sorção de modelos de alimentos com diferentes constituintes conhecendo o comportamento da sorção de cada

constituente em separado. Concluíram que para alguns casos os resultados foram satisfatórios mas para outros a interação entre os principais constituintes reduziram a capacidade de ligação de água.

BRUNAUER, EMMET e TELLER (1938) (BET) baseados no conceito de LANGMUIR (1918) de adsorção na monocamada molecular e considerando a natureza química da umidade propuseram um modelo para descrever a adsorção de multicamadas moleculares.

Baseados no modelo de adsorção nas multicamadas proposto por HALSEY (1948) para adsorção física em superfícies não uniformes, IGLESIAS, CHIRIFE e LOMBARDI (1975) mostraram que este modelo descreve as isotermas de adsorção de uma grande variedade de alimentos.

IGLÉSIAS E CHIRIFE (1976) utilizando o modelo linearizado de BET determinaram o conteúdo de umidade na monocamada de BET baseados nos dados de isotermas de sorção da literatura para vários alimentos e seus componentes. Concluíram que o valor da umidade na monocamada diminui com o aumento da temperatura atribuindo este fato à redução do número de camadas ativas devido à mudanças físicas e químicas induzidas pela temperatura.

YOUNG (1976) avaliou um modelo com três parâmetros desenvolvido por ele para ajustar isotermas de sorção de semente e casca de amendoim, com modelos contendo dois parâmetros: de BET, de Chung-Pfort, de Henderson e de Smith,

Os modelos de Smith e o de Young, apresentaram melhor ajuste.

TOUPIN, Le MAUGER e MCGREGOR (1983) analisaram diferentes métodos estatísticos de obtenção dos parâmetros de BET utilizando dados de isothermas de sorção de batata e concluíram que o método ponderado de regressão não linear, obtido pelo procedimento dos números quadrados, apresentou resultados mais confiáveis devendo-se evitar a regressão linear para estimar os parâmetros.

van den BERG (1984) apresentou um modelo de GAB, Guggenheim-Anderson-de Boer, para padronizar a descrição e comparação de isothermas de alimentos.

SHAR e RUEGG (1985) compararam o modelo de GAB original e o modelo transformado utilizando regressão não linear ao modelo original e regressão polinomial ao modelo transformado concluindo que para estimar os parâmetros do modelo de GAB deve-se utilizar regressão não linear.

MAROULIS, TSAMI, MARINOS-KOURIS e SARAVACOS (1988) fizeram ajuste de isothermas de adsorção de uva-passa, damascos, figos e ameixas secas com o modelo de GAB concluindo que o método de regressão influencia os resultados do modelo e recomendou o uso da regressão não linear para estimar os parâmetros com melhor precisão.

PARK e NOGUEIRA (1990) sugeriram a utilização do modelo de BET, com estimativa de três parâmetros, para o ajuste das isothermas de dessorção de banana.

2.3. Secagem

A palavra secagem é frequentemente usada para descrever processos através dos quais haverá a remoção de água do material. Desde os primórdios o homem utiliza o vento e o sol para secar materiais do seu cotidiano, entretanto, a utilização de secagem artificial para produtos alimentícios e agrícolas tem sido empregado somente nos dois últimos séculos.

A secagem é empregada visando diversas finalidades. Para os produtos agrícolas e alimentícios a secagem é empregada principalmente na preservação permitindo também o transporte e armazenamento sem necessidade de refrigeração. O processo de secagem é também utilizado visando o fator econômico do frete e do manuseio; outras vezes o material é seco para depois sofrer um processo de reidratação a níveis desejáveis. A diversidade das propostas de utilização misturam-se com a diversidade de métodos de secagem, KEEY (1972), DAUDIN (1983).

A secagem de produtos sólidos com ar quente é uma operação unitária muito utilizada nas indústrias de alimentos e agrícolas. O conteúdo de umidade de um sólido pode ser expresso em termos da massa total ou base úmida e de massa seca.

A forma como a água permanece unida ao material restringirá o nível de secagem desse material. Desta forma,

torna-se de grande importância conhecer a relação de equilíbrio entre sólido e água. Além disso a remoção da umidade é limitada por outros fatores como: o encolhimento do material que induz a tensões de secagem; condições drásticas de secagem que podem causar mudanças química e danos biológicos ao material. Existem, portanto, muitas interações sólido-água que devem ser consideradas quando se quer especificar um processo de secagem apropriado.

ALVARENGA, FORTES, P.FILHO e HARA (1980) citam seis mecanismos de transporte de água em sólidos:

- 1 - difusão líquida devido ao gradiente de concentração
- 2 - difusão de vapor devido ao gradiente de pressão parcial de vapor, causado pelo gradiente de temperatura;
- 3 - fluxo de líquido e de vapor, devido a diferenças de pressão externa, contração, capilaridade e alta temperatura;
- 4 - escoamento por efusão, ocorre quando o caminho livre das moléculas de vapor for compatível ao diâmetro dos poros;
- 5 - movimento de líquido devido à força gravitacional;
- 6 - difusão superficial, praticamente desprezível.

KEEY (1975) mostrou quatro fases no movimento da água na secagem de sólidos porosos e admitiu que uma única teoria não pode incluir todos os mecanismos de transporte de água em sólidos.

Conforme PARK (1987), as mais importantes teorias de secagem são aquelas que tentam explicar os fenômenos físicos internos, principalmente para materiais biológicos. O autor apresentou, em rápida explanação, algumas teorias que explicam o comportamento da secagem:

- 1 - teoria difusional, utilizando a 2ª lei de Fick;
- 2 - teoria capilar, utilizando a lei de Darcy;
- 3 - teoria de evaporação-condensação, que considera transferência simultânea de calor e massa;
- 4 - teoria de Luikov com aplicação da termodinâmica irreversível;
- 5 - teoria de Phillip e de Vries, que acopla as transferências de calor e de massa.

Quando o produto é colocado em contato com o ar quente, devido a diferença de temperatura existente entre eles, ocorrerá uma transferência de calor do ar para o produto. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor d'água entre o ar e a superfície do produto ocasionará uma transferência de massa do produto para o ar. Parte do calor que chega ao produto é utilizado para evaporar a água, assim a transferência de massa se faz na forma de vapor d'água, DAUDIN (1983), PERRY (1984).

2.3.1. Encolhimento

As células vivas, de origem animal ou vegetal, exibem um comportamento denominado "turgor", isto é, o líquido presente distende a parede celular e esta por sua vez comprime o líquido contido no seu interior. Durante o processo de secagem, com a retirada da água, diminui a tensão que o líquido exerce sobre a parede celular. Essa diminuição da tensão produzirá o encolhimento do material conforme van ARSDEL, COPLEY e MORGAN (1973).

Investigando o efeito do encolhimento na secagem de vegetais como cenoura, batata, batata doce e rabanete, SUZUKI, KUBOTA, HASEGAWA e HOSAKA (1976) mencionam a equação de KILPATRICK, LOWE e van ARSDEL (1955) os quais mostraram que durante os primeiros estágios de secagem o volume do encolhimento de vegetais e batata em pedaços é igual ao volume de água eliminada por evaporação, mas para os estágios finais o volume de encolhimento é menor que o volume de água removida. Esses mesmos autores apresentaram três modelos cujas formulas relacionam as mudanças na área de superfície e o conteúdo de umidade. O modelo de secagem uniforme supõe que o volume de encolhimento é igual ao volume de água eliminada por evaporação e aplica-se aos primeiros estágios do processo. O modelo de secagem central admite a formação de uma camada seca na superfície do material porém mantendo-se um núcleo com alta concentração

de umidade. Assim, a camada seca se diferencia do núcleo central úmido porém sem existir um limite distinto entre as duas regiões. Admite também que a densidade do núcleo central é a mesma do material inicial e que a densidade da camada seca é aproximadamente a mesma do material quando em equilíbrio no processo de secagem. O terceiro e último modelo apresentado é o de secagem semi-central um modelo intermediário entre os dois modelos citados anteriormente. Esse modelo admite para a camada seca, uma densidade cujo valor situa-se entre densidade inicial do material e a densidade do material seco. Isso porque considera que a umidade na fase gasosa contribui muito pouco, em comparação com a fase líquida, no valor da densidade. Os autores apresentaram também para o cálculo do encolhimento, três equações empíricas que não necessitam dos dados de densidade do material.

Görlling apud CHARM (1963), sugeriu que a taxa de secagem não pode ser constante em certos materiais devido as mudanças que ocorrem na área de superfície em função da retirada de água do material. Mesmo no primeiro período de secagem a taxa de secagem deixa de ser constante devido ao encolhimento.

Do ponto de vista matemático, o encolhimento do material durante o processo de secagem causa mudanças nas condições de contorno utilizadas para a resolução da 2^a lei de Fick, conseqüentemente torna-se de grande importância

quantificar este fenômeno quando se deseja analisar a cinética de secagem como também outros fenômenos de secagem, PARK (1987).

LOZANO, ROTSTEIN e URBISCAIN (1983), num estudo de encolhimento, porosidade e densidade, apresentaram um modelo de encolhimento baseado apenas nos dados de conteúdo de umidade inicial do material.

GABITTO e AGUERRE (1985) analisaram a eficiência de três métodos numéricos para cálculos de secagem com encolhimento supondo a variação de volume como uma função linear do conteúdo de umidade.

A técnica utilizada com frequência, para determinar a variação da área de superfície da amostra, devido ao encolhimento, é através de fotografia. As amostras são fotografadas no interior do secador e as fotografias são ampliadas do mesmo tamanho. A área de superfície pode ser avaliada através de dois procedimentos:

- a - as dimensões das amostras são medidas diretamente da fotografia;
- b - recorta-se a figura da amostra da fotografia e compara-se seu peso com o da figura da amostra original. Entretanto, conforme menciona SUZUKI, KUBOTA, HASEGAWA e HOSAKA (1976), esta técnica permite calcular apenas a área de superfície aparente, pois o erro, ao assumir que

duas dimensões representam três dimensões irregulares, torna-se muito grande.

PARK (1987) utilizando método fotográfico obteve equações de encolhimento para secagem de filé salgado de tubarão. Utilizando o conceito de concentração de água em vez de conteúdo de umidade, na aplicação da 2ª lei de Fick, mostrou que a difusividade efetiva, calculada supondo a não alteração das dimensões originais do material biológico, superestimam o fenômeno de transferência de massa provocando distorção na avaliação da resistência à transferência de massa.

2.3.2. Normalização

2.3.2.1. Normalização através da Taxa de Secagem

Os métodos de cálculo da taxa de secagem diferem segundo o período de taxa constante ou taxa decrescente. Para produtos agrícolas e alimentícios o período de taxa decrescente de secagem é quase sempre o único observado e nesse caso a transferência interna de água é que governa e fixa a taxa de secagem. Porém a complexidade desse fenômeno, conforme constatou DAUDIN (1983) tem levado pesquisadores a proporem equações empíricas através das quais a lei de

secagem possa ser observada diretamente dos dados experimentais.

van MEEL (1957) apud DAUDIN (1983) ao observar que as curvas de taxa de secagem obtidas para várias condições de ar apresentavam uma atividade ortogonal, admitiu que o conteúdo de umidade crítica de um produto era constante e propôs uma transformação nas coordenadas e abcissas para agrupar todas as curvas experimentais de secagem numa só. Assim definiu, pela primeira vez, uma "curva característica de secagem", CCS.

PARK (1987) teceu considerações a respeito de tentativas de normalização de curvas de secagem. Em se tratando de dimensionamento, a umidade crítica limita os dois períodos de taxa constante e taxa decrescente de secagem, portanto a questão reside em interpolar ou extrapolar os dados experimentais. Para o período de taxa constante as considerações termodinâmicas de evaporação de água na linha de saturação de bulbo úmido são suficientes para predizer a taxa, uma vez que se trata da evaporação de água livre. A estimativa da taxa decrescente está vinculada às condições de secagem. Como as equações que expressam taxa constante são efetuadas a partir dos parâmetros das condições de secagem, é conveniente utilizar a relação (taxa decrescente) / (taxa constante), no lugar de taxa decrescente.

Como, para produtos alimentícios, o período de

taxa constante de secagem quase não é observado, portanto, a aplicação do modelo de van MEEL torna-se limitado.

KEEY (1975) sugeriu a utilização de uma taxa pseudo-constante para materiais biológicos na obtenção de taxa adimensional de secagem.

FORNELL, BIMBENET e ALMIN (1980) também usaram um modelo para determinação da curva característica de secagem desses produtos. Esses autores utilizaram uma taxa constante de secagem fictícia e conhecendo as características do ar de secagem adaptaram o modelo de van MEEL e observaram boa superposição das curvas de secagem com cubos de maçã, cenoura, batata e beterraba. Entretanto para milho e alho poró os mesmos autores não encontraram bons resultados.

2.3.2.2. Normalização através da Adimensionalização

Em muitos problemas de engenharia a normalização da equação do fenômeno é feita através da aplicação do conceito de similaridade, MURPHY (1950).

LUIKOV e MIKHAILOV (1965) apresentaram o sistema de equações de transferência simultânea de calor e massa, baseados em conceitos da termodinâmica dos processos irreversíveis. Apresentaram também, um sistema de equações diferenciais obtidas através da introdução de números

adimensionais, resultantes da aplicação dos conceitos de similaridade.

PARK (1990) sugeriu uma correlação de dados experimentais de secagem de materiais biológicos utilizando os grupos adimensionais apresentados por LUIKOV e MIKHAILOV (1965).

3. MATERIAL e MÉTODOS

3.1. Material

3.1.1. Condutividade Térmica

Equipamentos para determinação experimental da condutividade térmica:

- Fonte de tensão estabilizada, marca Tectrol, modelo TC 10-08;
- Multímetro digital, marca Mic, modelo 2200A, precisão $\pm 1\%$ + 1 dígito;
- Indicador de temperatura, marca IOPE, modelo CSE-8, classe 0,2%;
- Termopar cobre-constantan;
- Paquímetro, com precisão de 0,05 mm.

3.1.2. Unidade de Equilíbrio

Equipamentos e vidraria para obtenção das curvas de adsorção.

- Banho maria com controlador de temperatura, marca Fanem, modelo Unitemp, para uma faixa de temperatura de 0° à 200°C;
- Estufa de secagem e esterilização com circulação mecânica marca Fanem, modelo 320-SE, com termostato;
- Balança analítica, marca Mettler, modelo H34, com precisão de 0,0001g e capacidade máxima de 160g;
- Trompa de vácuo;
- Válvulas;
- Sais: Brometo de Sódio;
Cloreto de Magnésio;,
Fluoreto de Potássio;
Hidróxido de Sódio;
Iodeto de Lítio;
Iodeto de Sódio;
Iodeto de Potássio;
Nitrato de Magnésio;
Nitrato de Sódio.

3.1.3. Curvas de Secagem

O conjunto utilizado no experimento consiste de:

- Câmara de secagem construída em madeira com dimensões de 425 x 550 x 330 mm e porta de vidro para melhor visualizar o processo;

- Aparelho condicionador de ar, marca Philco, 5250 kcal/h;
- Regulador de temperatura, marca Engro, precisão $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$;
- Termopar cobre-constantan;
- Quatro resistências com capacidade de 400 watts, 110 volts;
- Disjuntor termo-magnético, marca Sermar, 110-500 volts, 50-60 hz.;
- Termohigrometro, precisão, $\pm 1\%$ umidade relativa e $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ de temperatura;
- Anemômetro, marca Anemotherm, modelo 60, precisão ± 4 pés/min para escala de 0 - 100 e $\pm 5\%$ da leitura para escala de 100 - 8000.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Composição Centesimal da Matéria Prima

As batatas utilizadas eram da cultivar Bintje, com peso unitário entre 300 e 400 gramas obtidas no comércio local.

Uma certa quantidade de amostra "in natura" foi utilizada para determinação do conteúdo de umidade e o restante, do material foi seco em estufa com circulação forçada de ar à 55°C até peso constante. Depois de seco o

material foi moído para em seguida ser submetido às análises de: amido, cinzas, fibras, gordura e proteína.

As análises foram feitas segundo métodos da ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (A.O.A.C.) e AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY (A.O.C.S) Official Method.

3.2.2. Condutividade Térmica da Batata

O esquema do equipamento utilizado é mostrado na Figura 3.1. Consiste de uma fonte de tensão estabilizada, um sistema para medir a corrente, um indicador de temperatura e uma sonda.

As sondas utilizadas na determinação experimental da condutividade térmica foram desenvolvidas no Laboratório de Medidas Físicas da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Unicamp. Constituem-se, segundo a Figura 3.2, de uma agulha hipodérmica no interior da qual foi colocado um termopar de cobre-constantan e um fio de resistência conhecida, ambos isolados. O fio de resistência foi soldado na extremidade operando-se o fechamento do orifício da ponta da agulha.

A junção do termopar localiza-se no ponto médio do comprimento da agulha.

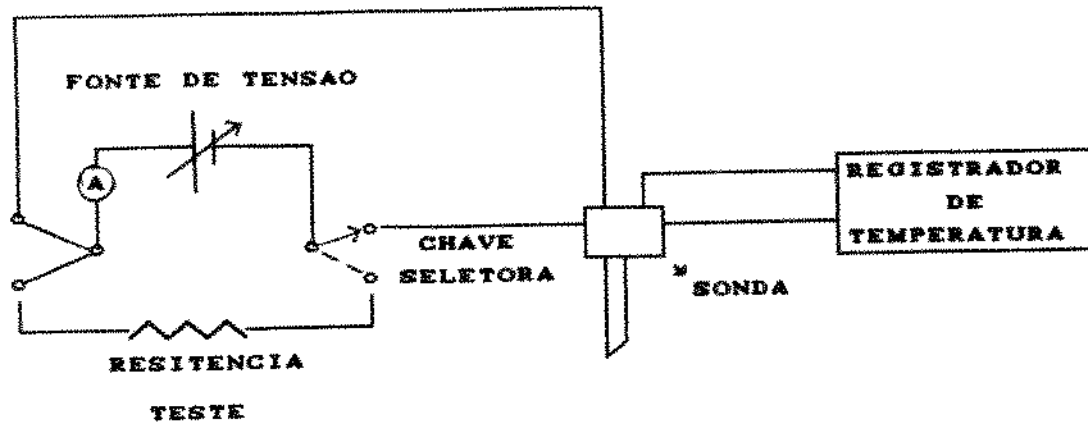


FIGURA 3.1 - Esquema do Sistema de Obtenção de Dados

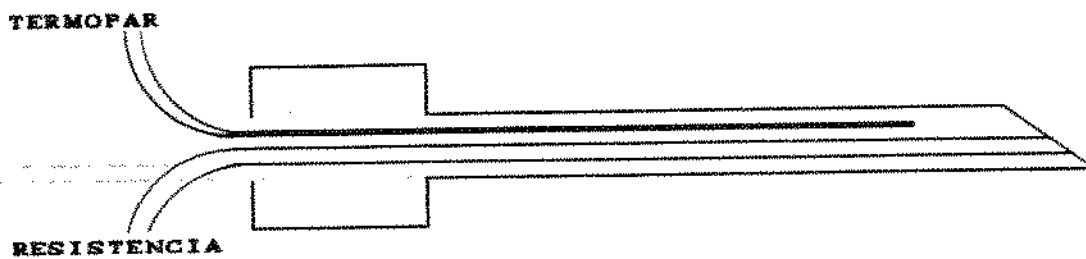


FIGURA 3.2 - Detalhes da Sonda

Para medir a temperatura os fios do termopar foram conectados num indicador de temperatura digital (-30 a 100°C), com ponto frio eletrônico.

Para medir a intensidade da corrente, que passa pela resistência da sonda, foi utilizado um sistema formado por uma resistência teste (fio de resistência idêntica ao da sonda) um multímetro e uma chave seletora. A corrente

elétrica foi selecionada, através da fonte e da resistência teste, para provocar uma perda mínima de umidade da amostra e uma diferença suficientemente grande de temperatura entre o início e o final do teste ($3^{\circ} < \Delta T < 10^{\circ}\text{C}$).

Para amostras úmidas foram utilizadas correntes entre 0,25 e 0,35 amperes e para amostras secas entre 0,13 e 0,17 amperes.

Amostras de forma cilíndrica e retangular, retiradas das batatas foram utilizadas na determinação da condutividade térmica e em seguida no processo de secagem em leito estático.

As amostras cilíndricas apresentaram uma relação comprimento-diâmetro sempre maior que 4.

A sonda foi introduzida no centro de cada amostra e deixada para estabilizar a temperatura. No caso das amostras secas (material seco e moído) foi utilizado um tubo de ensaio cujas dimensões cilíndricas guardavam uma relação $L/D > 4$, dentro do qual foi colocado o pó da amostra seca com a sonda introduzida no centro geométrico do tubo. Foi feita uma compactação cuja técnica se manteve constante para todas as amostras pois os testes preliminares mostraram variações do valor da condutividade em função do nível de compactação da amostra, provavelmente devido a presença de ar entre as partículas.

Uma vez atingida a condição de temperatura estável a chave seletora era acionada fazendo a conexão da

resistência da sonda com a fonte de tensão e a temperatura na sonda foi registrada a cada 10 segundos num período máximo de 2 minutos.

A geração constante de calor na sonda provoca na amostra um aumento de temperatura que é função das difusividade térmica efetiva do material .

3.2.3. Umidade de Equilíbrio

Para obtenção das isotermas de dessorção de batata, através do método gravimétrico estático, foram utilizadas soluções saturadas de diversos sais segundo os dados de GREENSPAN (1976) para temperaturas de 35°, 45° e 55°C.

As soluções saturadas dos sais foram colocadas em dessecadores ou recipientes de fechamento hermético, com uma válvula adaptada na parte superior para uso de bomba de vácuo nos quais foram obtidos ambientes com umidades relativas que variaram de 4,27 à 69,99%.

As amostras de batata em duplicata, na forma de fatias de aproximadamente 2 mm e 5g , foram pesadas e colocadas em cestos de polietileno, previamente tarados. Os cestos foram colocados, sobre suporte, nos recipientes, os quais após feito o vácuo, foram transferidos para banhos (35° e 45°C) e estufa (55°C), com temperaturas controladas.

As amostras permaneceram nesses ambientes até atingirem o equilíbrio, ou seja, até não haver mais variação de massa, detectada através de pesagem numa balança analítica. Foram então levadas á estufa com circulação forçada de ar a 70° e 105°C para determinação da massa seca conforme método apresentado no Apêndice A.

O teor de umidade de equilíbrio foi calculado pela diferença entre a massa que a amostra apresentava no equilíbrio e a massa seca.

3.2.4. Curvas de Secagem

O experimento consistiu basicamente em medir a variação do teor de água da batata numa câmara de secagem em condições controladas para três níveis de temperatura, 35°, 45°, e 55° e dois níveis de velocidade do ar, 0,6 e 0,8 m/s.

A câmara de secagem foi contruida em madeira com porta de vidro para melhor visualizar o processo. Foi instalado um duto que direcionou o ar do condicionador de ar até a entrada da câmara. Quatro resistências foram colocadas no interior do duto para aquecer o ar de secagem, cuja temperatura foi controlada com precisão de 0,5°C, pelo conjunto termopar, díjuntor termo-magnético e controlador de temperatura. Os níveis de velocidade do ar foram mantidos pelo seletor do condicionador de ar. Para melhor unifor-

mizar o fluxo de ar no interior da câmara, foi colocada uma tela na posição horizontal logo acima da entrada do ar. Através de um anemômetro foram feitas medidas de velocidade do ar em 27 pontos distribuídos no interior da câmara.

As amostras destinadas à obtenção das curvas de secagem eram de formato cilíndrico com dimensões que variaram de 91 a 100 mm de comprimento e de 26 a 36 mm de diâmetro e foram obtidas de batatas grandes. A secagem foi feita de forma estática, expondo as amostras longitudinalmente à corrente de ar quente.

O teor de água perdida durante a secagem foi obtido por pesagem descontínua das amostras. O esquema de pesagem seguiu aproximadamente intervalos de tempo de uma hora nas primeiras três horas do processo, seguido por intervalos de 4 horas e no final do processo, intervalos de 8 horas.

Os processos foram conduzidos até que as variações de massa se tornassem insignificantes.

Para o estudo do encolhimento, além das amostras destinadas à obtenção das curvas de secagem, foram avaliadas outras amostras com diferentes níveis de conteúdo de umidade. Para tanto as mesmas foram deixadas na câmara de secagem até atingirem o peso relativo ao nível de conteúdo de umidade desejado e este conteúdo foi estimado a partir dos valores de conteúdo de umidade inicial das amostras.

Para cada condição experimental de temperatura e velocidade do ar de secagem foram analisadas 6 amostras. Uma amostra de formato cilíndrico, para obtenção de dados das curvas de secagem e 5 amostras retangulares, com dimensões que variaram de 70 a 99 mm de comprimento, de 21 à 36 mm de largura e de 18 à 31 mm de espessura, para obtenção de dados de condutividade e encolhimento.

3.2.5. Área de Superfície e Volume das Amostras

O método utilizado para a determinação da área de superfície e volume das amostras foi o de medida direta com paquímetro.

Observando as amostras após a secagem verificou-se um acentuado efeito de encolhimento, principalmente nas amostras secas, pois ocorreram contrações, torções e mudanças nas curvaturas das faces e superfícies das amostras.

As dimensões, comprimento, largura e espessura das amostras retangulares, e comprimento e diâmetro das amostras cilíndricas foram obtidas utilizando a média aritmética de três valores medidos. Apenas para as amostras secas foi utilizado o método de projeção em papel milimetrado das várias faces das amostras obtendo-se as dimensões, também por média aritmética.

3.3. Tratamento Matemático

3.3.1. Condutividade Térmica Efetiva

A equação diferencial geral que trata da distribuição de temperatura num corpo sólido em coordenadas retangulares é :

$$\rho \, c_p \, \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad [1]$$

onde:

ρ - densidade (kg/m³)

c_p - calor específico (J/kg °C)

k - coeficiente de condutividade (W/m.K)

T - temperatura (°C)

t - tempo (s)

Para um corpo cilíndrico infinito com transporte de calor somente na direção radial a equação [1] transforma-se em:

$$\rho \, c_p \, \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad [2]$$

O aumento da temperatura em qualquer ponto de um sólido homogêneo sujeito a uma fonte de calor linear de valor constante, é uma função da posição radial em relação à fonte, do tempo, da intensidade da fonte de calor e das propriedades térmicas do sólido, HOOPER e LEPPER (1950); UNDERWOOD e McTARGGART (1960); NIX, LOWERY, VACHON e TANGER (1967).

A solução da equação [2] de transferência de calor por condução é dada por CARSLAW e JAEGER (1959), HOOPER e LEPPER (1950) como:

$$T = \frac{Q}{2\pi k} \int_{\beta}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad [3]$$

onde:

$$\beta = r/2 \sqrt{\alpha t} \quad - \text{parâmetro adimensional}$$

NIX, LOWERY, VACHON e TANGER (1967), HOOPER e LEPPER (1950) apresentaram uma solução na forma de série, para a integral definida na equação [3]. Para pontos próximos à fonte linear de calor, uma aproximação apropriada dessa série, permite calcular o aumento de temperatura entre os tempos t_1 e t_2 como:

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{2\pi k} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad [4]$$

3.3.1.1. Fontes de Erro

Algumas hipóteses da teoria não podem ser atendidas no arranjo experimental. Por isso essas discrepâncias geram fontes de erros que são inerentes ao método.

A primeira fonte de erro resulta pelo fato da sonda não ser matematicamente uma linha mas ter um raio e comprimento finitos e propriedades térmicas diferentes da amostra. Uma parte desse erro origina-se devido a resistência térmica de contato sonda-amostra não ser desprezível. Esses problemas foram observados por van der HELD e van DRUNEN (1949) que demonstraram serem os causadores de um erro constante no tempo observado no experimento. Assim um fator de tempo de correção, t_0 , é utilizado para corrigir essas diferenças. À partir da equação [4], para o cálculo experimental da condutividade térmica obtem-se:

$$k = \frac{Q}{4\pi (T_2 - T_1)} \ln \left(\frac{t_2 - t_0}{t_1 - t_0} \right) \quad [5]$$

Para o cálculo de t_0 , os autores sugeriram um método através da derivada da equação [5] quando $dt/dT = 0$, $t = t_0$ que é o tempo de correção para o material utilizado. O fator t_0 será sempre constante para uma mesma sonda.

NIX, LOWERY, VACHON, TANGER (1967) apresentaram um método de tentativa e erro onde a adição de t_0 ao tempo observado permitiu que o aumento de temperatura fosse representada por uma linha reta num gráfico de diferenças de temperatura versus $\ln$ do tempo.

UNDERWOOD e Mc TARGGART (1960) também apresentaram um método gráfico de ajuste de uma reta ao longo dos pontos experimentais de forma que um mesmo incremento de tempo seja observado a partir de cada ponto. Neste caso não se obtém o valor de t_0 mas a inclinação da reta.

Outros pesquisadores SWEAT (1974); CANEDO, MARSÓN e CAVELO, (1975); DAVIDOVICH, BOERI e LUPIN (1978) usaram uma constante ao invés do fator tempo de correção. Esta constante pode ser obtida calibrando-se a sonda com um material cujo valor da condutividade seja conhecido, assim como glicerina ou água e agar.

Uma outra fonte de erro baseia-se no fato da amostra não ser infinita na direção radial a partir da sonda. Para assegurar a temperatura superficial constante, o corpo de prova deve ser bem grande para que o campo de temperatura não atinja a extremidade durante o teste e neste caso, seja considerado efetivamente infinito. No entanto, não existe uma fórmula para determinar o tamanho mínimo da amostra para não provocar tal erro. Sabe-se apenas que ele está relacionado à difusividade térmica do material. Normalmente, amostras que apresentam uma relação

comprimento-diametro, maior ou igual a 4 mostram-se ideais. Uma outra forma de contornar este problema é colocar um termopar bem próximo à superfície externa da amostra. Quando a temperatura nesta superfície começar a aumentar, deve-se parar o teste, NIX; LOWERY; VACHON e TANGER (1967).

Uma terceira fonte de erro é devido à distorção no campo cilíndrico de temperatura causada pelo fluxo de calor axial. Isto ocorre porque teoricamente a sonda, fonte linear de calor infinita tem na realidade dimensões finitas.

Uma maneira conveniente e prática de minimizar este erro é fazer com que o comprimento da sonda seja maior ou igual a 100 vezes o seu diâmetro,; HOOPER e LEPPER (1950), UNDERWOOD e McTARGGART (1960).

3.3.2. Umidade de Equilíbrio

Baseando-se na consideração de que no equilíbrio a taxa de condensação sobre uma superfície exposta é igual a taxa de evaporação da camada de água livre, LANGMUIR (1918) mostrou que o conteúdo de umidade de equilíbrio, X_e é:

$$\frac{X_e}{X_M} = \frac{C \cdot X_R}{1 - C \cdot X_R} \quad [6]$$

onde:

X_e - conteúdo de umidade de equilíbrio em base seca

(kg H₂O/kg ms)

X_M - conteúdo de umidade da monocamada molecular

(kg H₂O/kg ms)

XR - umidade relativa (bs)

$$C = \alpha + \exp[(H_1 - H_{Lv}) / R T]$$

α - coeficiente de primeira ordem

H_1 - calor de sorção da primeira camada (J/kg)

H_{Lv} - calor de liquefação (J/kg)

R - constante universal dos gases (J/g-mol.K)

T - temperatura (K)

BRUNAUER, EMMETT E TELLER (1938) estendendo o conceito de Langmuir para multicamadas moleculares apresentaram a equação:

$$\frac{X_e}{X_M} = \frac{CB \cdot XR}{1 - XR} \left[\frac{1 - (n + 1) XR^n + n \cdot XR^{n+1}}{1 - (CB - 1) XR - CB \cdot XR^{n+1}} \right] \quad [7]$$

onde:

n - número de camadas moleculares

CB - constante de BET

A definição de CB é a mesma apresentada anteriormente porém α contém fatores para diferir as taxas de condensação/evaporação para a segunda camada e para as camadas sucessivas. Assim como Hlv é o calor de sorção para essas camadas.

Quando o número de camadas moleculares, n for igual a unidade ($n = 1$) a equação [7] fica reduzida a equação de Langmuir.

Quando n torna-se um número infinito a equação [7] fica reduzida à :

$$\frac{X_e}{X_M} = \frac{CB \quad XR}{(1 - XR) (1 - XR + CB \quad XR)} \quad [8]$$

Este modelo que fornece a equação linearizada de BET, apresenta apenas dois parâmetros de ajuste, CB e XM.

Rounsley (1961) apud KEEY (1972) apresentou uma idéia, extensiva à equação de BET, de que cada camada é estruturada de forma ordenada e que a isoterma para a distribuição de moléculas entre camadas é:

$$\frac{X_e}{X_M} = \frac{CB \quad XR}{1 + (CB - 1) \quad XR} \left[\frac{1 - XR^n}{1 - XR} \right] \quad [9]$$

Uma outra extensão do modelo de BET é apresentada pelo modelo de GAB, introduzido por van der BERG (1984), e que inclui mais um parâmetro CP conhecido como fator de correção de propriedades das multicamadas moleculares transformando a equação em:

$$\frac{X_E}{X_M} = \frac{C_G \quad C_P \quad X_R}{(1 - C_P X_R) (1 - C_P X_R + C_G C_P X_R)} \quad [10]$$

onde:

C_G - constante de Guggenheim

$C_G = a \exp [(H_{LV} - H_2)/R T]$

C_P - fator de correção de propriedades das multicamadas

$C_P = b \exp [(H_{LV} - H_2)/R T]$

H_2 - calor de sorção das multicamadas

b - coeficiente de 1^a ordem

O modelo de GAB apresenta três parâmetros, X_M , C_G e C_P para ajuste das isotermas e pode ser apresentado na forma de um polímero de 2^o grau.

Conforme PARK e NOGUEIRA (1990) a equação de BET original apresenta três parâmetros de ajuste que são X_M , C_B e n . Este modelo é uma equação polinomial de grau maior que

dois, dependendo do valor de n estimado, e apresenta maior possibilidade de ajuste dos dados experimentais.

3.3.3. Curva de Secagem

3.3.3.1. Encolhimento

SUZUKI, KUBOTA, HASEGAWA e HOSAKA (1976) investigando a equação de Kilpatrick, sobre encolhimento de vegetais durante os primeiros períodos de secagem, apresentada como:

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{X + 0,8}{X_0 + 0,8} \right)^{2/3} \quad [11]$$

onde:

A_0 - área de superfície inicial da amostra (m^2)

A - área de superfície final da amostra (m^2)

formularam três modelos que relacionam o encolhimento e mudança na área de superfície com o conteúdo de umidade. Partindo do princípio de que a área de superfície é proporcional ao volume elevado a potência de dois terços, a razão da área pode ser expressa como:

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{V_F}{V_0} \right)^{2/3} \quad [12]$$

Esses três modelos são apresentados como:

- modelo de secagem uniforme:

$$\frac{A}{A_0} = (b X + c)^{2/3} \quad [13]$$

onde:

$$b = \rho_0 / (X_0 + 1)$$

$$c = 1 + b - \rho_0$$

ρ_0 - densidade inicial da amostra (kg/m^3)

- modelo de secagem central:

$$\frac{A}{A_0} = (k_e X + 1)^{2/3} \quad [14]$$

onde:

$$k_e = (1 - d) / (X_0 - X_e)$$

$$1 = (dX_0 - X_e) / (X_0 - X_e)$$

$$d = (X_0 + 1) \rho_0 / [(X_0 + 1) \rho_e]$$

- modelo de secagem semi-central:

$$\frac{A}{A_0} = (mX + n)^{2/3} \quad [15]$$

onde:

$$m = (1 - d) / [(X_0 - X_e) - u]$$

$$n = [(d X_0 - X_e) - u] / [(X_0 - X_e) - u]$$

$$u = x (d X_0 - X_e + d - 1)$$

sendo $0 \leq x \leq 1$ uma variável aritmética.

Os mesmos autores sugerem três equações empíricas, convenientes para os casos em que os dados densidade do material não sejam disponíveis:

$$\frac{A}{A_0} = \left[\gamma \frac{X}{X_0} - \gamma + 1 \right]^{2/3} \quad [16]$$

$$\frac{A}{A_0} = \left[\delta \frac{(X + 1)}{(X_0 + 1)} - \delta + 1 \right]^{2/3} \quad [17]$$

$$\frac{A}{A_0} = \varphi \left(\frac{X}{X_0} \right)^{\varphi} - \varphi + 1 \quad [18]$$

3.3.3.2. Modelo Difusional

Para descrever a migração de água no material, pode ser utilizado o modelo de difusão expresso pela 2ª lei de Fick, LEWIS (1921), SHERWOOD (1929a,b).

Conforme DAUDIN (1983), a solução da equação de difusão é uma das mais simples e portanto muito usada para interpretar os processos de secagem de produtos agrícolas e alimentos.

SKELLAND (1974) e CRANK (1975) apresentaram a equação de difusão para um cilindro suficientemente longo, no interior do qual a difusão ocorre só no sentido radial. Neste caso a concentração de umidade será função apenas do raio, r , e do tempo, t , como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right] \quad [18]$$

que sujeita às condições inicial e de contorno:

$$C(r, 0) = C_0$$

$$C(r, t) = C_e$$

$$\frac{\partial C}{\partial r} = 0 \quad (\text{simetria})$$

fornece a média espacial da solução da equação de difusão que é:

$$\frac{C - C_o}{C_o - C_e} = \frac{4}{r^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-D b_n^2 t) \quad [20]$$

Nos processos de secagem, as concentrações podem ser convertidas em conteúdo de umidade por unidade de massa seca. Considerando o encolhimento desprezível a equação [20] fica:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{4}{r_*^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b_n^2} \exp(-D b_n^2 t) \quad [21]$$

onde:

X - conteúdo de umidade (kg H₂O/kg ms)

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

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

r_* - raio características do cilindro (m)

t - tempo (s)

D - difusividade efetiva (m²/s)

b_n - raízes de $J_0(b_n a) = 0$

Para a obtenção da equação [21] admite-se que:

- o material é homogêneo, e isotópico;
- o raio do cilindro permanece inalterado ao longo do tempo;
- a superfície do cilindro entra imediatamente em equilíbrio com o ar de secagem;
- o teor de umidade de equilíbrio X_e , é obtido a partir de uma curva de sorção do produto;
- o coeficiente de difusão é constante e representa a difusividade efetiva, que engloba os efeitos dos fenômenos de transferência de calor e de massa.

Segundo PERRY (1984) para longos períodos de secagem a equação [21] fica limitada a função de Bessel para apenas um termo da série, o que significa obter:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{4}{r_*^2 b_1^2} \exp(-D b_1^2 t) \quad [22]$$

No gráfico $\ln [(X - X_e) / (X_o - X_e)]$ em função do tempo, esta equação torna-se uma reta, SHERWOOD (1929 a, b), LEWIS (1921) e PERRY (1984).

3.3.3.3. Modelo Difusional Com Encolhimento

Conforme sugeriu PARK (1987) a determinação do coeficiente de difusão, considerando a existência do encolhimento do material, pode ser feita substituindo o termo do adimensional de conteúdo de umidade pelo adimensional de concentração de umidade como:

$$\frac{C - C_o}{C_o - C_e} = \frac{4}{r_*^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b_n^2} \exp(-D b_n^2 t) \quad [23]$$

onde:

C - conteúdo de umidade em base seca por volume

$C = X/Vol$ (kg H₂O/kg ms.m³)

C_e - conteúdo de umidade de equilíbrio em base seca por volume

C_o - conteúdo de umidade inicial em base seca por volume

Segundo PARK (1987) os melhores resultados são obtidos quando se utiliza a dimensão característica média que no presente caso seria o raio médio $\bar{r}$, das amostras de batata.

3.3.3.4. Modelo Empírico de Cinética de Secagem - equação de Sazhin

STRUMILLO e KUDRA (1986) apresentaram um método de cálculo de tempo de secagem baseados na equação de Sazhin. Este método é válido para descrever o processo de secagem nos períodos de taxa constante e taxa decrescente e está baseado na equação geral de transferência de massa escrita para processo de secagem na forma de:

$$\frac{dX}{dt} = K_s (X_o - X) (X - X_e) \quad [24]$$

onde:

K_s - coeficiente de taxa de secagem

Integrando esta equação obtém-se:

$$t = \frac{1}{K_s (X_o - X_e)} \ln \left[\frac{(X_o - X) (X_{1e} - X_e)}{(X_o - X_{1e}) (X - X_e)} \right] \quad [25]$$

Como o coeficiente K_s inclui os parâmetros estruturais, como propriedades térmicas e termodinâmicas do material, não é necessário conhecer a migração de umidade através do mesmo.

O conteúdo X_i corresponde ao conteúdo de umidade crítica X_{cr} que separa os dois períodos de secagem: taxa constante e taxa decrescente.

Este modelo empírico baseado na equação [25] permite estimar o ponto de inflexão das curvas de secagem, denominado X_{cr} , umidade crítica.

3.3.4. Taxa de Secagem

3.3.4.1. Modelo Difusional

Por diferenciação da equação [21], usando raio médio de cada amostra e considerando 5 termos da série, chegou-se a equação para calcular a taxa de secagem para o período decrescente que é:

$$\frac{dX}{dt} = \left(-4D/r_*^2 \right) (X_0 - X_e) \sum_{n=1}^5 \exp \left(-D b_n^2 t \right) \quad [26]$$

3.3.4.2. Modelo Empírico

Baseado no princípio da transferência de massa generalizada, para este modelo foi utilizada a equação [24]

cujos valores dos coeficientes K_s foram os estimados pela equação [25] .

3.3.4.3. Regressão Linear

Para o caso do gráfico de $\ln [(X - X_e)/(X_o - X_e)]$ em função do tempo resultar numa reta, os dados experimentais podem ser ajustados por regressão linear e a taxa de secagem pode ser obtida pela diferenciação dessa equação linear, resultando em:

$$\frac{dX}{dt} = B (X_o - X_e) e^{(A + Bt)} \quad [27]$$

onde:

A - coeficiente linear da regressão

B - coeficiente angular da regressão

3.3.5. Normalização

3.3.5.1. Normalização Através da Taxa de Secagem

Para um processo adiabático, a taxa de secagem do período de taxa constante depende das condições do ar e da magnitude do coeficiente de transferência de calor e segundo LONCIN (1976) pode ser calculado pela equação:

$$\frac{dX}{dt} = A \frac{h}{HL_v} (T - T_{bu}) \quad [28]$$

onde:

dX/dt - taxa de secagem (kg/s)

HL_v - calor latente de evaporação (W.s/Kg)

A - área de superfície do sólido (m^2)

h - coeficiente de transferência de calor ($W/m^2.K$)

T - temperatura do ar ($^{\circ}C$)

T_{bu} - temperatura de bulbo úmido ($^{\circ}C$)

van Meel (1957) apud PARK (1987), observou que dividindo a taxa de secagem (dX/dt) pela taxa de secagem do período de taxa constante (dX/dt)_c obtinha uma função única do adimensional de concentração (curva característica de secagem, CCS). Assim:

$$\frac{(dX/dt)}{(dX/dt)_c} = f(\Delta X) \quad [29]$$

onde:

$$\Delta X = (X - X_e) / (X_{cr} - X_e)$$

Como $(dX / dt)_c$ depende das condições do ar de secagem pode ser calculado pela equação [28]. Com auxílio da equação [29] obtém-se:

$$\frac{dX}{dt} = A \frac{h}{HL_v} (T - T_{bu}) f(\Delta x) \quad [30]$$

A equação [30] apresenta uso limitados para os produtos agrícolas e alimentícios que na sua maioria não possuem o período de taxa constante de secagem.

FORNELL, BIMBENET e ALMIN (1980) propuzeram para obter a CCS desses produtos, o cálculo de uma taxa fictícia de secagem, no período de taxa constante, conforme a equação [28] com ΔH_{Lv} constante durante este período.

LONCIN (1976) estudando a relação h / H_{Lv} em função da velocidade do ar, demonstrou que h é proporcional à raiz quadrada da velocidade. Nessas condições FORNELL, BIMBENET e ALMIN (1980) apresentaram um modelo para obter a CCS de materiais biológicos:

$$\frac{dX / dt}{(T - T_{\infty}) \sqrt{0.5}} = K f(\Delta X) \quad [31]$$

onde:

K - constante

Este modelo foi utilizado na tentativa de obter uma CCS para cilindros de batata.

3.3.5.2. Normalização Através da Adimensionalização

Conforme sugere PARK (1990):

$$\frac{C - C_o}{C_o - C_e} = a (Fo_m)^b (Bi_q)^c (Bi_m)^d (Ko)^e \quad [32]$$

onde:

Fo_m - número de Fourier de massa

Bi_q - número de Biot de calor

Bi_m - número de Biot de massa

Ko - número de Kossovich

Para o cálculo dos adimensionais tem-se:

$$Fo_m = \frac{D t}{\bar{r}^2} \quad [33]$$

onde:

D - difusividade de transferência de massa (m^2/s)

t - tempo (s)

$\bar{r}$ - raio médio do cilindro (m)

$$Ko = \left(\frac{HLv}{c_{pms}} \right) \left(\frac{X_o - X_e}{T_a - T_{bu}} \right) \quad [34]$$

onde:

HLV - calor latente de vapor de água (J/kg)

c_{pms} - calor específico da massa seca (J/ kg ms.K)

X_o - conteúdo de umidade inicial (kg H_2O /kg ms)

X_e - conteúdo de umidade de equilíbrio (kg H_2O /kg ms)

T_a - temperatura do ar de secagem ($^{\circ}C$)

T_{bu} - temperatura de bulbo úmido ($^{\circ}C$)

$$Bi_q = \frac{h \bar{r}}{k} \quad [35]$$

onde:

h - coeficiente de transferência de calor ($W/m^2.K$)

k - condutividade térmica ($W/m.K$)

O coeficiente de transferência de calor h , foi avaliado conforme McADAMS (1954) para ar sobre superfície cilíndrica como:

$$h = 0,18 (\Delta T)^{1/3} \longrightarrow 10^9 < (N_{Gr} N_{Pr}) < 10^{12} \quad [36]$$

$$h = 0,27 \left(\frac{\Delta T}{\varnothing} \right)^{0,25} \longrightarrow 10^3 < (N_{Gr} N_{Pr}) < 10^9 \quad [37]$$

sendo que:

$$\Delta T = T_a - T_{bu} (^{\circ}C)$$

$\varnothing$ - diâmetro da amostra (m)

N_{Gr} - número de Grashof

N_{Pr} - número de Prandtl

T_a - temperatura do ar ($^{\circ}C$)

T_{bu} - temperatura de bulbo úmido ($^{\circ}C$)

$$Bi_m = \frac{k_m \bar{r}}{D} \quad [38]$$

onde:

k_m - coeficiente de convectivo de transferência de massa (m/s)

Para o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de massa, k_m , PARK (1990) citou duas fontes a saber:

- a obtenção do coeficiente é feita utilizando as equações sugeridas por KRISCHER e KRÖLL (1976);
- o cálculo do coeficiente utilizando a taxa de evaporação de água de superfície livre apresentado por POWELL (1940).

A taxa de evaporação de superfícies cilíndricas pode ser obtida por:

$$\frac{e_d}{p_w - p_a} = 1,72 \cdot 10^{-7} (C \theta V)^{0,6} \quad [39]$$

para $40 < (C \theta V) < 200$

onde:

- e_d - taxa de evaporação (g H_2O /g ms.s)
 p_w - pressão de vapor de saturação (mm Hg)
 p_a - pressão de vapor de ar (mm Hg)
 $\emptyset$ - diâmetro do cilindro (cm)
 V - velocidade do ar (cm/s)

Considerando o gradiente de concentração:

$$gc = (C_w - C_e) \quad ms \quad [40]$$

onde:

- C_w - concentração calculada com o conteúdo de umidade com
 $XR = 100\%$ (g H_2O /g ms)
 C_e - concentração calculada com o conteúdo de umidade
 de equilíbrio (g H_2O /g ms)
 vol - volume do cilindro (cm³)
 ms - massa seca (g ms)

então:

$$e = \frac{ed}{\emptyset} = km \quad gc \quad [41]$$

$$km = \frac{e}{gc} \quad [42]$$

portanto, o coeficiente convectivo médio, $\bar{k}_m$ é:

$$\bar{k}_m = \frac{e}{(C_v - C_e) m s} \quad [43]$$

As mesmas considerações, da equação [32] a [43], podem ser feitas para o adimensional de conteúdo de umidade, isto é:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = a_1 (Fo)_m^{b_1} (Bi)_q^{c_1} (Bi)_m^{d_1} (ko)^{e_1} \quad [44]$$

sendo que neste caso o raio do cilindro considerado é o raio inicial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Composição Centesimal

Todas as análises foram feitas em triplicata e os resultados são mostrados no Anexo A. As variações destas composições são mostradas na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - Variação da composição centesimal da batata (*Solanum tuberosum*, L.) cultivar Bintje "in natura"

COMPOSIÇÃO	% (b. u.)
Umidade	76,5 à 82,6
Amido	11,3 à 15,9
Proteína	1,4 à 2,9
Cinzas	0,6 à 1,0
Fibras	0,3 à 0,8
Açúcar	0,8 à 4,1
Gordura	0,01 à 0,10

Comparando os dados encontrados na literatura, verifica-se que apenas a variação da porcentagem de açúcar, das amostras analisadas, mostra-se mais elevada, cujos valores da literatura variam de 0,3 à 1,1.

4.2. Condutividade Térmica da Batata

Dos dados de temperatura e tempo foram construídos gráficos de ΔT versus $\ln t$ e observou-se que a maioria dos testes mostrou uma linearidade no intervalo de 30 e 120 segundos. Através do método de regressão linear, usando o procedimento General Linear Models, GLM, do pacote estatístico do STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, SAS, foram selecionados os testes cujos coeficientes de correlação estavam entre 0,99 e 0,999. A partir da equação [4] a condutividade da amostra foi calculada por:

$$k = 2,303 Q / 4 \pi b$$

onde b é a inclinação da curva ΔT versus $\ln t$.

A sonda foi calibrada medindo-se a condutividade térmica da água. E para evitar o efeito do movimento da mesma (convecção natural) foi adicionado 2% de agar para obter um gel estável.

Para avaliar a influência da composição da batata

sobre a condutividade térmica, os dados de composição centesimal de cada amostra foram correlacionados através de regressão linear, do procedimento GLM do SAS.

Na análise estatística a condutividade foi utilizada como uma variável dependente e a composição (umidade, amido, açúcares, proteína, gordura, cinzas, fibras), temperatura e densidade, como variáveis independentes.

A primeira análise mostrou um grau de liberdade muito baixo, $Pr > F$ igual 0,0053, para a variável umidade, indicando assim uma dependência de k apenas com a umidade.

O gráfico que relaciona o resíduo, versus o valor estimado, mostra uma tendência típica de função logarítmica. Repetiu-se então o procedimento introduzindo $\ln k$ como variável dependente do conteúdo de umidade.

O resultado pode ser expresso com a equação:

$$k = \exp [- 1,77 + 1,13 U] \quad (\text{W/m.K})$$

O conteúdo de umidade da batata, U é em base úmida e o erro estimado em 11%.

Esta equação é válida para conteúdos de umidade entre 60 e 90% (bu) e para temperaturas na faixa de 20 a 27°C.

Num estudo mais completo poder-se-ia acrescentar a temperatura à esta equação, mas para isso torna-se necessário realizar experimentos numa faixa mais ampla de temperatura.

Para uma variação de 5 segundos no tempo, isto é, uma diferença de 5 segundos entre acionar o cronômetro e o início do teste, gera uma alteração no valor da inclinação da curva, ΔT versus $\ln t$, que provoca no cálculo da condutividade térmica um erro relativo máximo de 8%. Isto indica uma baixa precisão na obtenção dos dados, sem levar em consideração os erros do medidor de corrente e de temperatura.

Indiscutivelmente esta metodologia experimental necessita de uma aquisição de dados totalmente automatizada.

4.3. Umidade Relativa

Os registros obtidos pelo termohigrômetro mostraram uma variação da umidade relativa média do ar de secagem, $\overline{XR}$, em função da velocidade para uma mesma temperatura.

Os dados são apresentados na Tabela 4.2 .

Como a umidade relativa é uma propriedade do ar que não varia com a velocidade, as variações registradas durante os experimentos devem-se às variações ambientais. A câmara não foi projetada com um controlador de XR, e assim as variações ambientais afetaram as condições do ar de secagem no interior da mesma.

TABELA 4.2 - Umidade Relativa Média do ar de secagem em função da velocidade e da temperatura.

TEMP (°C)	V (m/s)	$\bar{X}_R$ (%)
35	0,6	33
	0,8	43
45	0,6	32
	0,8	28
55	0,6	16
	0,8	17

4.4. Umidade de Equilíbrio

Os resultados experimentais do conteúdo de umidade de equilíbrio (X_e) para batata são mostrados na Tabela 4.3.

Segundo a indicação de PARK e NOGUEIRA (1990), numa primeira tentativa, as isotermas de dessorção foram ajustadas pelo modelo original de BET para multicamadas moleculares. Os valores dos parâmetros XM e CB, estimados para alguns valores de número de camadas n , são mostrados nas Tabelas 4.4 e 4.5. Destas tabelas pode-se verificar uma diminuição constantes dos valores de desvio padrão assintótico (DPA) indicando se tratar de um caso especial da equação de BET quando n tende à infinito.

TABELA 4.3 - Valores experimentais de umidade de equilíbrio
(Xe) para dessorção de água em batata

TEMPERATURA (°C)					
35		45		55	
Xe (g/dms)	XR	Xe (g/gms)	XR	Xe (g/gms)	XR
0,0580	0,0692	0,0492	0,0560	0,0371	0,0427
-	-	-	-	0,0442	0,1103
0,0850	0,2459	-	-	0,0681	0,2993
0,0922	0,3205	0,0838	0,3110	-	-
0,0970	0,3473	-	-	-	-
-	-	0,1116	0,4693	0,1200	0,5015
0,1460	0,5455	0,1280	0,5115	0,1571	0,6378
0,2040	0,6696	0,1766	0,6526	0,1812	0,6815
-	-	0,2060	0,6999	-	-

Portanto os ajustes das isotermas de dessorção foram efetuados pelo modelo linearizado de BET, segundo a equação [8]. As constantes estimadas, a e b pelo método de regressão linear, que utilizou o procedimento GLM do SAS, são apresentados na Tabela 4.6. A partir desses valores, foram calculados os parâmetros da equação de BET, X_M e CB , que são apresentados na Tabela 4.7.

TABELA 4.4 - Parâmetros estimados pelo modelo de BET por regressão não linear com dados das isotermas de dessorção de batata par n entre 1 e 10

T (°C)	n = 1		n = 5		n = 10	
	XM (DPA) *	CB (DPA) *	XM (DPA) *	CB (DPA) *	XM (DPA) *	CB (DPA) *
35°	1,4971 (3,4558)	0,2194(0,5639)	0,0860(0,0000)	9,9373(6,4340)	0,0703(0,0017)	35,0342(13,5618)
45°	5,0544(240,5223)	0,0393(1,9141)	0,0893(0,0116)	4,9778(4,0534)	0,0658(0,0016)	32,5935(14,4826)
55°	10,4487(214,7102)	0,0246(0,5129)	0,0802(0,0046)	6,6163(3,5846)	0,0621(0,0020)	18,1322 (6,6270)

* DPA - desvio padrao assintotico

TABELA 4.5 - Parâmetros estimados pelo modelo de BET por regressão não linear com dados das isotermas de dessorção de batata par n entre 15 e 25

T (°C)	n = 15		n = 20		n = 25	
	XM (DPA) *	CB (DPA) *	XM (DPA) *	CB (DPA) *	XM (DPA) *	CB (DPA) *
35°	0,0679(0,0000)	46,1721(10,7541)	0,0675(0,0007)	48,8687(9,7939)	0,0674(0,0006)	49,3734(9,6271)
45°	0,0629(0,0007)	43,4787(10,5127)	0,0623(0,0006)	46,5511(9,7325)	0,0622(0,0005)	47,2377(9,7002)
55°	0,0594(0,0017)	22,1385(7,7665)	0,0588(0,0016)	23,0332(8,1556)	0,0588(0,0016)	23,2026(8,2366)

* DPA - desvio padrao assintotico

TABELA 4.6 - Constantes estimadas pela regressão linear com dados das isotermas de dessorção para batata numa faixa de atividade de água entre 0,0427 e 0,6999.

TEMP (°C)	Constantes - (DP)*		
	a	b	rc*
35	0,3680 (0,0959)	14,4070 (0,2310)	0,9990
45	0,4210 (0,0970)	15,7002 (0,1943)	0,9994
55	0,8845 (0,3369)	16,0072 (0,7451)	0,9914

* DP - desvio padrão

rc - coeficiente de correlação

TABELA 4.7 - Parâmetros calculados pela equação linearizada de BET para batata numa faixa de atividade de água de 0,0427 e 0,6999.

TEMP (°C)	Parâmetros de BET	
	XM	CB
35	0,0677	40,1495
45	0,0620	38,2926
55	0,5920	19,0975

Para a equação de GAB o método de regressão não linear estimou os parâmetros que são mostrados na Tabela 4.8. Os valores de desvio padrão assintótico e do coeficiente de correlação mostram um fraco ajuste através desta equação, o que é de se esperar uma vez obtido ajuste com o modelo linearizado de BET.

As Figuras B.1, B.2 e B.3, do Anexo B, mostram o resultado da aplicação do modelo de BET linearizado para os dados experimentais das curvas de dessorção para 35°, 45° e 55° respectivamente.

TABELA 4.8 - Parâmetros estimados por regressão não linear do modelo de GAB para batata (*Solanum tuberosum*, L.) numa faixa de atividade de água entre 0,0427 e 0,6999.

TEMP (°C)	Parâmetros de GAB (DPA)		
	XM	CG	CP
35	0,1021(0,4348)	2,7947(61,2907)	0,9034(8,9234)
45	33,7247(109,2509)	-0,0211(3,4149)	-42,1734(5462,7855)
55	11,2861(38,4531)	-0,0349(3,0088)	-31,7765(2656,4190)

Assim, para obter os valores de umidade de equilíbrio nas condições específicas dos testes experimentais de secagem de batata, foi utilizado a equação linearizada de BET. Esses valores são mostrados na Tabela 4.9.

TABELA 4.9 - Valores de umidade de equilíbrio (X_e) de batata para temperaturas do ar de 35,45 e 55°C e velocidade de 0,6 e 0,8 m/s

TEMP (°C)	V (m/s)	$\overline{XR}$	X_e (g/g ms)
35	0,6	0,33	0,0908
	0,8	0,43	0,1078
45	0,6	0,32	0,0814
	0,8	0,28	0,0762
55	0,6	0,17	0,0520
	0,8	0,16	0,0507

4.5. Encolhimento

Os dados experimentais das área de superfície inicial, A_o , área de superfície final, A , volume inicial, V_o , volume final, V_f , umidade inicial, X_o , e final, X , das

amostras são encontradas nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 para as temperaturas de secagem de 35, 45 e 55°C respectivamente.

TABELA 4.10 - Valores experimentais da área de superfície, volume e conteúdo de umidade inicial e final das amostras de batata, ar de secagem à 35°C.

V = 0,6(m/s)						
amostra	X ₀ (g/ms)	A ₀ (cm ²)	V ₀ (cm ³)	X (g/gms)	A (cm ²)	V _F (cm ³)
34	3,455	98,6	77,5	0,0908	3,36	11,7
36	4,2540	103,5	54,3	2,7386	63,50	24,5
37	3,3409	100,7	48,2	2,8413	58,90	19,4
V = 0,8(m/s)						
amostra	X ₀ (g/ms)	A ₀ (cm ²)	V ₀ (cm ³)	X (g/gms)	A (cm ²)	V _F (cm ³)
2	4,4925	114,6	71,9	1,5287	65,00	28,9
5	4,3848	111,0	65,3	2,2446	67,80	29,6
6	4,7172	92,2	48,0	4,0939	53,50	19,7
7	4,4250	86,5	65,1	0,1078	3,47	13,6

TABELA 4.11 - Valores experimentais da área de superfície, volume e conteúdo de umidade inicial e final das amostras de batata, ar de secagem à 45°C.

V = 0,6(m/s)						
amostra	X ₀ (g/ms)	A ₀ (cm ²)	V ₀ (cm ³)	X (g/gms)	A (cm ²)	V _F (cm ³)
17	4,5825	117,9	69,7	3,2899	73,10	32,1
20	4,0749	98,8	78,5	0,0814	3,34	11,7
21	4,0820	117,6	70,3	3,7175	66,60	28,0
V = 0,6(m/s)						
amostra	X ₀ (g/ms)	A ₀ (cm ²)	V (cm ³)	X (g/gms)	A (cm ²)	V _F (cm ³)
9	4,5432	137,3	88,0	2,4233	76,40	33,9
12	3,8144	127,9	83,5	3,4573	79,80	39,7
13	4,3852	122,1	75,9	3,9801	76,90	36,5
14	3,5939	97,1	77,8	0,0762	3,53	13,1
15	4,2466	122,2	78,2	2,1534	75,10	36,4

TABELA 4.12 - Valores experimentais da área de superfície, volume e conteúdo de umidade inicial e final das amostras de batata, ar de secagem à 55°C.

V = 0,6(m/s)						
amostra	X ₀ (g/ms)	A ₀ (cm ²)	V ₀ (cm ³)	X (g/gms)	A (cm ²)	V _F (cm ³)
22	4,2971	80,7	129,7	2,5004	79,8	36,6
25	3,6207	70,2	89,9	0,0507	2,77	8,6
26	4,7637	46,4	97,0	3,8327	57,3	21,2
27	4,1970	48,8	97,0	3,1491	64,6	25,0
V = 0,8(m/s)						
amostra	X ₀ (g/ms)	A ₀ (cm ²)	V ₀ (cm ³)	X (g/gms)	A (cm ²)	V _F (cm ³)
29	4,0328	125,8	77,5	2,4022	80,80	37,7
31	4,2637	96,4	51,3	3,8628	64,00	26,5
33	3,9081	94,8	78,2	0,0520	2,75	8,5

A partir dos dados experimentais foram calculadas as relações das áreas (A/A₀) segundo os modelos de: Kilpatrick ,equação [11], secagem uniforme, equação [13] e equações empíricas de SUZUKI [16, 17 e 18]. Os modelos de secagem central e semi-central não foram avaliados, pois requerem o conhecimento dos valores de densidade de equilíbrio, ρ_e que no presente estudo não foram determinados experimentalmente.

Os parâmetros das equações empíricas (γ , δ , φ , ν) foram estimados através do método de regressão não linear utilizando o procedimento NLIN do SAS e os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.13.

TABELA 4.13 - Valores dos parâmetros das equações empíricas de encolhimento estimados pelo método de regressão não linear.

parâmetro	valor empírico(DPA)	% erro
γ	0,8730 (0,0641)	7,31
δ	1,0977 (0,0802)	7,31
φ	0,4979 (0,0322)	6,47
ν	12,3169 (4,0463)	32,85

Para calcular as relações das áreas com o modelo de secagem uniforme foram utilizados os dados de desidade apresentados nas Tabelas A.1 e A.2, do Anexo A.

As relações (A/A_0) calculadas com as medidas experimentais e determinadas pelas equações [11], [13], [16], [17] e [18] são mostradas na Figura 4.1 em função do conteúdo de umidade adimensional (X/X_0).

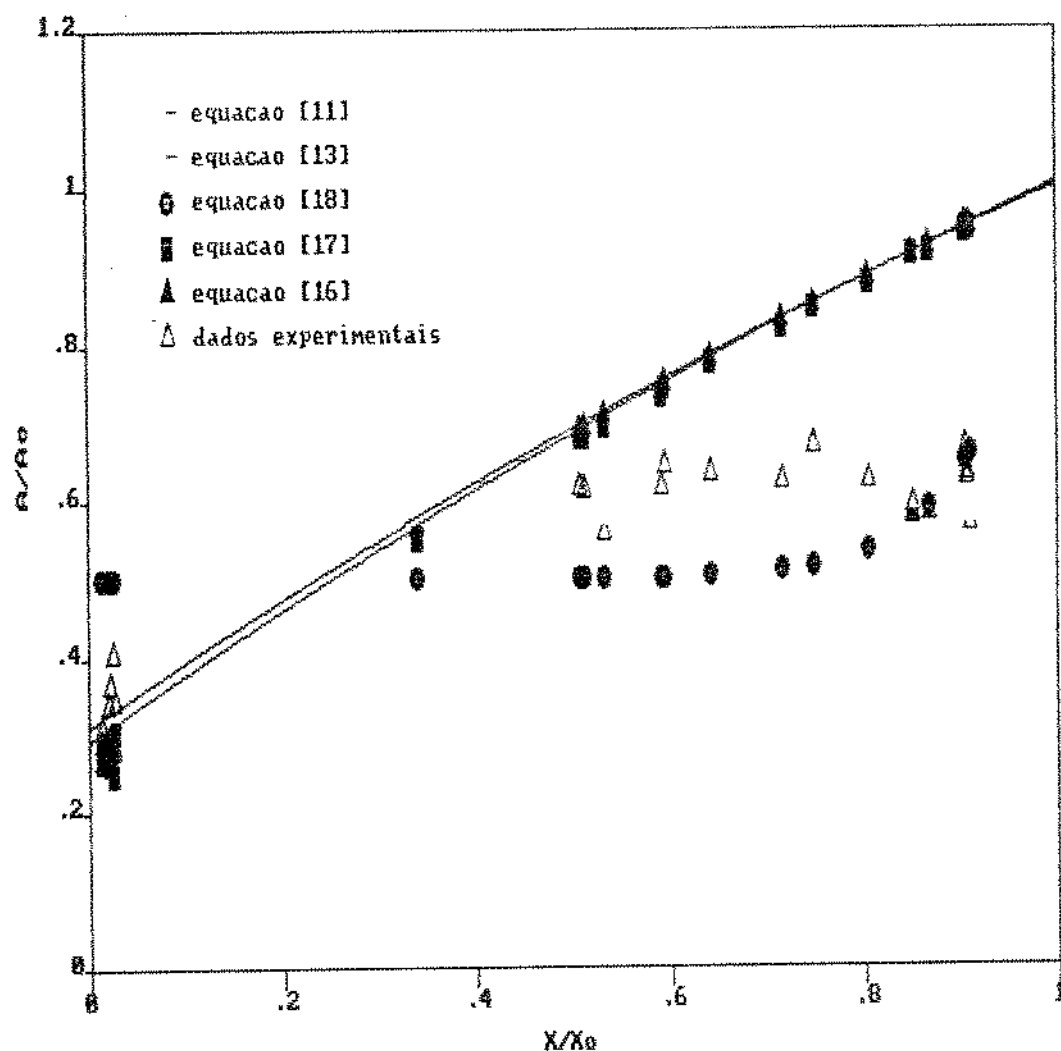


FIGURA 4.1 - Comparação entre os dados experimentais e os calculados pelos modelos de Kilpatrick, secagem uniforme e equações empíricas de encolhimento de batata.

Analisando essa figura verifica-se que os modelos estimados não se ajustam aos dados experimentais de encolhimento. Na tentativa de buscar um ajuste para esses

dados , conforme a tendência observada, foi utilizada uma equação de segundo grau:

$$\frac{A}{A_0} = a + b \left(\frac{X}{X_0} \right) + c \left(\frac{X}{X_0} \right)^2$$

Os parâmetros a, b, e c foram estimados pelo método de regressão não linear, conforme procedimento já mencionado anteriormente, cujos valores são apresentados na Tabela 4.14, juntamente com desvio padrão assintótico e porcentagem de erro.

TABELA 4.14 - Valores dos parâmetros da equação de 2^o grau para encolhimento estimados pelo método de regressão linear.

parâmetro	valor empírico(DPA)	% erro
a	0,3240 (0,0170)	4,32
b	0,8585 (0,0778)	9,06
c	0,6007 (0,0851)	14,17

A relação A/A₀ calculada segundo a equação de 2^o grau para encolhimento é mostrada na Figura 4.2 junto com os valores experimentais em função do adimensional X/X₀.

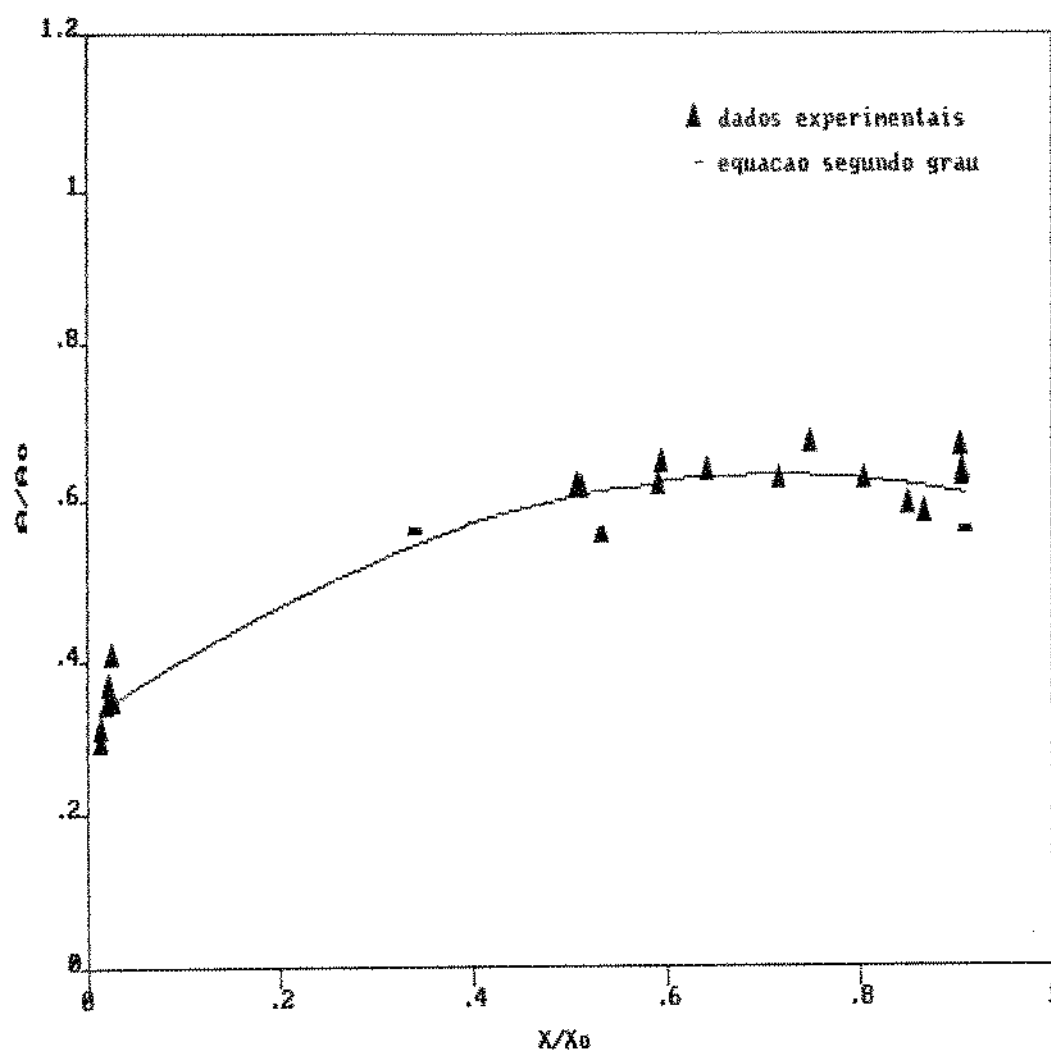


FIGURA 4.2 - Comparação entre os dados experimentais e os estimados pela equação de 2º grau para a relação das áreas no encolhimento de batata.

Verifica-se que os dados apresentam em bom ajuste aos dados da equação de 2º grau.

Assim também a relação dos volumes V_f/V_0 foram

calculadas com as medidas experimentais e através da equação de 2º grau, $(V_F / V_o = a + b (X / X_o) + c (X/X_o)^2$ e os resultados encontram-se na Figura 4.3 em função da adimensional X/X_o . Essa relação V_F/V_o , também apresenta um bom ajuste dos dados experimentais aos da equação de 2º grau.

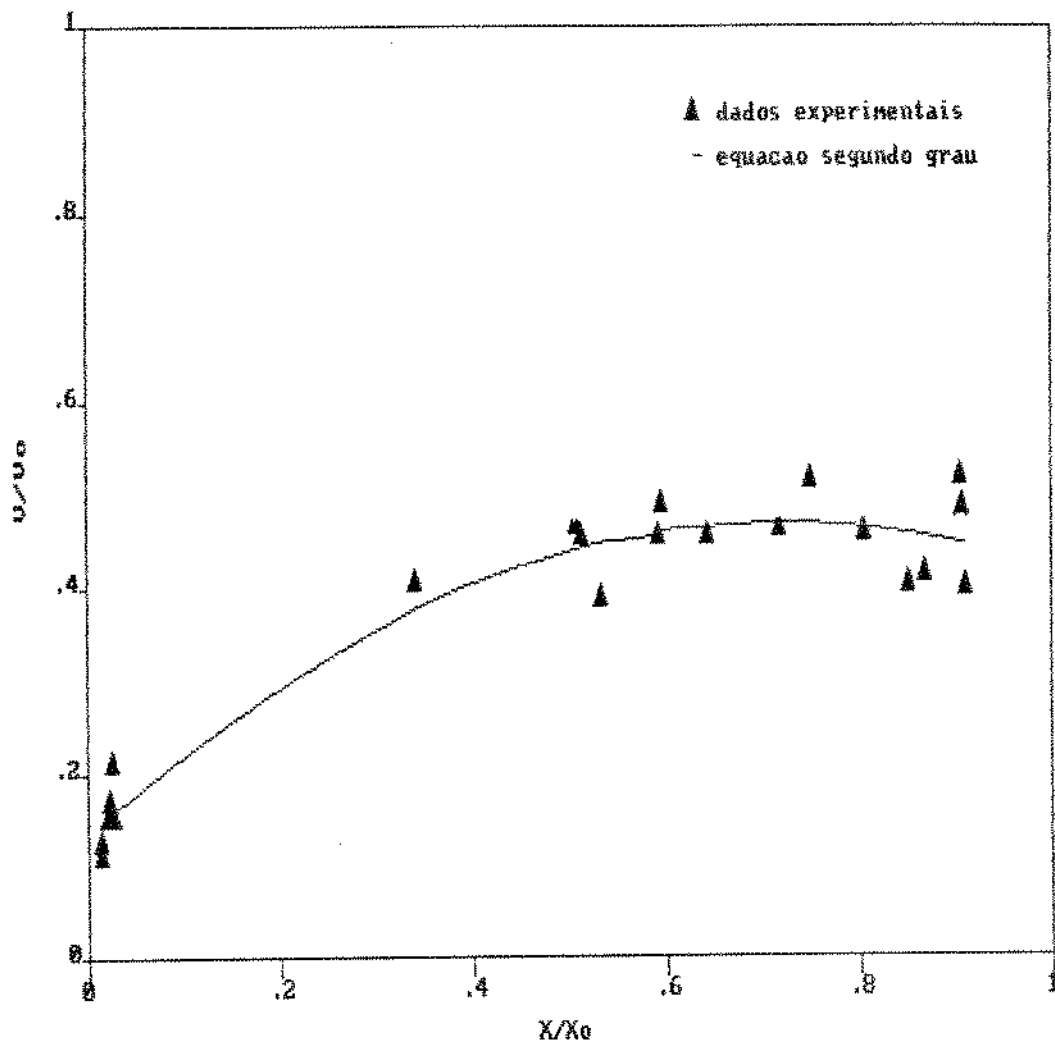


FIGURA 4.3 - Comparação entre os dados experimentais e os dados estimados pela equação de 2º grau para a relação dos volumes no encolhimento de batata.

4.8. Modelo Difusional

Para o cálculo da difusividade efetiva foi utilizada a equação [21].

Nas Tabelas 4.15, 4.16 e 4.17 são apresentados os dados experimentais das curvas de secagem e os dados do termo adimensional da equação [21].

As Figuras 4.4 e 4.5, mostram os valores experimentais de $\ln [(X - X_e) / (X_0 - X_e)]$ em função do tempo, para as condições de temperatura e velocidade. Observa-se que as curvas apresentam duas inclinações, conforme menciona, SHERWOOD (1929b), MAZZA e LeMAUGER (1980), sobre a existência de duas fases dentro do período de taxa decrescente de secagem.

Nestas figuras observou-se o efeito da temperatura sobre o conteúdo de umidade nas duas condições de velocidade.

Aos dados experimentais das curvas de secagem, utilizando a equação [21], foi aplicado o método de regressão não linear para encontrar o número de termos da série que apresentaria melhor ajuste.

O método de regressão não linear utilizado foi o de Gauss-Newton modificado, através do procedimento NLIN do SAS.

TABELA 4.15 - Dados das curvas de secagem de batata na temperatura de 35°C e velocidades do ar de 0,6 e 0,8 m/s

V = 0,6(m/s)			V = 0,8(m/s)		
t (h)	X (g/gms)	$\frac{X - X_e}{X_o - X_e}$	t (h)	X (g/gms)	$\frac{X - X_e}{X_o - X_e}$
0	3,4555	1,0000	0	4,4250	1,0000
1,00	3,0837	0,8895	1,0	4,0537	0,9140
2,33	2,7899	0,8022	2,00	3,7192	0,8365
3,17	2,5760	0,7386	3,00	3,4412	0,7721
7,75	1,8437	0,5210	7,00	2,5341	0,5631
11,00	1,5627	0,4375	11,00	1,9681	0,4309
15,00	1,2789	0,3531	13,00	1,5181	0,3267
23,50	0,7904	0,2079	23,00	1,0762	0,2243
31,00	0,4416	0,1043	39,00	0,4042	0,0687
39,00	0,1899	0,0295	47,67	0,1923	0,0196

TABELA 4.16 - Dados das curvas de secagem de batata na temperatura de 45^oC e velocidade do ar de 0,6 e 0,8 m/s.

V = 0,6(m/s)			V = 0,8(m/s)		
t (h)	X (g/gms)	$\frac{X - X_e}{X_o - X_e}$	t (h)	X (g/gms)	$\frac{X - X_e}{X_o - X_e}$
0	4,0749	1,0000	0	3,5939	1,0000
1,00	3,7120	0,9091	1,00	3,2002	0,8881
2,00	3,4378	0,8405	2,00	2,8050	0,7758
4,33	2,7579	0,6712	3,00	2,5933	0,7156
7,00	2,2373	0,5399	6,75	1,8674	0,5092
16,50	1,2609	0,2954	15,00	1,0432	0,2749
23,00	0,8086	0,1821	15,00	1,0432	0,2749
31,33	0,3973	0,0791	23,00	1,5720	0,1410
40,50	0,1008	0,0049	31,00	0,2808	0,0582

TABELA 4.17 - Dados das curvas de secagem de batata na temperatura de 55°C e velocidade de ar de 0,6 e 0,8 m/s.

V = 0,6(m/s)			V = 0,8(m/s)		
t (h)	X (g/gms)	$\frac{X - X_e}{X_o - X_e}$	t (h)	X (g/gms)	$\frac{X - X_e}{X_o - X_e}$
0	3,6207	1,0000	0	3,9081	1,0000
1,00	3,1588	0,8706	1,00	3,4119	0,8713
2,00	2,6686	0,7333	2,00	2,9464	0,7506
3,00	2,3747	0,6510	3,00	2,5610	0,6507
7,00	1,5958	0,4328	7,00	2,7001	0,4247
11,00	1,1028	0,2947	9,50	1,3312	0,3317
15,00	0,6773	0,1755	15,00	1,6688	0,1600
24,00	0,1905	0,0392	23,00	1,0748	0,0059
39,00	0,1899	0,0295	47,67	0,1923	0,0196

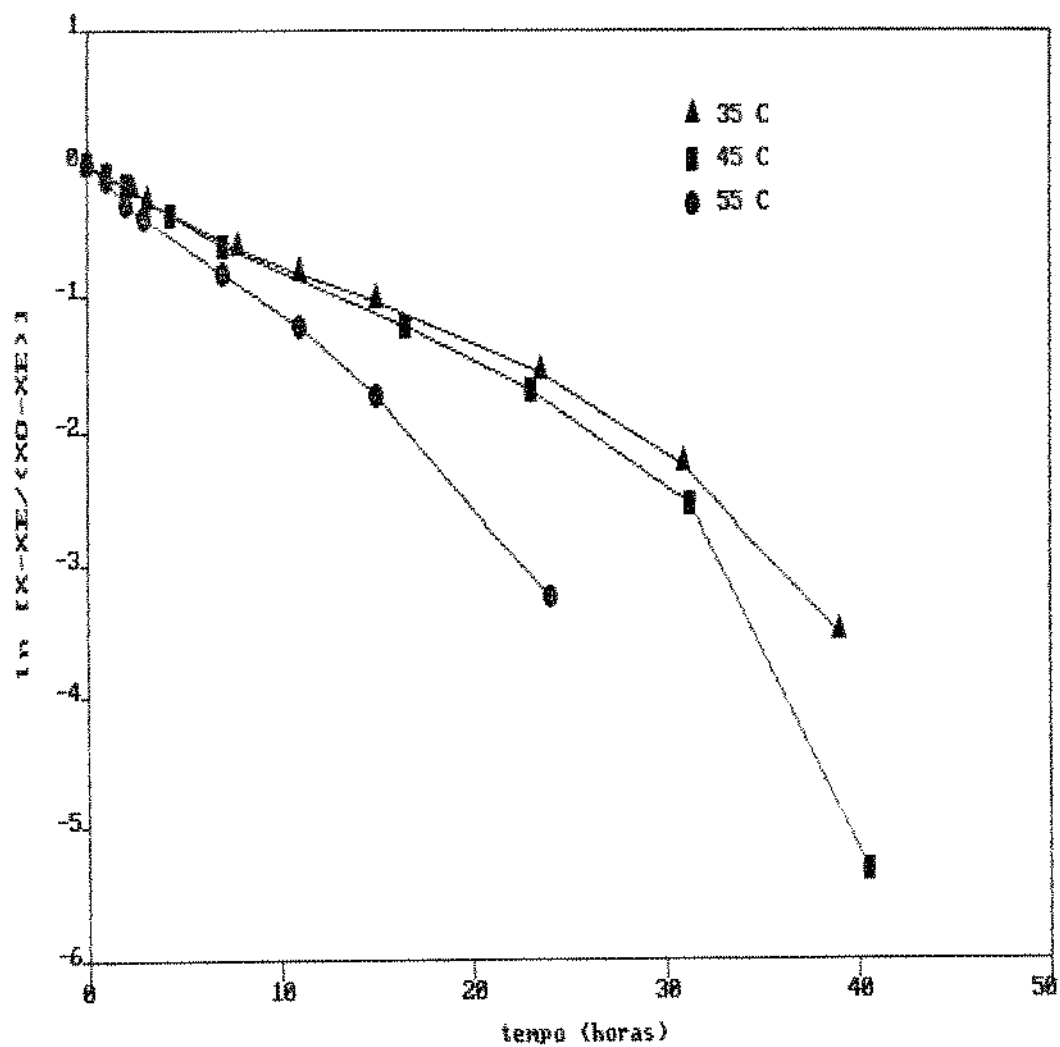


FIGURA 4.4 - Efeito da temperatura sobre o conteúdo de umidade das amostras de batata com velocidade do ar de secagem de 0,6 m/s nas temperaturas de 35, 45 e 55°C.

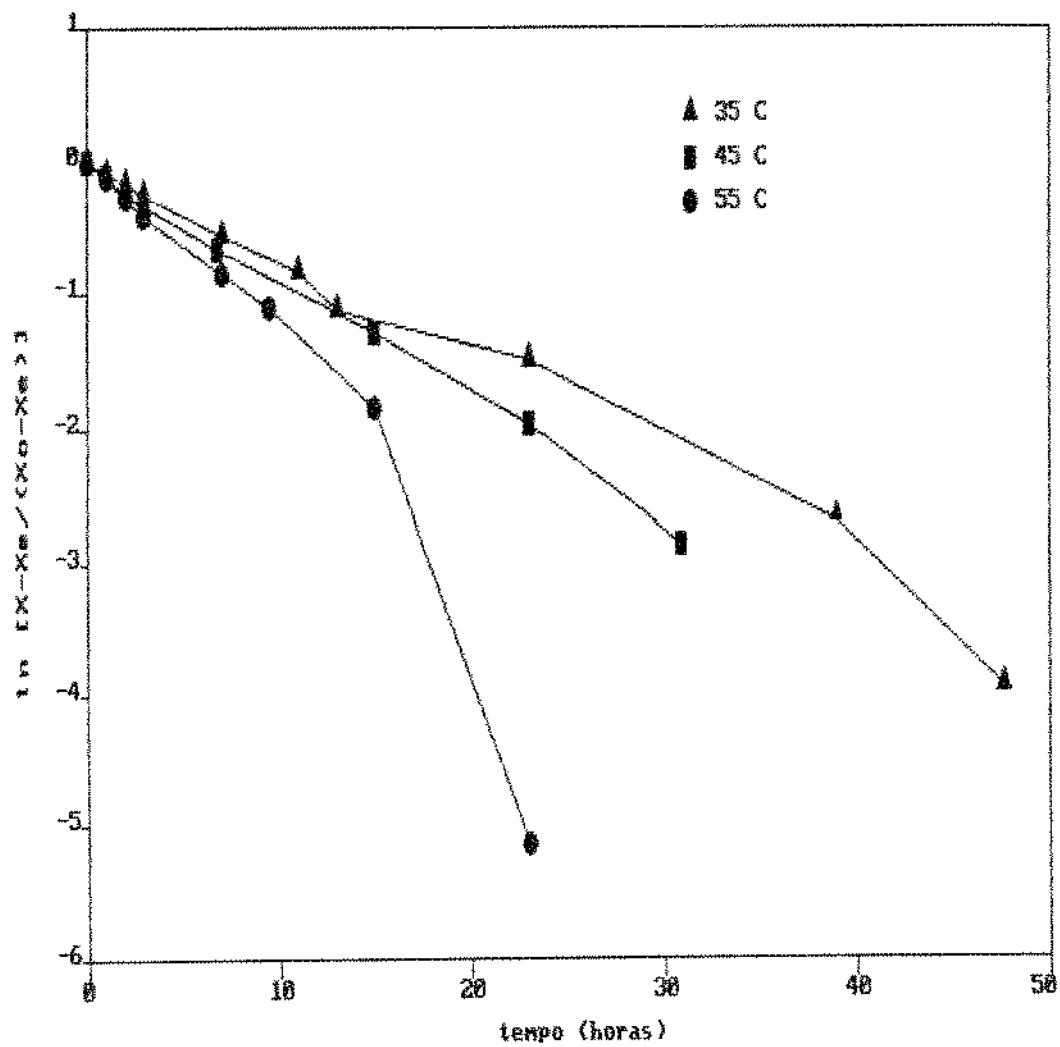


FIGURA 4.5 - Efeito da temperatura sobre o conteúdo de umidade das amostras de batata com velocidade do ar de secagem de 0,8 m/s nas temperaturas de 35, 45 e 55°C.

Os resultados obtidos encontram-se nas Tabelas 4.18 e 4.19, onde a difusividade efetiva estimada para cada condição experimental é apresentada juntamente com os valores do desvio padrão assintótico (DPA).

Na Tabela 4.20 são apresentadas as porcentagens de erro em relação aos valores estimados pela regressão.

Analisando essas tabelas verifica-se que o DPA diminui com o aumento do número de termos da série (n). Entretanto o maior decréscimo do DPA verifica-se para valores de n entre 1 e 5. Para esses termos o erro diminui em média 19,7 %; para valores entre 3 e 5 o decréscimo é em média 1,9%; para n igual a 10,15 e 20 a porcentagem de erro em relação aos valores estimados da difusividade efetiva tornam-se desprezíveis.

Portanto, o modelo difusional, baseado no raio inicial da amostra, com cinco termos da série pode ser utilizado para o ajuste das curvas de secagem de batata, pois apresentou baixos valores de DPA.

Assim também PARK (1987) e NOGUEIRA (1991) encontraram bons ajustes utilizando o modelo difusional com cinco termos para filé de cação e banana respectivamente.

O modelo difusional, que utiliza a 2^a- lei de Fick, admite entre outros, a hipótese de não haver encolhimento do material durante o processo de secagem. Portanto, na tentativa de encontrar valores de difusividade efetiva que pudessem expressar melhor o processo real, com encolhimento,

TABELA 4.18 - Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio inicial das amostras de batata, para n entre 1 e 4

TEMP (°C)	U (M/S)	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4
		Difusividade (DPA) (10^{10}m^2)			
35°	0,6	5,4586 (1,5143)	5,5683 (0,8573)	5,5561 (0,6826)	5,5486 (0,6181)
	0,8	4,8667 (1,5395)	4,9711 (0,5958)	4,9550 (0,7888)	4,9419 (0,6457)
45°	0,6	6,0258 (2,0159)	6,0842 (0,6925)	6,0683 (0,9696)	6,0442 (0,8914)
	0,8	6,7036 (2,4363)	6,8614 (0,7927)	6,8558 (1,0623)	6,8428 (0,9518)
55°	0,6	8,4433 (2,8008)	8,6200 (0,8844)	8,6058 (1,2848)	8,5988 (1,1671)
	0,8	9,8753 (3,4094)	10,0180 (0,9538)	9,9867 (1,6793)	9,9669 (1,5574)

TABELA 4.19 - Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio inicial das amostras de batata, para n entre 5 e 20

TEMP (°C)	U (M/S)	n = 5	n = 7	n = 10	n = 20
		Difusividade (DPA) ($10^{10} \text{m}^2/\text{s}$)			
35°	0,6	5,5447 (0,5892)	5,5419 (0,5523)	5,5419 (0,2634)	5,5419 (0,5427)
	0,8	4,9356 (0,6189)	4,9314 (0,5872)	4,9314 (0,3715)	4,9314 (0,5793)
45°	0,6	6,0367 (0,8576)	6,0322 (0,8169)	6,0322 (0,4115)	6,0322 (0,8068)
	0,8	6,8358 (0,9020)	6,8319 (0,8378)	6,8319 (0,4571)	6,8319 (0,8208)
55°	0,6	8,5847 (1,1134)	8,5825 (1,0408)	8,5825 (0,5447)	8,5825 (1,0211)
	0,8	9,9600 (1,5033)	9,9575 (1,4318)	9,9575 (0,5994)	9,9575 (1,4126)

TABELA 4.20 - Erro percentual do desvio assintótico em relação ao valor da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio inicial das amostras de batata.

TEMP (°C)	V (m/s)	n							
		1	2	3	4	5	7	10	20
35	0,6	29,78	15,42	12,29	11,14	10,63	9,97	9,84	9,79
	0,8	31,63	17,73	14,29	13,07	12,54	11,91	11,79	11,75
45	0,6	33,45	19,52	16,00	14,75	14,21	13,54	13,42	13,76
	0,8	36,34	19,81	15,50	13,91	13,20	12,26	12,08	12,01
55	0,6	33,17	18,60	14,93	13,57	12,97	12,13	11,96	11,97
	0,8	34,53	20,22	16,82	15,63	15,09	14,38	14,24	14,19

foi aplicado o método de regressão não linear, já mencionado, ao modelo difusional utilizando raio médio das amostras. Esses valores de raio médio foram obtidos através da média aritmética entre o raio inicial e raio final das amostras, visando simplificar o processo de cálculo.

MAZZA e Le MAUGER (1980), admitindo as mesmas considerações sobre o encolhimento, calcularam a difusividade de fatias frescas e fatias secas de cebola e

apresentaram os valores médios da difusividade para cebola em fatias secas a diferentes temperaturas.

Os resultados do ajuste com raio médio estão nas Tabelas 4.21 e 4.22 onde são apresentados os valores de difusividade efetiva juntamente com o desvio padrão assintótico (DPA).

TABELA 4.21 - Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio médio das amostras de batata, para n entre 1 e 4

TEMP (°C)	V (M/S)	n = 1 +	n = 2	n = 3	n = 4
		Difusividade (DPA) ($10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$)			
35°	0,6	2,8929 (0,7414)	2,9464 (0,4307)	2,9439 (0,3483)	2,9414 (0,3170)
	0,8	2,8904 (0,8338)	2,9503 (0,4842)	2,9420 (0,3933)	2,9383 (0,3602)
45°	0,6	3,2358 (0,9931)	3,2668 (0,5966)	3,2575 (0,4932)	3,2531 (0,4550)
	0,8	3,7053 (1,2450)	3,7871 (0,7006)	3,7863 (0,5477)	3,7836 (0,4869)
55°	0,6	4,3637 (1,3285)	4,4486 (0,7641)	4,4481 (0,6050)	4,4466 (0,5393)
	0,8	4,9836 (1,5700)	4,9686 (0,9478)	4,9614 (0,7870)	4,9591 (0,7246)

TABELA 4.22 - Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio médio das amostras de batata, para n entre 5 e 20.

TEMP (°C)	V (M/S)	n = 5	n = 7	n = 10	n = 20
		Difusividade (DPA) ($10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$)			
35°	0,6	2,9408 (2,9408)	2,9407 (0,2799)	2,9407 (0,2754)	2,9407 (0,2738)
	0,8	2,9369 (2,9369)	2,9368 (0,3237)	2,9367 (0,3194)	2,9368 (0,3179)
45°	0,6	3,2519 (3,4371)	3,2518 (0,4118)	3,2518 (0,4066)	3,2518 (0,4048)
	0,8	3,7831 (0,4566)	3,7830 (0,4118)	3,7830 (0,4014)	3,7830 (0,3980)
55°	0,6	4,4464 (0,5051)	4,4464 (0,4528)	4,4464 (0,4418)	4,4464 (0,4378)
	0,8	4,9589 (0,6934)	4,9588 (0,6470)	4,9589 (0,6375)	4,9588 (0,6341)

TABELA 4.23 - Erro percentual do desvio assintótico em relação ao valor da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio médio das amostras de batata

TEMP (°C)	V (m/s)	n							
		1	2	3	4	5	7	10	20
35	0,6	25,63	14,62	11,83	10,78	10,27	9,52	9,37	9,31
	0,8	28,85	16,41	13,37	12,26	11,75	11,02	10,88	10,82
45	0,6	30,69	18,26	15,14	13,99	13,44	12,66	12,51	12,45
	0,8	33,60	18,50	14,46	12,87	12,07	10,86	10,61	10,52
55	0,6	30,45	23,39	13,60	12,13	11,36	10,18	9,94	9,85
	0,8	32,02	19,08	15,86	14,61	13,98	13,05	12,86	12,79

Analisando a Tabela 4.23 pode-se verificar o mesmo comportamento encontrado, anteriormente, no ajuste baseado no raio inicial. Isto é, segundo a Tabela 4.20 as porcentagens de erro em relação aos valores estimados da difusividade efetiva diminuem consideravelmente para n entre 1 e 5, tornando-se desprezível a diminuição para n igual a 10, 15 e 20. Isto mostra que o modelo difusional com cinco termos da série é suficiente também para o ajuste das curvas de secagem utilizando o raio médio das amostras de batata.

Portanto, a análise do processo de secagem passa a ser feita com os dados resultantes do modelo difusional com cinco termos da série, que constam da Tabela 4.22.

Para uma melhor visualização do ajuste do modelo difusional as Figuras B.4 à B.9, do Anexo B, mostram os dados experimentais e os calculados utilizando cinco termos da série.

Observando os valores da difusividade efetiva para $n = 5$ da Tabela 4.22 verifica-se que os maiores valores são apresentados pelas condições experimentais de 55°C e velocidades de 0,6 e 0,8 m/s tornando-se portanto as melhores condições para secagem de batata.

Analisando, em função da variação da temperatura, verifica-se que o valor da difusividade é sensível às mudanças de temperatura para uma mesma velocidade do ar.

Uma análise, levando em consideração a variação da velocidade, mostra que apenas nas temperaturas de 45 e 55°C

o valor da difusividade efetiva torna-se sensível a este fator externo. O mesmo não acontece para a temperatura de 35°C cujo valor da difusividade efetiva praticamente não difere com o aumento da velocidade de 0,6 para 0,8 m/s.

Para melhor visualizar o resultado das análises feitas anteriormente nas Tabelas 4.24 e 4.25 estão apresenta- das as variações percentuais dos valores da difusividade efetiva em função da temperatura e da velocidade respectivamente. As variações foram calculados segundo a equação abaixo:

$$\% \text{ incremento da } D_i = \frac{D_{i2} - D_{i1}}{D_{i1}} \times 100$$

onde:

D_i - variação no valor da difusividade em função da variável, i (velocidade ou temperatura).

D_{i1} - valor da difusividade correspondente a variável menor valor.

D_{i2} - valor da difusividade correspondente a variável maior valor.

Pela Tabela 4.24 podemos observar que a variação em função da temperatura foi significativa para a velocidade do ar de 0,6 m/s. Para a velocidade de 0,8 m/s verifica-se uma maior variação quando a temperatura passa de 35° para 55°C, mas na passagem de 35° para 45° e de 45° para 55°C a variação difere muito pouco.

TABELA 4.24 - Variação percentual no valor da difusividade efetiva em função da temperatura do ar de secagem

V (m/s)	variação (%) em TEMP (°C)		
	35--45	45--55	35--55
0,6	10,58	36,73	51,20
0,8	28,81	31,08	68,85

Pela Tabela 4.25 verifica-se maior variação para a temperatura de 45° quando a velocidade passa de 0,6 para 0,8 m/s. Para a temperatura de 35°C não há variação com o aumento da velocidade, pois o decréscimo de 0,13% é desprezível. Mesmo para as velocidades de 0,6 e 0,8 m/s, a variação da difusividade mostra a existência de influência das resistências externas durante a secagem.

TABELA 4.25 - Variação percentual no valor da difusividade efetiva em função da velocidade do ar de secagem.

TEMP (°C)	variação (%) em V (m/s)
	0,6 -- 0,8
35	- 0,13
45	16,34
55	11,53

Numa análise simultânea das Tabelas 4.24 e 4.25, tem-se que a temperatura proporciona sempre uma variação no valor da difusividade efetiva, já para a velocidade o mesmo não é válido.

Conforme foi possível observar através das Figuras 4.4 e 4.5, as curvas sugerem a existência de duas fases no período de taxa decrescente do processo de secagem de batata, como foi mencionado por SHERWOOD (1929b), e MAZZA e Le MAUGER (1980) para secagem de cebola. Um primeiro estágio que vai do início do processo até quando o termo adimensional de secagem, $(X - X_e) / (X_o - X_e)$ é aproximadamente igual a 0,1353 e a partir daí, um segundo estágio, com inclinação bem diferente, cujos poucos pontos experimentais não permitem uma análise mais completa.

Aos dados parciais (primeira fase do processo) das curvas de secagem, utilizando a equação [21], foi aplicado o método de regressão não linear adotando o mesmo procedimento usado anteriormente para os dados completos das curvas de secagem.

Os valores da difusividade efetiva estimada, juntamente com o desvio padrão assintótico para 8 valores de n (termos da série) são apresentados nas Tabelas 4.26 e 4.27. Analisando essas tabelas observa-se a mesma tendência verificada nas análises anteriores com dados completos das curvas de secagem, ou seja, a variação média percentual de erro para n entre 1 e 5 é de 28% e n entre 5 e 20 é de 1,4%, conforme Tabela 4.28. Portanto para o modelo difusional a equação com 5 termos de série apresenta os melhores resultados.

Comparando os valores da difusividade efetiva para $n = 5$ das Tabelas 4.22 e 4.27 verifica-se que os mesmos diminuem em média 10% para os dados da primeira fase do período de taxa decrescente de secagem

Na tentativa de buscar um melhor ajuste, aos dados da primeira fase, foi aplicado o método de regressão linear, através do procedimento GLM do pacote estatístico do SAS. As equações juntamente com o coeficiente de correção estão na Tabela 4.29.

TABELA 4.26 - Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio médio das amostras de batata, para n entre 1 e 4 com dados da 1^a fase das curvas de secagem

TEMP (°C)	U (N/S)	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4
		Difusividade (DPA) ($10^{10} \text{m}^2/\text{s}$)			
35°	0,6	2,4397 (0,9476)	2,5836 (0,4911)	2,5895 (0,3655)	2,5865 (0,3164)
	0,8	2,5368 (1,0963)	2,6788 (0,5958)	2,6643 (0,4651)	2,6559 (0,4171)
45°	0,6	2,6994 (1,2739)	2,8108 (0,6925)	2,8066 (0,5324)	2,7981 (0,4719)
	0,8	3,3231 (1,4711)	3,4686 (0,7927)	3,4638 (0,6039)	3,4572 (0,5323)
55°	0,6	3,9988 (1,6039)	4,1483 (0,8844)	4,1437 (0,6934)	4,1353 (0,6228)
	0,8	4,2146 (1,7266)	4,3697 (0,9538)	4,3625 (0,7532)	4,3531 (0,6788)

TABELA 4.27 - Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio médio das amostras de batata, para n entre 5 e 20 com dados da 1^a fase das curvas de secagem

TEMP (°C)	U (N/S)	n = 5	n = 7	n = 10	n = 20
		Difusividade (DPA) ($10^{10} \text{m}^2/\text{s}$)			
35°	0,6	2,5843 (0,2935)	2,5826 (0,2738)	2,5823 (0,2634)	2,5823 (0,2554)
	0,8	2,6513 (0,3963)	2,6484 (0,3797)	2,6479 (0,3715)	2,6479 (0,3654)
45°	0,6	2,7931 (0,4446)	2,7899 (0,4226)	2,7894 (0,4115)	2,7894 (0,4032)
	0,8	3,4538 (0,4995)	3,4506 (0,4719)	3,4504 (0,4571)	3,4504 (0,4458)
55°	0,6	4,1316 (0,5892)	4,1303 (0,5686)	4,1302 (0,5447)	4,1302 (0,5325)
	0,8	4,3491 (0,6449)	4,3475 (0,6156)	4,3475 (0,5994)	4,3475 (0,5878)

TABELA 4.28 - Erro percentual do desvio assintótico em relação ao valor da difusividade efetiva estimada para dados da 1^a fase das curvas de secagem

TEMP (°C)	V (m/s)	n							
		1	2	3	4	5	7	10	20
35	0,6	38,84	19,01	14,11	12,23	11,36	10,60	10,20	9,89
	0,8	43,23	22,31	17,46	15,71	14,95	14,34	14,03	13,80
45	0,6	47,19	24,64	18,97	16,86	15,92	15,15	14,75	14,46
	0,8	44,27	22,91	17,44	15,40	14,47	13,68	13,25	12,92
55	0,6	40,11	21,32	16,73	15,65	14,26	13,57	13,19	12,89
	0,8	40,97	21,86	17,27	15,59	14,63	14,16	13,79	13,50

A partir dos valores estimados pelo modelo difusional com raio médio para $n = 1$ e $n = 5$ (Tabelas 4.26 e 4.27) e pelo método de regressão linear (Tabela 4.29) foram construídas as curvas e o ajuste com os dados experimentais são mostrados nas Figuras B.10 à B.15, do Anexo B. Essas figuras mostram que o melhor ajuste para a primeira fase da curva de secagem é apresentado pelo método de regressão linear.

TABELA 4.29 - Equação da reta e coeficiente de correlação estimados pela regressão linear com os dados da 1^a fase das curvas de secagem.

TEMP (°C)	V (m/s)	equação	rc
35	0,6	$\ln ADX = - 0,0696 - 0,0655t$	0,9929
	0,8	$\ln ADX = - 0,0617 - 0,0677t$	0,9729
45	0,6	$\ln ADX = - 0,0425 - 0,0727t$	0,9963
	0,8	$\ln ADX = - 0,0594 - 0,0831t$	0,9971
55	0,6	$\ln ADX = - 0,0466 - 0,1116t$	0,9960
	0,8	$\ln ADX = - 0,0218 - 0,1191t$	0,9975

$$* ADX = (X - X_e) / (X_o - X_e)$$

Conforme afirmou LEWIS (1921), SHERWOOD (1929 a, b) e PERRY (1984) a equação [22], torna-se uma reta no gráfico de $\ln [(X - X_e) / (X_o - X_e)]$ em função do tempo. Portanto se for válida a igualdade entre as equações [22] e a equação referente à regressão linear $[(X - X_e) / (X_o - X_e)] = \exp (A + Bt)$ pode-se calcular o valor da difusividade para os dados da regressão linear conforme são mostrados na Tabela 4.29.

Comparando os dados da Tabela 4.30 com os da Tabela 4.26 e 4.27 verifica-se que os valores da difusividade da Tabela 4.30 são em média 60% maiores que os

da Tabela 4.26 e 4.27. Isto indica que não é válido igualar-se a equação [22] à equação da reta para os períodos iniciais.

TABELA 4.30 - Valores da difusividade obtidas pelo ajuste de regressão linear baseado no raio médio das amostras, com dados da 1^a fase das curvas de secagem

TEMP (°C)	V (m/s)	Difusividade (10 ¹⁰ m ² /s)
35	0,6	4,0889
	0,8	4,3006
45	0,6	4,6181
	0,8	5,4639
55	0,6	6,4861
	0,8	7,4347

PERRY (1984) afirma que a utilização de um termo da série refere-se a um período quase terminal da curva de secagem, produzindo o valor do adimensional $(X-X_e)/(X_o-X_e)$ menor que um.

No presente estudo o valor inicial do adimensional foi de 0,6917. Isto também foi verificado por AGUERRE, SUAREZ e VIOLLAZ (1982) em secagem de arroz.

4.7. Modelo difusional com encolhimento

A equação [23] apresentada por PARK (1987) permite calcular a difusividade efetiva considerando o encolhimento do material durante o processo de secagem. Com os dados experimentais das curvas de secagem e de encolhimento (itens 4.5 e 4.6) foram calculados os termos adimensionais de concentração $(C - C_e) / (C_o - C_e)$, que são apresentados nas Tabelas 4.31, 4.32 e 4.33. A Figura 4.6 mostra os dados de $\ln [(C - C_e) / (C_o - C_e)]$ em função do tempo para as curvas de secagem.

TABELA 3.31 - Valores experimentais do adimensional de concentração para temperatura do ar de secagem de 35 °C

V = 0,6 (m/s)			V = 0,8 (m/s)		
t (h)	C (g/gms.cm ³)	$\frac{C - C_e}{C_o - C_e}$	t (h)	C (g/gms.cm ³)	$\frac{C - C_e}{C_o - C_e}$
0	0,1065	1,0000	0	0,1624	1,0000
1	0,0883	0,8164	1	0,1400	0,8524
2,33	0,0774	0,7064	2	0,1241	0,7477
3,17	0,0707	0,6388	3	0,1130	0,6746
7,75	0,0531	0,4612	7	0,0853	0,4921
11	0,0475	0,4046	1	0,0717	0,4025
15	0,0421	0,3502	13	0,0616	0,3360
23,5	0,0324	0,2523	23	0,0512	0,2675
31	0,0234	0,1615	39	0,0290	0,1212
39	0,0133	0,0595	47,67	0,0170	0,0422

TABELA 4.32 - Valores experimentais do adimensional de concentração para temperatura do ar de secagem de 45°C.

V = 0,6 (m/s)			V = 0,8 (m/s)		
t	C	$\frac{C - C_e}{C_o - C_e}$	t	C	$\frac{C - C_e}{C_o - C_e}$
(h)	(g/gms.cm ³)		(h)	(g/gms.cm ³)	
0	0,1271	1,0000	0	0,1103	1,0000
1	0,1060	0,8437	1	0,0012	0,8162
2	0,0952	0,7536	2	0,0770	0,6795
4,33	0,0749	0,5806	3	0,0708	0,6198
7	0,0631	0,4800	6,75	0,0540	0,4581
16,5	0,0445	0,3214	15	0,0382	0,3061
23	0,0350	0,2404	23	0,0275	0,2031
31,33	0,0231	0,1390	31	0,0177	0,1088
40,5	0,0082	0,0119	-	-	-

TABELA 4.33 - Valores experimentais do adimensional de concentração para temperatura do ar de secagem de 55°C.

V = 0,6 (m/s)			V = 0,8 (m/s)		
t	C	$\frac{C - C_e}{C_o - C_e}$	t	C	$\frac{C - C_e}{C_o - C_e}$
(h)	(g/gms.cm ³)		(h)	(g/gms.cm ³)	
0	0,1231	1,0000	0	0,1194	1,0000
1	0,0989	0,7953	1	0,0963	0,7963
2	0,0808	0,6421	2	0,0803	0,6597
3	0,0723	0,5702	3	0,0700	0,5700
7	0,0541	0,4152	7	0,0520	0,4134
11	0,0438	0,3291	9,5	0,0451	0,3533
15	0,0337	0,2437	15	0,0311	0,2315
24	0,0149	0,0846	23	0,0063	0,0156

Através de uma análise de regressão não linear, conforme procedimento NLIN do SAS, tentou-se encontrar o número de termos da série, dada pela equação [21], que daria o melhor ajuste às curvas de experimentais de secagem.

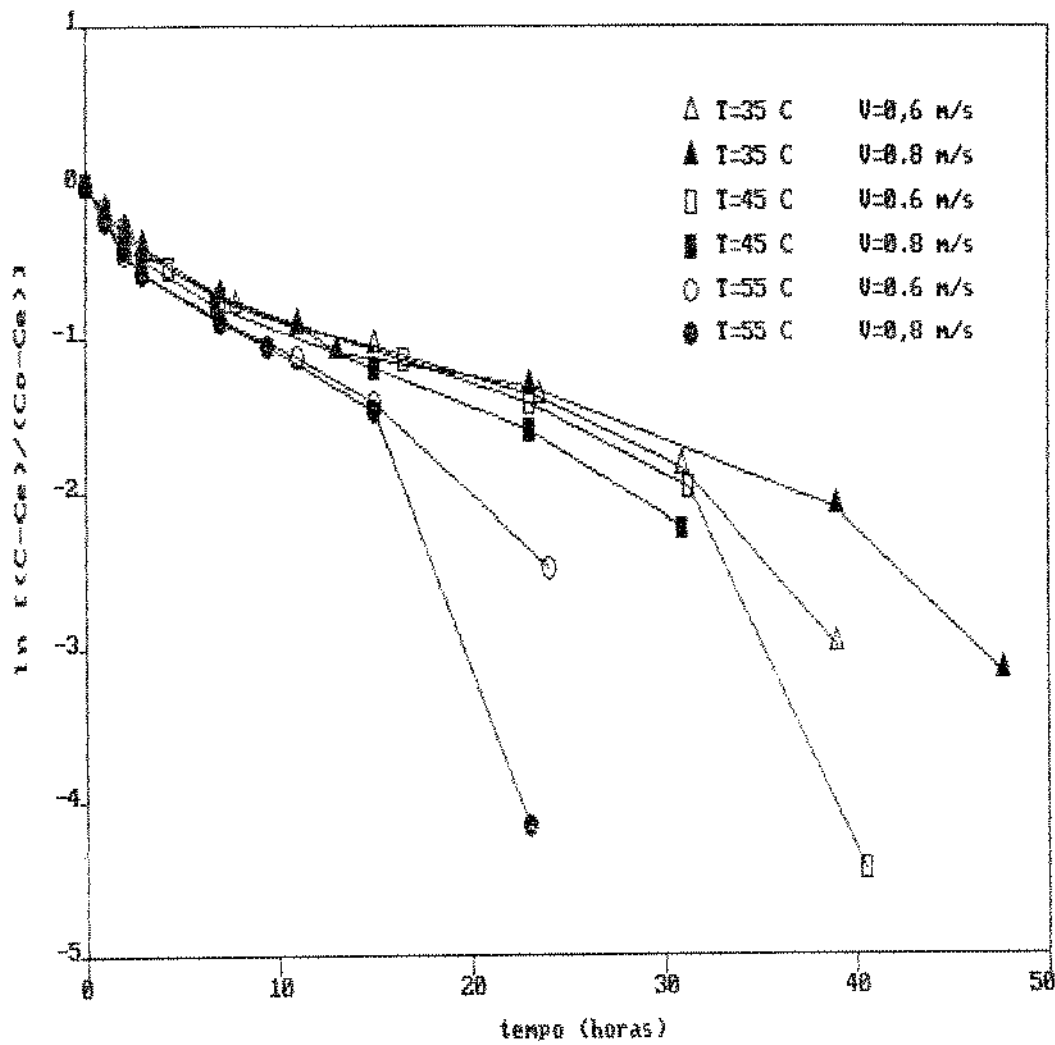


FIGURA 4.6 - Curvas de secagem em função do $\ln$ do adimensional de concentração para as condições experimentais do ar de secagem

Nas Tabelas 4.34 e 4.35 são apresentados os resultados obtidos para até 20 termos da série com os respectivos valores da difusividade efetiva e o desvio padrão assintótico.

TABELA 4.34 - Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional considerando encolhimento, para n entre 1 e 4 com dados das curvas de secagem de batata

TEMP (°C)	U (M/S)	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
		Difusividade (DPA) ($10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$)			
35°	0,6	2,8708 (0,6277)	3,0408 (0,3344)	3,0725 (0,2416)	3,0794 (0,1980)
	0,8	2,8583 (0,7224)	3,0378 (0,3838)	3,0639 (0,2774)	3,0678 (0,2383)
45°	0,6	3,0711 (0,8331)	3,2253 (0,4623)	3,2472 (0,3453)	3,2497 (0,2951)
	0,8	3,4794 (1,0045)	3,7603 (0,5429)	3,8169 (0,3859)	3,8272 (0,3094)
55°	0,6	4,0242 (1,0869)	4,2922 (0,5927)	4,3358 (0,4278)	4,3411 (0,3490)
	0,8	4,7064 (1,3369)	4,9500 (0,7579)	4,9828 (0,5836)	4,9853 (0,5084)

TABELA 4.35 - Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional considerando encolhimento, para n entre 1 e 4 com dados das curvas de secagem de batata

TEMP (°C)	V (M/S)	n = 5	n = 7	n = 10	n = 20
		Difusividade (DPA) ($10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$)			
35°	0,6	3,0811 (0,1738)	3,0814 (0,1338)	3,0814 (0,1245)	3,0814 (0,1210)
	0,8	3,0678 (0,2058)	3,0672 (0,1689)	3,0672 (0,1610)	3,0672 (0,1581)
45°	0,6	3,2494 (0,2696)	3,2489 (0,2324)	3,2489 (0,2246)	3,4289 (0,2218)
	0,8	3,8286 (0,2661)	3,8286 (0,1924)	3,8286 (0,1746)	3,8286 (0,1678)
55°	0,6	4,3414 (0,3052)	4,3411 (0,2320)	4,3411 (0,2148)	4,3411 (0,2083)
	0,8	4,9850 (0,4697)	4,9847 (0,4110)	4,9847 (0,3986)	4,9847 (0,3940)

Para melhor visualizar o comportamento dos dados na Tabela 4.35 são apresentadas as porcentagens de erro dos valores estimados pela regressão.

Mais uma vez, conforme análises anteriores, verifica-se que o DPA diminui com o aumento de n , sendo que esta diminuição é mais acentuada entre os cinco primeiros termos da série. Assim, o modelo com cinco termos pode ser utilizado para a determinação da difusividade efetiva considerando o encolhimento.

TABELA 4.36 - Erro percentual do desvio assintótico em relação ao valor da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional com encolhimento

TEMP (°C)	V (m/s)	n							
		1	2	3	4	5	10	15	20
35	0,6	21,87	11,00	7,86	6,43	5,64	4,34	4,04	3,93
	0,8	25,28	12,63	9,05	7,51	6,71	5,51	5,25	5,15
45	0,6	27,13	14,33	10,63	9,08	8,30	7,15	6,91	6,83
	0,8	28,87	14,44	10,11	8,08	6,95	5,03	4,56	4,38
55	0,6	27,01	13,81	9,87	8,04	7,03	5,34	4,95	4,80
	0,8	28,41	15,31	11,71	10,20	9,42	8,24	8,00	7,90

Uma melhor visualização do ajuste pode ser feita através das Figuras B.16 a B.21, do Anexo B, onde os dados experimentais são mostrados juntamente com os dados calculados pelo modelo com cinco termos da série.

Os ajustes das curvas utilizando concentração no lugar de conteúdo de umidade apresentam menores desvios assintóticos, que refletem uma melhor correlação.

Nas Tabelas 4.37 e 4.38 são apresentados os incrementos nos valores de difusividade em função de temperatura e velocidade, que seguem as tendências analisadas nas Tabelas 4.24 e 4.25.

TABELA 4.37 - Variação percentual no valor da difusividade efetiva considerando o encolhimento em função da temperatura.

V (m/s)	variação (%) em TEMP (°C)		
	35 - 45	45 - 55	35 - 55
0,6	5,46	33,61	40,90
0,8	24,80	30,20	62,49

TABELA 4.38 - Variação percentual no valor da difusividade efetiva considerando o encolhimento em função da velocidade.

TEMP (°C)	variação (%) em V (m/s)
	0,6 - 0,8
35	- 0,43
45	17,83
55	14,83

Na Tabela 4.39 são apresentados os valores de difusividade efetiva calculadas com o modelo difusional sem encolhimento com raio inicial e raio médio (média aritmética) e o modelo difusional com encolhimento com raio médio (média aritmética).

Os valores da difusividade efetiva calculadas com o modelo difusional sem encolhimento e raio médio, estão próximos dos valores de difusividade efetiva calculada com o modelo difusional considerando encolhimento e com raio médio.

TABELA 4.39 - Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional baseado no raio inicial, raio médio e considerando encolhimento.

TEMP (°C)	V (m/s)	Difusividade efetiva (10^{10}) (m^2/s)		
		MDRo*	MDRm*	MDCE*
35	0,6	5,5447	2,9408	3,0811
	0,8	4,9356	2,9369	3,0678
45	0,6	6,0367	3,2519	3,2494
	0,8	6,8358	3,7831	3,8286
55	0,6	8,5847	4,4464	4,3414
	0,8	9,9600	4,9589	4,9850

- * MDRo - modelo difusional com raio inicial da amostra
 MDRm - modelo difusional com raio médio da amostra
 MDCE - modelo difusional considerando encolhimento

Conforme o resultado apresentado por PARK (1987), o presente estudo também mostrou que os valores de difusividade efetiva são superestimados quando calculados pelo modelo difusional sem encolhimento, utilizando raio inicial. Pela Tabela 4.39 verifica-se um acréscimo médio de mais de 70% no valor da difusividade efetiva.

4.8. Modelo empírico para determinação do tempo de secagem

Através da equação [25], utilizando o método de regressão não linear, foi possível estimar o coeficiente de taxa de secagem K_s e o conteúdo de umidade de equilíbrio inicial X_{1e} à partir dos dados experimentais das curvas de secagem.

Os parâmetros estimados com os respectivos desvios padrão são mostrados na Tabela 4.40.

Como X_{1e} corresponde ao conteúdo de umidade crítica X_{cr} , foi possível localizar o tempo correspondente nas curvas experimentais de secagem. Na tabela 4.41 são apresentados esses valores na forma de intervalo de tempo.

A partir dos dados estimados X_{1e} e K_s , da tabela 4.40, do conteúdo de umidade de equilíbrio X_e e do conteúdo de umidade ao longo do tempo de secagem X , foi possível efetuar o ajuste do modelo através da equação [25]. Nas Figuras de B.22 à B.27, do Anexo B, são apresentados os

TABELA 4.40 - Valores da umidade de equilíbrio inicial (X_{1e}) e da constante K_s do modelo empírico estimados com os dados das curvas de secagem

TEMP (°C)	V (m/s)	X_{1e} (DPA) (g/gms)	K_s (DPA)
35	0,6	2,9045 (0,0918)	0,0398(0,0030)
	0,8	3,7340 (0,2651)	0,0288(0,0029)
45	0,6	3,6081 (0,1322)	0,0428(0,0039)
	0,8	3,0079 (0,1197)	0,0437(0,0044)
55	0,6	2,9962 (0,1043)	0,0587(0,0207)
	0,8	3,4327 (0,1166)	0,0766(0,0064)

TABELA 4.41 - Intervalo de tempo de X_{1e} nas curvas de secagem de batata

TEMP (°C)	V (m/s)	intervalo de tempo (horas)
35	0,6	1 < t < 2
	0,8	1 < t < 2
45	0,6	1 < t < 2
	0,8	1 < t < 2
55	0,6	1 < t < 2
	0,8	1 < t < 1

resultados do modelo e dos dados experimentais, demonstrando que o modelo de Sazhin não apresenta um ajuste às curvas de secagem de batata.

4.9. Energia de Ativação

Utilizando a equação de Arrhenius, que admite uma dependência da difusividade em função da temperatura, foi possível calcular a energia de ativação E_a :

$$D = A \exp \left(- E_a / RT \right)$$

onde:

D - difusividade (m^2/s)

A - constante

E_a - Energia de ativação (J/mol)

R - Constante universal dos gases ($J/g-mol.K$)

T - temperatura (K)

Utilizando os valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional com $n = 5$ para raio médio da amostra, foi calculada a energia de ativação pelo método de regressão linear em função da velocidade do ar de secagem. Os resultados são apresentados na Tabela 4.42 e os valores da energia de ativação na Tabela 4.43.

TABELA 4.42 - Equação da reta para cálculo da energia de ativação com raio inicial, raio médio e considerando encolhimento

V (m/s)	equação	rc*
0,6	$\ln D_{ro} = 14,238 - 2192,8 T^{-1}$	0,9371
0,8	$\ln D_{ro} = 9,941 - 3541,7 T^{-1}$	0,9982
0,6	$\ln D_{rm} = 15,248 - 2074,4 T^{-1}$	0,9533
0,8	$\ln D_{rm} = 13,382 - 2639,7 T^{-1}$	0,9993
0,6	$\ln D_{rme} = 16,356 - 1719,8 T^{-1}$	0,9233
0,8	$\ln D_{rme} = 13,954 - 2452,7 T^{-1}$	0,9977

* rc - coeficiente de correção

D_{ro} - difusividade efetiva com raio inicial

D_{rm} - difusividade efetiva com raio médio

D_{rme} - difusividade efetiva com raio médio considerando encolhimento

DAUDIN (1983) através de uma comparação bibliográfica apresentou valores de energia de ativação para alguns alimentos: $E_a = 52$ kJ/mol para batata, $E_a = 40$ kJ/mol para abacate e $E_a = 29$ kJ/mol para beterraba. Para batata os dados referem-se às condições experimentais de temperatura do ar entre 55 e 70°C e velocidades entre 1 e 2,5 m/s.

TABELA 4.43 - Valores da energia de ativação (E_a) com raio inicial, raio médio e considerando encolhimento em função velocidade do ar de secagem

V (m/s)	Ea (KJ /mol)		
	ro	rm	rme
0,6	18,231	17,247	14,298
0,8	29,446	21,946	20,383

Os dados obtidos no presente estudo com raio inicial, estão abaixo dos dados da literatura e isto pode ser atribuído às diferenças nas condições experimentais. Os outros dados encontram-se também abaixo por levarem em consideração os efeitos do encolhimento.

4.10. Taxa de Secagem

4.10.1. Modelo Difusional

Utilizando a equação [26] e os valores de difusividade efetiva estimados através do modelo com cinco termos (Tabela 4.22) foram calculadas as taxas de secagem.

Para melhor visualização dos resultados, as taxas de secagem foram graficadas em função do conteúdo de umidade conforme Figura 4.7.

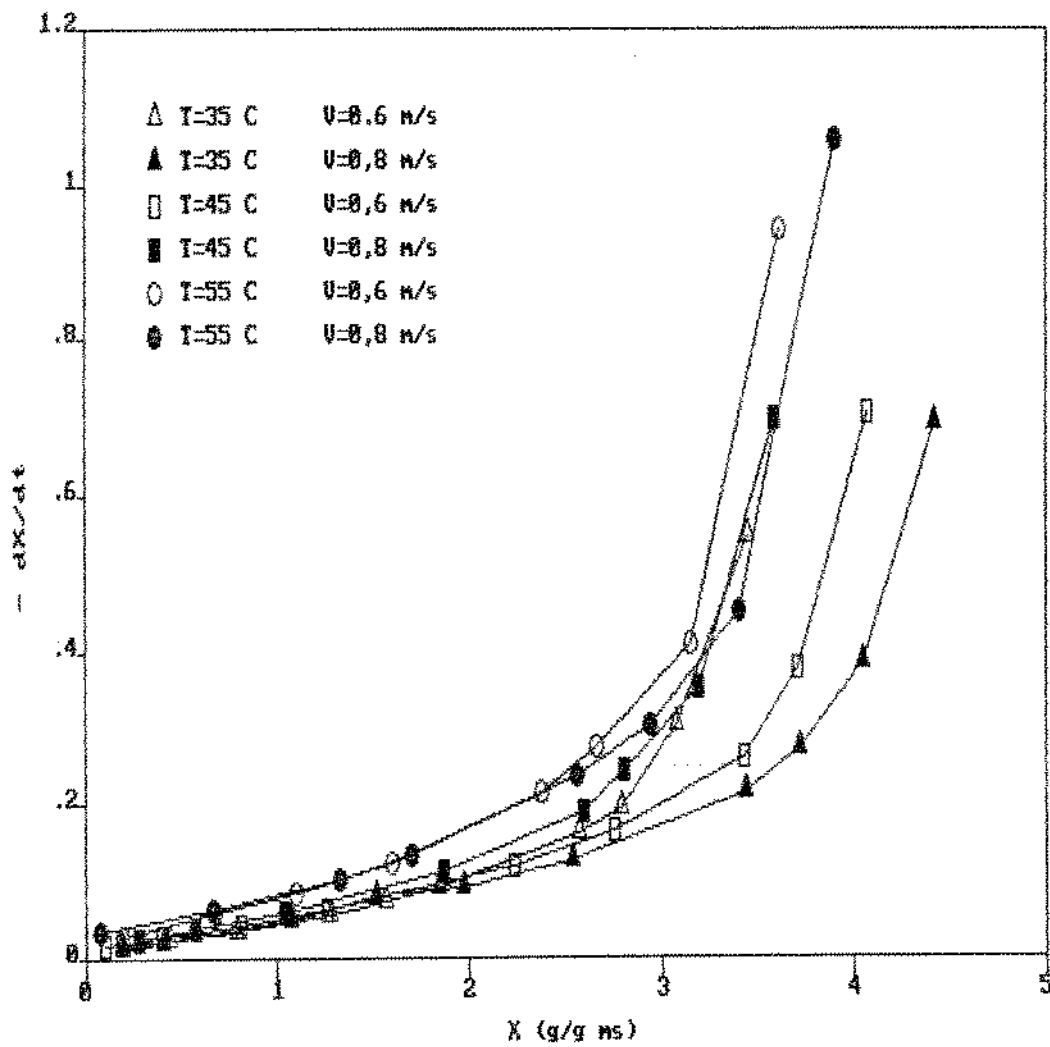


FIGURA 4.7 - Curvas da taxa de secagem pelo modelo difusional em função do conteúdo de umidade

4.10.2. Modelo Empírico

À partir da equação [24], utilizando os valores estimados de K_s da Tabela 4.40, foram calculadas as taxas de secagem segundo as condições experimentais..

Através das Figuras B.28 à B.33, do Anexo B, observando as curvas relativas ao modelo empírico, verifica-se que o mesmo não apresenta um período de taxa constante. Como essas figuras também mostram que não é possível ajustar o modelo empírico às curvas experimentais de secagem, os valores da umidade de equilíbrio inicial (X_{1e}), passam a não ter significado físico no processo de secagem de batata.

Nestas mesmas figuras também são construídos os gráficos das taxas de secagem (dX/dt) em função do conteúdo de umidade (X) do modelo difusional, mostrando que, conforme as tendências das curvas experimentais (Fig.B.22 à B.27), o modelo empírico não é adequado para os cálculos nos processos de secagem de batata.

4.10.3. Regressão Linear

Através da equação [27] foram calculadas as taxas de secagem referentes à primeira fase do período de taxa

decrecente, utilizando os dados da Tabela 4.29. Os resultados são apresentados na Figura 4.8.

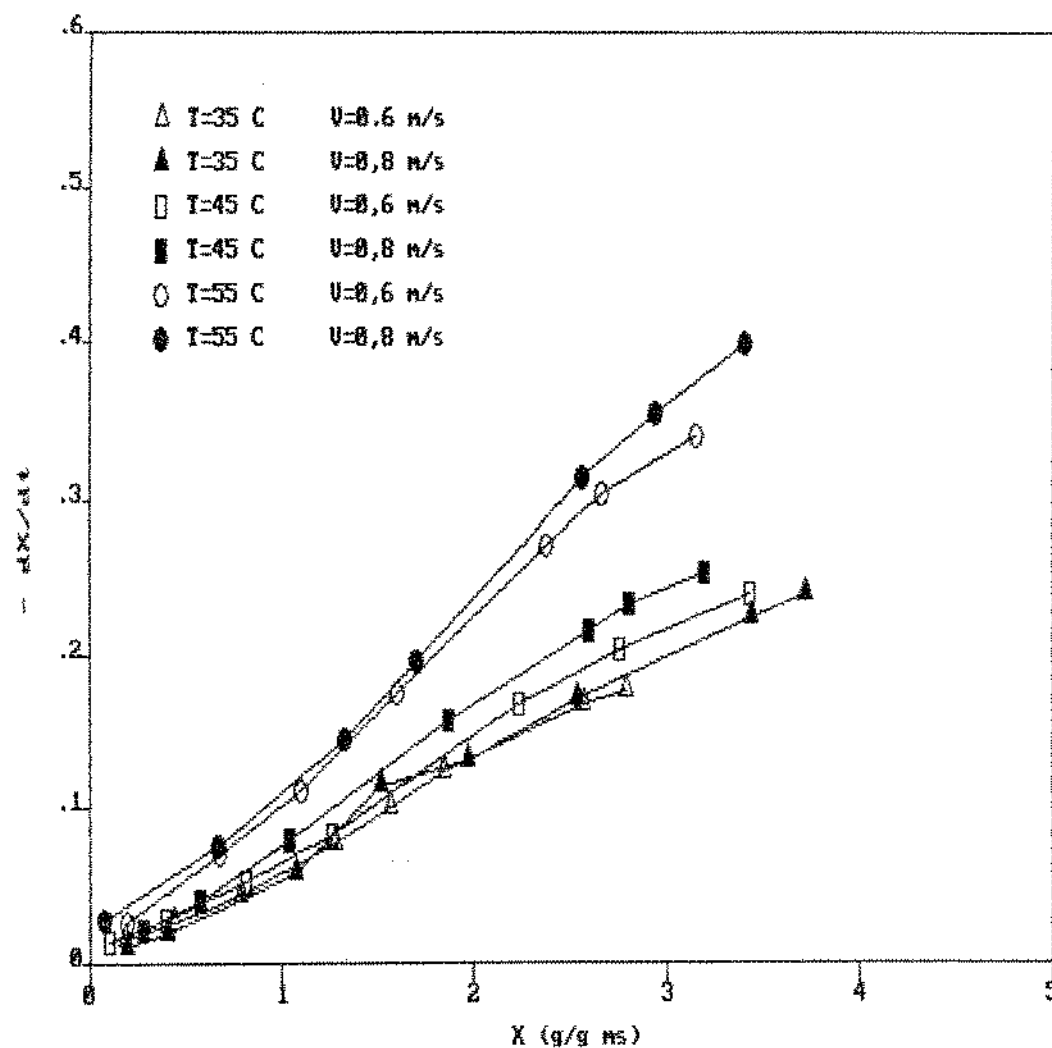


FIGURA 4.8 - Curvas de taxa de secagem obtidas por regressão linear para a 1ª fase em função do conteúdo de umidade

4.11. Normalização

4.11.1. Normalização através da Taxa de Secagem

Utilizando os dados de taxa de secagem, conforme item 4.10.1., foram obtidas as curvas de taxa de secagem adimensionalizadas pela equação [31], ou seja as curvas características de secagem de batata.

Para cada condição experimental do ar de secagem e na pressão atmosférica de Campinas 712 mmHg, a temperatura de bulbo úmido foi obtida através de um "software" para determinar as propriedades psicrométricas do ar, BIAGI e SILVA (1990). Esses dados são apresentados na Tabela 4.44.

TABELA 4.44 - Valores da temperatura de bulbo úmido (T_{bu}), para as condições experimentais do ar de secagem na pressão atmosférica de 712 mmHg.

TEMP (°C)	V (m/s)	$\overline{XR}$ (%)	T_{bu} (°C)
35	0,6	33	22,3
	0,8	43	24,6
45	0,6	32	29,3
	0,8	28	28,0
55	0,6	16	29,9
	0,8	17	30,2

Para cada condição experimental, foi construído o gráfico do primeiro membro da equação [31] em função do conteúdo de umidade, conforme está mostrado na Figura 4.9.

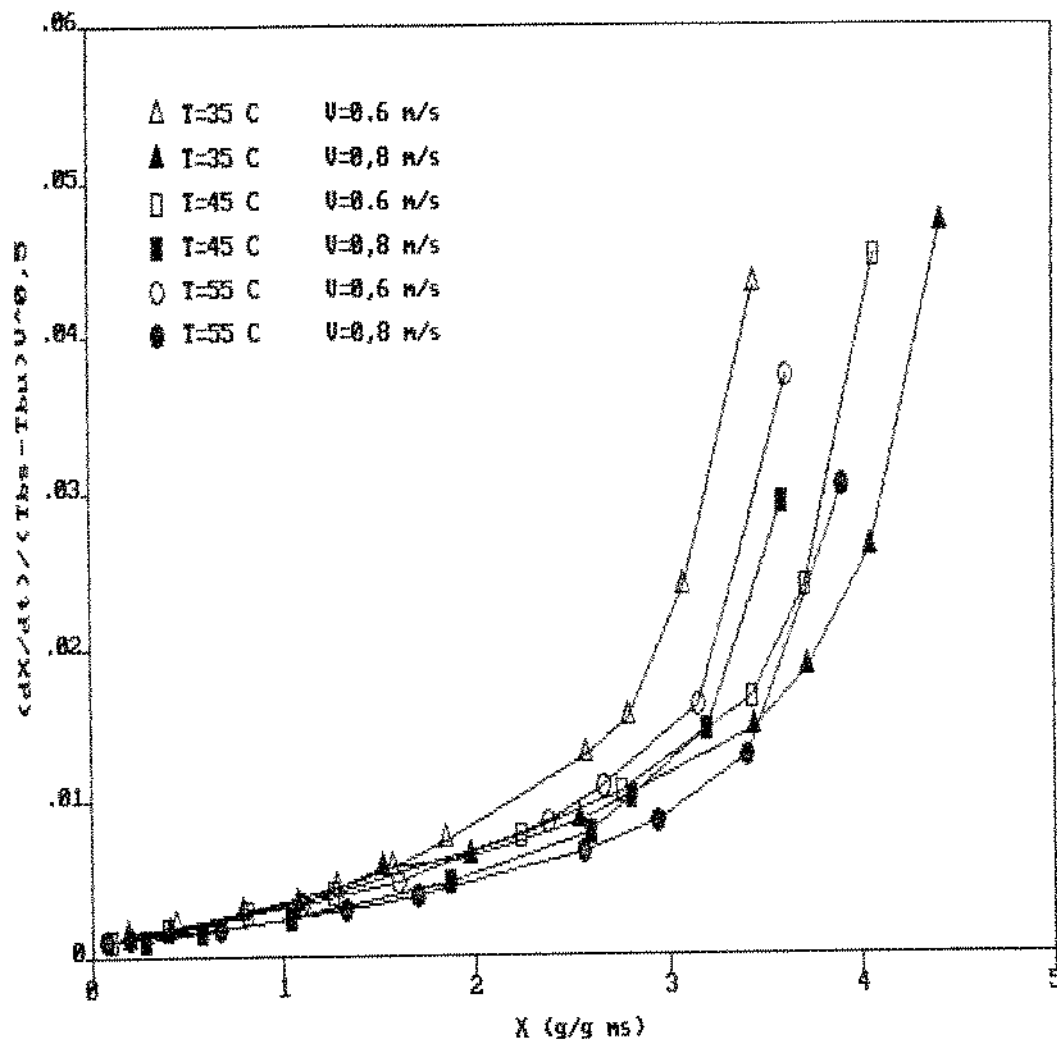


FIGURA 4.9 - Normalização das curvas de secagem pela adimensionalização das taxas em função do conteúdo de umidade

Verifica-se que, com o modelo utilizado não foi obtido uma curva básica única, ou seja não foi possível determinar uma CCS para a secagem de batata.

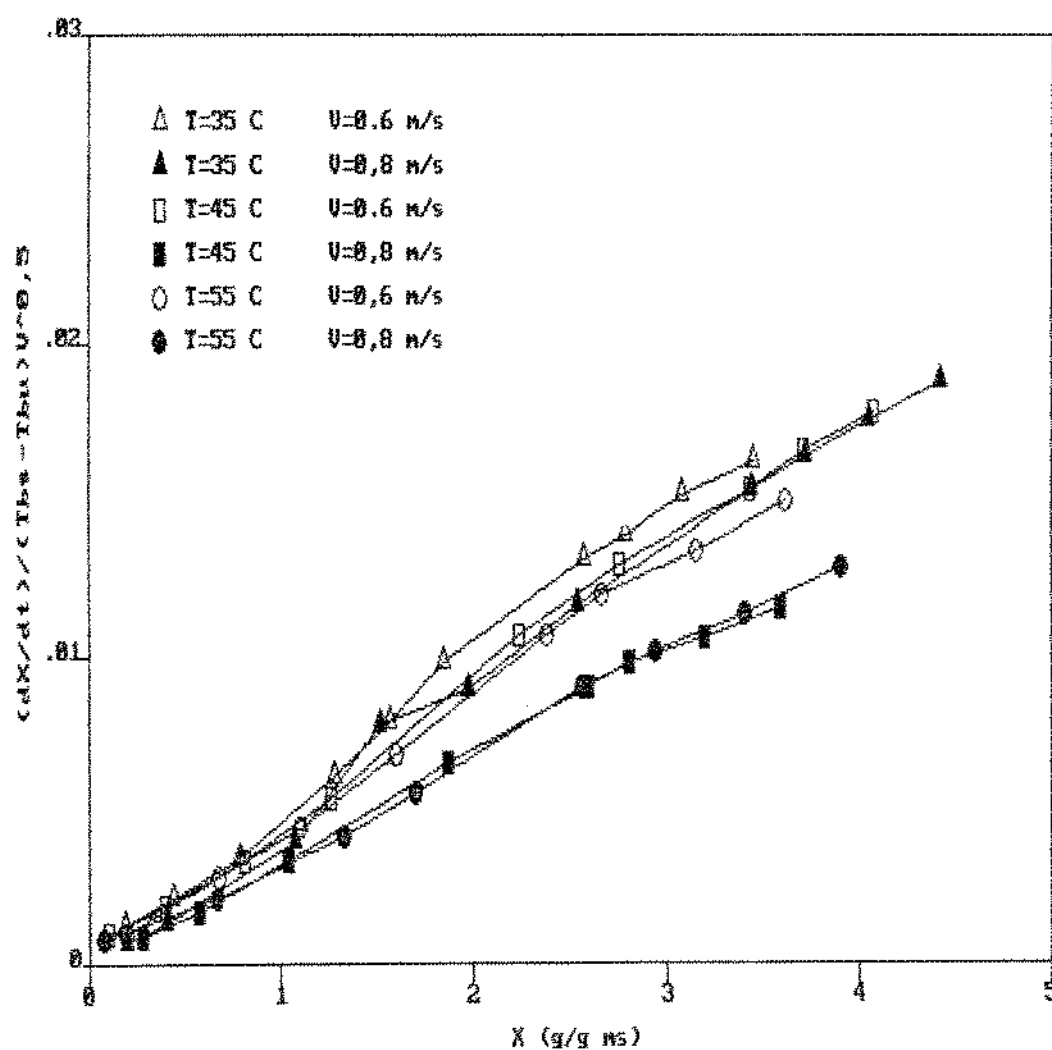


FIGURA 4.10 - Normalização das curvas de secagem pela adimensionalização das taxas em função do conteúdo de umidade para a 1^a fase das curvas de secagem

O mesmo modelo foi aplicado aos dados da primeira fase do período de taxa decrescente cujos valores foram calculados no item 4.10.3.. Os resultados apresentados na Figura 4.10 mostram que também neste caso o modelo não promove a normalização dos dados experimentais.

4.10.2. Normalização através da Adimensionalização

Os adimensionais calculados conforme sugerido por PARK (1990) estão mostrados na Tabela 4.45.

Os valores de número de Biot de calor, Bi_q , mostram que as resistências externas à transferência de calor podem ser desprezadas. Os valores de número de Biot de massa, Bi_m , mostram que as resistências externas à transferência de massa não são desprezíveis, se for levada em conta a analogia com transferência de calor. Uma confirmação desses dados são as análises feitas com relação as variações da difusividade efetiva em função da velocidade do ar, mostrados na Tabela 4.38.

Com a equação [32], através do método de regressão não linear, segundo procedimento NLIN do SAS, foi possível estimar a constante e os expoentes dos grupos adimensionais. Apesar de alguns parâmetros terem sido estimados com desvios assintóticos relativamente altos, foi possível verificar a baixa influência dos adimensionais de Bi_m , Bi_q e Ko cujos expoentes estimados variaram de 0,08 à 0,15.

TABELA 4.45 - Valores dos numeros adimensionais de Biot de calor (Bi_q), Biot de massa (Bi_m), Fourier (Fo) e Kossovich (ko) em função dos adimensionais de conteúdo de umidade e concentração para as condições experimentais

ADX	ADC	Fo _{HX}	Fo _{HC}	Bi _{qx}	Bi _{qc}	Bi _{HX}	Bi _{HC}	Ko
0,9140	0,8524	0,0078	0,0134	0,2001	0,1631	4,3700	4,7561	0,5591
0,9091	0,8457	0,0086	0,0164	0,2340	0,1835	5,3261	5,4518	0,3410
0,8895	0,8164	0,0080	0,0154	0,2279	0,1582	3,6010	3,6037	0,3558
0,8881	0,8162	0,0096	0,0180	0,2454	0,1941	5,1700	5,2560	0,2774
0,8713	0,7963	0,0132	0,0276	0,2719	0,2061	12,8220	14,1710	0,2075
0,8706	0,7953	0,0127	0,0255	0,2658	0,2045	6,9478	12,8950	0,1882
0,8405	0,7536	0,0172	0,0329	0,2340	0,1835	5,3261	5,4518	0,3410
0,8365	0,7477	0,0156	0,0269	0,2001	0,1631	4,3700	4,7561	0,5591
0,8022	0,7064	0,0186	0,0358	0,2279	0,1582	3,6010	3,6037	0,3558
0,7758	0,6795	0,0192	0,0360	0,2454	0,1941	5,1700	5,2560	0,2774
0,7721	0,6746	0,0234	0,0403	0,2001	0,1631	4,3700	4,7561	0,5591
0,7506	0,6597	0,0263	0,0552	0,2719	0,2061	12,8220	14,1710	0,2075
0,7386	0,6388	0,0253	0,0487	0,2279	0,1582	3,6010	3,6037	0,3558
0,7333	0,6421	0,0254	0,0511	0,2658	0,2045	6,9478	12,8950	0,1882
0,7156	0,6198	0,0288	0,0539	0,2454	0,1941	5,1700	5,2560	0,2774
0,6712	0,5805	0,0372	0,0712	0,2340	0,1835	5,3261	5,4518	0,3410
0,6510	0,5702	0,0381	0,0766	0,2658	0,2045	6,9478	12,9050	0,1882
0,6507	0,5700	0,0395	0,0828	0,2719	0,2061	12,8220	14,1710	0,2075
0,5631	0,4921	0,0545	0,0941	0,2001	0,1631	4,3700	4,7561	0,5591
0,5399	0,4800	0,0602	0,1150	0,2340	0,1835	5,3261	5,4518	0,3410
0,5210	0,4612	0,0620	0,1190	0,2279	0,1582	3,6010	3,6037	0,3558
0,5092	0,4581	0,0649	0,1214	0,2454	0,1941	5,1700	5,2560	0,2774
0,4375	0,4000	0,0880	0,1690	0,2279	0,1582	3,6010	3,6037	0,3558
0,4328	0,4162	0,0889	0,1780	0,2658	0,2045	6,9478	12,9050	0,1882

TABELA 4.45 - Valores dos numeros dimensionais de Biot de calor (Bi_q), Biot de massa (Bi_m), Fourier (Fo) e Kossovich (Ko) em função dos dimensionais de conteúdo de unidade e concentração para as condições experimentais (cont.)

ADX	ADC	Fo_{HX}	Fo_{HC}	Bi_{qX}	Bi_{qC}	Bi_{mX}	Bi_{mC}	Ko
0,4309	0,4025	0,0860	0,1478	0,2002	0,1631	4,3700	4,7561	0,5591
0,4274	0,4134	0,0922	0,1931	0,2719	0,2061	12,8220	14,1710	0,2075
0,3531	0,3500	0,1199	0,2304	0,2279	0,1582	3,6010	3,6037	0,3558
0,3317	0,3533	0,1251	0,2621	0,2719	0,2061	12,8220	14,1710	0,2075
0,3267	0,3360	0,1013	0,1747	0,2001	0,1631	4,3700	4,7561	0,5591
0,2954	0,3214	0,1410	0,2711	0,2340	0,1835	5,3261	5,4518	0,3410
0,2947	0,3291	0,1397	0,2010	0,2658	0,2045	6,9478	12,0950	0,1882
0,2749	0,3061	0,1442	0,2697	0,2454	0,1941	5,1700	5,2560	0,2774
0,2243	0,2675	0,1792	0,3090	0,2001	0,1631	4,3700	4,7561	0,5591
0,2079	0,2500	0,1879	0,3609	0,2279	0,1582	3,6010	3,6037	0,5591
0,1821	0,2404	0,1977	0,3780	0,2340	0,1835	5,3261	5,4518	0,3410
0,1755	0,2437	0,1905	0,3831	0,2658	0,2045	6,9478	12,0950	0,1882
0,1600	0,2315	0,1976	0,4139	0,2719	0,2061	12,8220	14,1700	0,2075
0,1410	0,2031	0,2211	0,4135	0,2454	0,1941	5,1700	5,2560	0,2774
0,1043	0,1600	0,2479	0,4761	0,2279	0,1582	3,6010	3,6037	0,3558
0,0791	0,1390	0,2693	0,5148	0,2340	0,1835	5,3261	5,4518	0,3410
0,0607	0,1212	0,3039	0,5240	0,2001	0,1631	4,3700	4,7561	0,5591
0,0582	0,1088	0,2980	0,5573	0,2454	0,1941	5,1700	5,2560	0,2774
0,0392	0,0846	0,3048	0,6130	0,2658	0,2045	6,9478	12,0950	0,1882
0,0295	0,0500	0,3118	0,5990	0,2279	0,1582	3,6010	3,6037	0,3558
0,0196	0,0422	0,3715	0,6405	0,2001	0,1631	4,3700	4,7561	0,5591
0,0059	0,0156	0,3029	0,6346	0,2719	0,2061	12,8220	14,1710	0,2075
0,0049	0,0119	0,3482	0,6655	0,2340	0,1835	5,3261	5,4518	0,3410

À partir desses resultados foram testados três modelos, nos quais os grupos adimensionais foram agrupados na tentativa de encontrar um melhor ajuste aos dados experimentais. Esses modelos são:

$$\frac{C - C_e}{C_o - C_e} = a (Bi_m Fo_m)^b (Bi_q Ko)^c \quad [\text{MOD. 1}]$$

$$\frac{C - C_e}{C_o - C_e} = a \left(\frac{Bi_m}{Bi_q} \right)^b (Fo_m)^c (Ko)^d \quad [\text{MOD. 2}]$$

$$\frac{C - C_e}{C_o - C_e} = a \left(\frac{Bi_m}{Bi_q Ko} \right)^b (Fo_m)^c \quad [\text{MOD. 3}]$$

Na tentativa de obter um melhor ajuste dos dados experimentais foram testados outros modelos, que são:

$$\left(\frac{C - C_e}{C_o - C_e} \right) / \left(\frac{Bi_m}{Bi_q Ko} \right)^{0,4} = \exp (a + b Fo_m) \quad [\text{MOD. 4}]$$

$$\left(\frac{C - C_e}{C_o - C_e} \right) / \left(\frac{Bi_m}{Bi_q Ko} \right)^{0,1} = a \exp (Fo_m)^b \quad [\text{MOD. 5}]$$

$$\left(\frac{C - C_e}{C_o - C_e} \right) / \left(\frac{Bi_m}{Bi_q Ko} \right)^{0,8} = \exp (a + b Fo_m) \quad [\text{MOD. 6}]$$

$$\left(\frac{C - C_e}{C_o - C_e} \right) / \left(\frac{Bi_m}{Bi_q Ko} \right)^{0,8} = a \exp (Fo_m)^b \quad [\text{MOD. 7}]$$

$$\left(\frac{C - C_e}{C_o - C_e} \right) / \left(\frac{Bi_m}{Bi_q Ko} \right)^{0,1} = \exp [a + b Fo_m + c (Fo_m)^2 + d (Fo_m)^3] \quad [\text{MOD. 8}]$$

Os valores dos parâmetros estimados por regressão não linear, para os oito modelos propostos, são apresentados na Tabela 4.46. As Figuras B.34 à B.41, do Anexo B, permitem visualizar melhor o ajuste dos modelos aos dados experimentais.

Verifica-se portanto, que o [mod.8] é o que apresentou a melhor concordância podendo ser considerado o modelo ideal para a normalização das curvas de secagem de batata nas condições dos experimentos.

TABELA 4.46 - Valores dos parâmetros estimados por regressão não linear para 8 modelos em função do adimensional de concentração

MODELO	parâmetros estimados (DPA)			
	a	b	c	d
MOD.1	0,0764 (0,0332)	-0,3624 (0,0297)	-0,5529 (0,1461)	-
MOD.2	0,1165 (0,0303)	0,0752 (0,0857)	-0,4169 (0,0821)	-
MOD.3	0,1684 (0,0364)	0,0088 (0,0843)	-0,4067 (0,0239)	-
MOD.4	-0,6594 (0,0203)	-3,9307 (0,1874)	-	-
MOD.5	0,0502 (0,0034)	-0,2186 (0,0092)	-	-
MOD.6	-0,6594 (0,0285)	-3,9307 (0,2635)	-	-
MOD.7	0,0554 (0,0038)	-0,2179 (0,0092)	-	-
MOD.8	0,5398 (0,0101)	-2,6318 (0,1776)	6,1818 (0,6890)	-5,2484 (0,7087)

Este modelo também foi utilizado considerando o adimensional de conteúdo de umidade, $(X - X_e)/(X_0 - X_e)$. Entretanto, os parâmetros foram estimados com desvios assintóticos muito altos, de 30 a 200 %, não ajustando os dados das curvas de secagem conforme Figura B.42, do Anexo B.

5. CONCLUSÕES

- A condutividade térmica, determinada pelo método da sonda, é uma função do conteúdo de umidade (bu) da batata, sendo que o modelo que expressa esta correlação é:
 $k = \exp(-1,77 + 1,13 \text{ UD}) \text{ (W/m.K)}$, com 11% de erro, válido para conteúdo de umidade entre 60 e 90% e temperatura na faixa de 20 à 27 °C.

- Para o ajuste dos dados experimentais das isotermas de dessorção, nas temperaturas de 35,45 e 55°C e na faixa de umidade relativa variando de 0,0427 à 0,6999, o melhor modelo foi o de BET linearizado, isto é, modelo de BET com número de camadas monomoleculares tendendo à infinito.

- Para a relação das áreas de superfície no encolhimento, durante o processo de secagem, não foi possível o ajuste segundo os modelos encontrados na literatura. A melhor correlação obtida foi uma equação de 2º grau da razão do conteúdo de umidade (X/X_0). Para a razão dos volumes em função do conteúdo de umidade, também foi obtida boa correlação utilizando a equação de 2º grau.

- A determinação da difusividade efetiva, utilizando modelo difusional com cinco termos da série, foi suficiente para ajustar os dados experimentais expressos pelo adimensional de conteúdo de umidade com raio inicial ou raio médio aritmético, assim como utilizando adimensional de concentração com raio médio aritmético. O melhor ajuste foi verificado com o adimensional de concentração.

- Os valores de difusividade efetiva mostraram ser sensíveis ao aumento de temperatura para uma mesma velocidade do ar, resultando, para o modelo difusional com raio inicial, em energia de ativação de 18,2 KJ para velocidade do ar de 0,6 m/s e 29,4 KJ para 0,8 m/s. Com o modelo difusional e raio médio os valores encontrados foram de 17,2 KJ para 0,6 m/s e 22,0 KJ para 0,8 m/s. A melhor correlação foi obtida através do modelo difusional aplicado à adimensional de concentração de umidade, resultando em energia de ativação de 14,3 KJ para velocidade do ar de 0,6 m/s e 20,4 KJ para 0,8 m/s.

- A difusividade efetiva é superestimada se não levar em consideração o encolhimento. Os valores desta, ajustados através de raio médio corrigiu essa distorção.

- A regressão linear do logaritmo Neperiano do adimensional de conteúdo de umidade em função do tempo, superestima o valor da difusividade efetiva, uma vez que a utilização somente do primeiro termo da série do modelo

difusional é recomendado apenas para períodos longos de secagem.

- O modelo empírico de secagem que estima o conteúdo de umidade crítica, não se mostrou adequado ao ajuste das curvas de secagem de batata.

- A normalização dos dados de secagem utilizando o adimensional da taxa de secagem não mostrou agrupamento das curvas numa única curva básica.

- A normalização dos dados experimentais através de adimensional de concentração em função dos números adimensionais de Biot de calor, Biot de massa, Fourier e Kossovich, mostrou bons resultados, sendo que o melhor modelo obtido foi:

$$(C-C_e)/(C_0-C_e) = [Bi_m / (Bi_q Ko)]^{-0,1} \exp [a + b Fo_m^2 + c Fo_m^3 + d Fo_m^3]$$

- Os valores numéricos de Biot de calor mostraram que as resistências externas à transferência de calor podem ser desprezadas. Entretanto, os valores numéricos de Biot de massa confirmam a existência das resistências externas à transferência de massa, mostradas através da análise dos incrementos nos valores de difusividade efetiva em função das velocidades do ar de secagem.

6. 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).

AGUERRE, R.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P.E. Drying kinetics of rough rice grain. J. Food Techol., 17:678-86, 1982.

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, Viçosa, 5(1):5-18, 1980.

A.O.A.C. (Association of Official Analytical Chemists) Official methods of analysis. 14ed., Arlington, 1984.

A.O.C.S. (American Oil Chemists' Society) Official and tentative methods. 3ed., Champaign, 1977. v.1.

- BIAGI, J.D. & SILVA, I.J.O. da Software para determinar as propriedades psicrométricas do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, XIX, Piracicaba, 1990. ANAIS. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1990. p.1161-75.
- BRUNAUER, S.; EMMETT, T.H.; TELLER, F. Adsorption of gases in multimolecular layers. G. Am. Chem. Soc., 60(2):309-19, 1938.
- CANEDO, E.L.; MARSON, J.S.; CALVELLO, A. Metodo de la sonda para la determinacion de conductividad termica en carne. Universidad Nacional de La Plata, 1975. 23p. (CIDCA publ. int..80).
- CARSLAW, H.S. & JAEGER, J.L. Conduction of heat in solids. 2. ed.. Oxford, Clarendon Press, c1959. 509p.
- CHARM, S.E. Dehydration of foods. In: ----. The fundamentals of food engineering. Westport, AVI publ., 1963, p.252-307.
- CHEN, C.S. Equilibrium moisture curves for biological materials. Trans. ASAE, St. Joseph, MI, 14(5):924-26, 1971.

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.

DAVIDOVICH, L.A.; BOERI, L.R.; LUPIN, H.M. Determinacion de la conductividad termica en filet y desmenuzado de merluza. Rev. Latinoam. Transf. Cal. Mat., 2:63-70, 1978.

FORNELL, A.; BIMINET, J.J.; ALMIN, Y. Experimental study and modelization for air drying of vegetables products. Lebensm. - Wiss.u. - Technol. 14(2):96-100, 1980.

GÁL, S. Recent advances in techniques for determination of sorption isotherms. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM, Glasgow, 1974. Proceedings of an ... London, Academic, 1975. p.139-54.

GABITTO, J.F. & AGUERRE, R.J. Solucion numerica del proceso de secado con cambio de volumen. Rev. Latinoam. Transf. Cal. Mat., 9:231-40, 1985.

GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. J. Res. Nat. Bur. Stnds., 81(1):89-96, 1977.

- GUSTAFSON, R.J. & HALL, G.E. Equilibrium moisture content of shelled corn from 50 to 155 F. Trans. ASAE, 17(1):120-24, 1974.
- HALSEY, G. Physical adsorption in non-uniform surfaces. J. Chem. Phys., 16(10):931-7, 1948.
- HOOPER, F.C. & LEPPER, F.R. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. Trans. ASHVE, 56:309-22, 1950.
- HOUGH, E.G. & CALVELO, A. Parametros de medicion de conductividad termica en alimentos congelados por el metodo de la sonda. Rev. Latinoam. Trans. Cal. Mat., 2:71-86, 1978.
- IGLESIAS, H.A.; CHIRIFE, J.; LOMBARDI, J.L. An equation for correlating equilibrium moisture content. J. Food Techol., 10:289-97, 1975.
- IGLESIAS, H.A. & 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).

KEEY, R.B. Moisture: solid relationships. In: ----. Drying principles and practices. Oxford, 1972. p.19-49.

KILPATRICK, P.W.; LOWE, E.; van ARSDEL, W.B. Tunnel dehydrators for fruits and vegetables. In: ----. Advances in food research. New York, Academic Press, 1955. v.6, p.360.

KRISCHER, O. & KRÖLL, K. In: ----. Trocknungstechnik. Berlin, Springer-Verlag, 1976. Bd.1, p.254.

KUMAR, K.R. & BALASUBRAMANYAM, N. Moisture sorptin 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.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases an plane surfaces of glass, mica and platinum J. Am. Chem. Soc., 40:1361-1403, 1918.

LEES, R. Food analysis: analytical and quality control methods for the food manufacturer and buyer. 3.ed., London, Leonard Hill, 1975. p.45,121-22.

LENTZ, C.P. & BERG van der L. Thermal conductivy data for food their significance and use. Tran. ASHRAE, 83:533-40, 1977.

LEWIS, W.K. The rate drying of solid material. 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 and 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.
- LONCIN, M. Equations relatives aux transferts the matière, chaleur et quantité de mouvement. In: ----. Génie industriel alimentaire: aspects fondamentaux. Paris, Masson, 1976. p.16-26.
- LOZANO, J.E.; ROTSTEIN, E.; URBISCAIN, M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contentes. J. Food Sci., 48(5):1497-1553, 1983.
- LUIKOV, A.V. & MIKHAILOV, Y.O. Theory of energy and mass transfer. Oxford, Pergamon, 1965. p.329.
- MAROULIS, Z.B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D.; SARAVACOS, G.D. Application of the GAB model of 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. & Le MAUGER, M. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. J. Food Technol., 15(2):181-94, 1980.
- McADAMS, W.H. Natural convection. In: ----. Heat transmission. New York, McGraw-Hill, 1954. p.176-7.
- MURPHY, C.E.G. Similitude in engineering. New York, Ronald Press Co., 1950. 302p.
- NGODDY, P.O. & BAKER-ARKEMA, F.W. A generalized theory of sorption phenomena in biological materials. Part I. the isotherms equations. Trans. ASAE, 13:612-7, 1970.
- NIX, G.H.; LOWERY, G.W.; VACHON, R.I.; TANGER, G.E. Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined line-source technique. In: Progress in aeronautics and astronautics; thermophysics of spacecraft and planetary bodies. Academic Press, New York, 1967. p. 665-78.

- NOGUEIRA, R.I. Processo de secagem de banana (*Musa acuminata* subgrupo Cavendish cultivar Nanica): Parâmetros ótimos na obtenção de banana-passa, Campinas, 1991. 158 p. (Tese de mestrado - Faculdade de engenharia Agrícola).
- NOGUEIRA, R.I.; PARK, K.J.; CORNEJO, F.E.P. Application of the BET and GAB models in the isotherms of the sorption for banana. J. Food Eng., 91-572 (no prelo).
- PARK, K.J. Metodos matemáticos na engenharia de alimentos. Campinas, 1980. Fundação Tropical de Pesquisas e Tecnologia. 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. Cinética de secagem, Campinas, 1990 (Apontamentos do curso de pós-graduação - FEAGRI/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.

- PASSOS, E.F.; FORTES, M.; MELLO, J.C. Condutividade térmica da pasta de mandioca. Rev. Ceres, 29(162):222-31, 1982.
- PERRY'S Chemical Engineers' Handbook. 6.ed. New York. McGraw-Hill, c1984. 1 v. (várias paginações).
- POWELL, R.W. Further Experiments on the evaporation of water from saturated surfaces. Trans. Ind. Chem. Eng., 18:36-55, 1940.
- QASHOU, M.; NIX, G.H.; VACHON, R.I.; LOWERY, G.W. Thermal conductivity values for ground beef and chuck. Food Technol., 24:493-96, 1970.
- RAO, M.O.; BARNARD, J.; KENNY, J.F. Thermal conductivity and thermal diffusivity of process variety squash and whith potatoes. Trans. ASAE, 18:1188-92, 1975.
- SCHAR, W. & RUEGG, M. The evaluation of GAB constants from water vapor sorption data. Lebensm.-Wiss.u.-Technol., 18(4):225-9, 1985.
- SCHIPPERS, P.A. The relationship between specific gravity and percentage dry matter in potato tubers. Am. Potato J., Orono, 53(4):111-22, 1976.

- SHARMA, D.K. & THOMPSON, T.L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. Trans. ASAE, 16(1):114-17, 1973.
- 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, Willey, 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 Breash Science, c1986. v.3, p.68-98.
- SUZUKI, K.; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T.; HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root vegetables. J. Food Sci., 41(5): 1189- 93, 1976.

- SWEAT, V. E.; HAUGH, C.G.; STADELMAN, W.J. Thermal conductivity of chicken meat at temperatures between - 75 and 20°C. J. Food Sci., 38:158-60, 1973.
- SWEAT, V.E.; Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. J. Food Sci., 39:1080-83, 1974.
- TEIXEIRA NETO, R.O. & QUAST, D.G. Isotemas de adsorção de umidade em alimentos. Colet. Inst. Tec. 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.B. Drying. In: ----. Mass Transfer operations. New York, McGraw-Hill, 1968. p.569-75.
- UNDERWOOD, W.M. & MCTARGGART, R.B. The thermal conductivity of several plastics measured by an unsteady state method. Chem. Eng. Progr. Sym. Series., 56(30):261-68, 1960.
- van ARSDEL, W.B.; COPLEY, M.J.; MORGAN, A.I. Drying phenomena. In: ----. Food dehydration: drying methods and phenomena. 2.ed., Wesport, AVI publ.,1973. v.1, p.22-57.

- van der BERG, C. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. In: ----. Engineering and Food. London, B.M. McKenna, Elsevier Applied Science, 1984. v.1, p.311-21.
- van der HELD, E.F.M. & van DRUNEN, F.G. A method of measuring the thermal conductivity of liquids. Physica, 15(10):865-81, 1949.
- van der HELD, E.F.M.; HARDEBOL, J.; KALSHOVEN, J. On the measurement of the thermal conductivity of liquids by a non-stationary method. Phycica, 19:208-16, 1953.
- YOUNG, J.F. Humidity control in the laboratory using salt solutions - A review. J. appl. Chem., 17(9):241-45, 1967.
- YOUNG, J. H. Evaluation of models to describe sorption and desorption equilibrium moisture contents isotherms of Virginia-type peanuts Trans. ASAE, 19(1):146-50, 1976.

ANEXOS

ANEXO A

TABELA A.1 - Condutividade Termica, Composicao (b.u.), Densidade e Temperatura de batata

AMOSTRA	K (W/m°C)	TEMP (°C)	UM	DEN (g/m³)	AM	AC	PRO	FI	CI	GO
1	0,4297	26,7	0,8136	989	0,1251	0,0222	0,0233	0,0058	0,0095	0,0005
2	0,7975	24,1	0,8484	1147	0,1305	0,0231	0,0243	0,0060	0,0099	0,0005
3	0,6327	26,2	0,8179	1031	0,1228	0,0226	0,0223	0,0054	0,0085	0,0005
4	0,2394	24,7	0,6045	1108	0,0908	0,0167	0,0165	0,0040	0,0063	0,0004
5	0,5399	25,9	0,8282	1174	0,1179	0,0185	0,0210	0,0054	0,0084	0,0006
6	0,6825	24,3	0,8310	1156	0,1183	0,0186	0,0211	0,0054	0,0084	0,0006
7	0,6712	25,4	0,8146	1070	0,1301	0,0215	0,0190	0,0049	0,0095	0,0004
8	0,5032	23,2	0,6918	1189	0,1105	0,0183	0,0161	0,0042	0,0081	0,0003
9	0,6746	25,7	0,8248	995	0,1310	0,0086	0,0214	0,0044	0,0094	0,0004
10	0,2090	24,7	0,8037	964	0,1276	0,0084	0,2009	0,0043	0,0092	0,0004
11	0,4157	24,8	0,8156	1068	0,1231	0,0332	0,0136	0,0041	0,0100	0,0004
12	0,1765	24,8	0,0	679	0,6676	0,1800	0,0238	0,0222	0,0542	0,0022
13	0,4511	24,9	0,7873	1067	0,1474	0,0399	0,0144	0,0045	0,0061	0,0004
14	0,4917	23,5	0,8494	935	0,1590	0,0430	0,0155	0,0049	0,0066	0,0004
15	0,3186	21,8	0,8196	1081	0,1227	0,0290	0,0174	0,0035	0,0075	0,0003
16	0,2586	24,3	0,7076	1127	0,1059	0,0250	0,0150	0,0030	0,0065	0,0003
17	0,5297	22,4	0,7974	1029	0,1371	0,0314	0,0187	0,0065	0,0078	0,0011
18	0,2715	25,0	0,8567	1110	0,1473	0,0337	0,0201	0,0070	0,0084	0,0012
19	0,7596	25,1	0,8197	985	0,1422	0,0035	0,0220	0,0051	0,0072	0,0003
20	0,6394	25,3	0,8458	1055	0,1467	0,0036	0,0227	0,0053	0,0074	0,0003
21	0,4739	23,2	0,7935	1041	0,1413	0,0357	0,0162	0,0054	0,0075	0,0004
22	0,3897	22,6	0,7754	1113	0,1381	0,0349	0,0158	0,0053	0,0073	0,0004
23	0,5586	23,7	0,8147	1063	0,1226	0,0353	0,0167	0,0031	0,0072	0,0004
24	0,3696	22,8	0,7992	1049	0,1203	0,0346	0,0164	0,0030	0,0071	0,0004
25	0,3101	25,8	0,7823	1104	0,1489	0,0378	0,0166	0,0065	0,0074	0,0005
26	0,1811	26,4	0,0	1177	0,6840	0,1736	0,0763	0,0299	0,0340	0,0023
27	0,4911	25,5	0,8094	1099	0,1252	0,0345	0,0176	0,0055	0,0074	0,0004
28	0,3668	24,0	0,6824	1214	0,1056	0,0291	0,0148	0,0046	0,0062	0,0003
29	0,4644	21,6	0,8119	1077	0,1199	0,0383	0,0159	0,0057	0,0075	0,0008
30	0,5977	22,9	0,8216	1070	0,1213	0,0388	0,0161	0,0058	0,0076	0,0008
31	0,5263	22,9	0,8207	1065	0,1187	0,0270	0,0197	0,0058	0,0065	0,0008
32	0,4581	23,0	0,7663	968	0,1108	0,0260	0,0184	0,0054	0,0061	0,0007
33	0,3638	24,0	0,7803	991	0,1555	0,0304	0,0213	0,0052	0,0071	0,0002
34	0,6080	23,2	0,8337	1139	0,1661	0,0325	0,0228	0,0056	0,0076	0,0002
35	0,4095	23,8	0,7849	1071	0,1510	0,0334	0,0159	0,0063	0,0074	0,0011
36	0,2315	24,1	0,7878	1263	0,1516	0,0335	0,0160	0,0063	0,0074	0,0011
37	0,5036	25,3	0,8029	1051	0,1306	0,0315	0,0209	0,0055	0,0078	0,0008
38	0,1754	23,6	0,0	1115	0,6626	0,1598	0,1060	0,0279	0,0396	0,0041

TABELA A.1 - Condutividade Termica, Composicao(b.u.), Densidade e Temperatura da batata (cont.)

AMOSTRA	K (W/m°C)	TEMP (°C)	UM	DEN (g/m³)	AM	AC	PRO	FI	CI	GO
39	0,3777	21,5	0,8031	1061	0,1276	0,0328	0,0207	0,0070	0,0082	0,0006
40	0,3175	23,5	0,7881	1129	0,1252	0,0322	0,0203	0,0069	0,0080	0,0006
41	0,5811	26,0	0,8112	1079	0,1252	0,0168	0,0293	0,0081	0,0089	0,0005
42	0,2785	23,7	0,7143	1191	0,1102	0,0148	0,0258	0,0071	0,0078	0,0004
43	0,3544	24,0	0,7954	1105	0,1348	0,0347	0,0187	0,0086	0,0073	0,0005
44	0,5572	24,1	0,8683	1094	0,1472	0,0379	0,0204	0,0094	0,0086	0,0005
45	0,4043	24,6	0,7975	1606	0,1346	0,0322	0,0204	0,0076	0,0072	0,0005
46	0,4216	23,6	0,8585	991	0,1449	0,0347	0,0220	0,0082	0,0070	0,0005
47	0,5975	22,2	0,7836	1067	0,1575	0,0247	0,0164	0,0079	0,0068	0,0004
48	0,1811	26,4	0,0	1003	0,7278	0,1266	0,0758	0,0365	0,0314	0,0018
49	0,5559	21,7	0,8264	997	0,1133	0,0312	0,0163	0,0058	0,0062	0,0000
50	0,2953	21,6	0,7931	1123	0,1087	0,0299	0,0156	0,0056	0,0060	0,0000
51	0,4107	21,9	0,8075	1055	0,1308	0,0325	0,0157	0,0065	0,0064	0,0006
52	0,3554	22,2	0,7588	1034	0,1229	0,0305	0,0148	0,0061	0,0060	0,0006
53	0,6323	21,1	0,8231	1093	0,1172	0,0321	0,0172	0,0048	0,0053	0,0003
54	0,4259	22,3	0,8345	1062	0,1231	0,0337	0,0181	0,0050	0,0056	0,0003
55	0,4678	21,1	0,8013	1040	0,1284	0,0345	0,0194	0,0063	0,0096	0,0005
56	0,2919	22,1	0,7061	1161	0,1131	0,0304	0,0171	0,0056	0,0085	0,0004
57	0,5584	21,8	0,8147	971	0,1204	0,0324	0,0185	0,0052	0,0084	0,0004
58	0,2690	22,3	0,8278	986	0,1223	0,0329	0,0188	0,0053	0,0085	0,0004
59	0,3921	22,8	0,8100	1001	0,1294	0,0314	0,0192	0,0059	0,0081	0,0005
60	0,3520	21,7	0,7938	1100	0,1224	0,0308	0,0188	0,0058	0,0079	0,0005
61	0,4327	21,9	0,7965	1027	0,1340	0,0403	0,0156	0,0062	0,0073	0,0001
62	0,2716	22,2	0,8045	1060	0,1353	0,0407	0,0158	0,0063	0,0074	0,0001
63	0,2827	22,8	0,7963	1041	0,1276	0,0399	0,0216	0,0061	0,0082	0,0003
64	0,1781	24,0	0,0	1238	0,6264	0,1959	0,1060	0,0299	0,0403	0,0015
65	0,5968	21,5	0,7755	1044	0,1496	0,0388	0,0206	0,0069	0,0081	0,0005
66	0,2173	24,9	0,0	948	0,6664	0,1728	0,0918	0,0307	0,0361	0,0022
67	0,4269	21,2	0,7969	956	0,1353	0,0337	0,0184	0,0064	0,0088	0,0005
68	0,2550	20,6	0,7990	884	0,1357	0,0338	0,0184	0,0064	0,0088	0,0005
69	0,4594	22,0	0,8096	1030	0,1182	0,0406	0,0169	0,0068	0,0074	0,0005
70	0,1456	21,5	0,7318	1102	0,1068	0,0367	0,0153	0,0061	0,0067	0,0005
71	0,6347	22,0	0,7696	959	0,1462	0,0508	0,0186	0,0072	0,0069	0,0007
72	0,1834	21,6	0,7379	1167	0,1402	0,0487	0,0178	0,0069	0,0066	0,0007
73	0,4818	21,1	0,7605	1027	0,1593	0,0411	0,0196	0,0066	0,0078	0,0006
74	0,2386	20,8	0,8115	1128	0,1690	0,0436	0,0200	0,0070	0,0083	0,0006
75	0,6089	20,7	0,7997	967	0,1256	0,0360	0,0237	0,0056	0,0087	0,0007
76	0,3355	20,0	0,8383	874	0,1317	0,0377	0,0248	0,0059	0,0091	0,0007

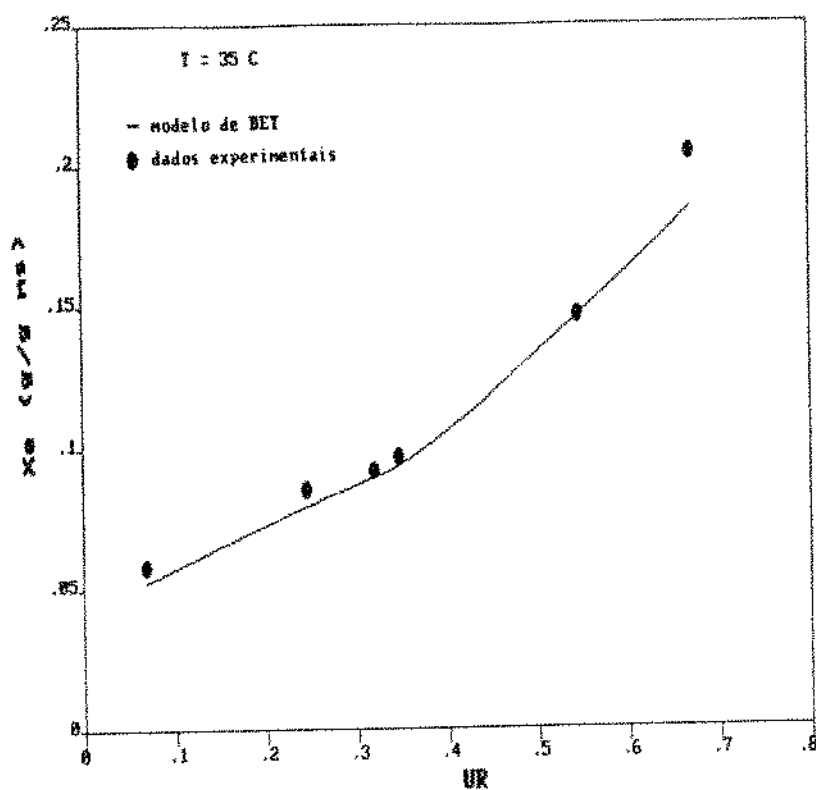


FIGURA B.1-Isotermas de dessorção para 35°C ajustada pelo modelo de BET linearizado

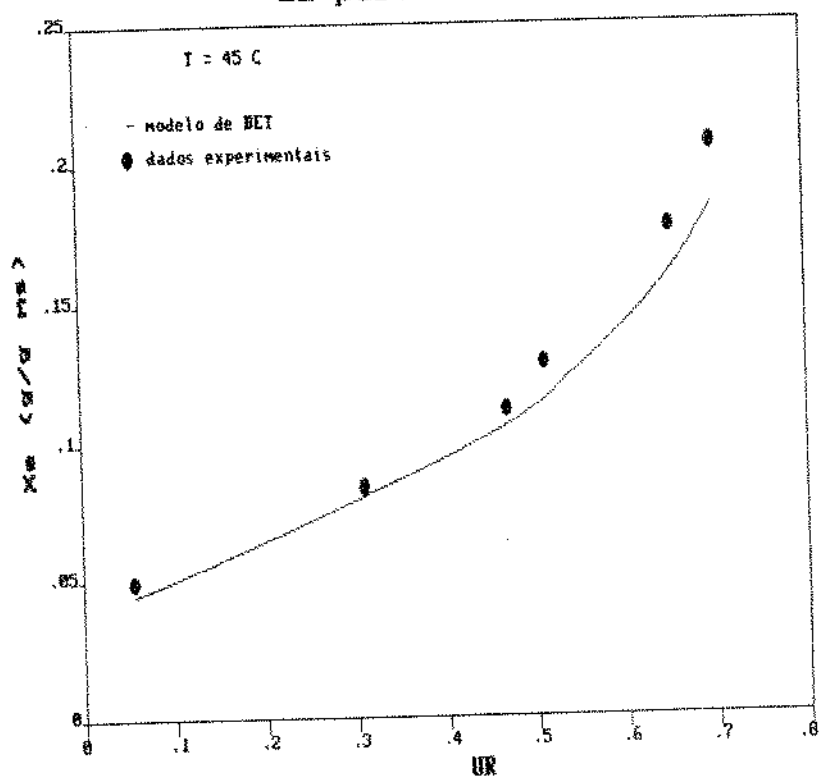


FIGURA B.2-Isoterma de dessorção para 45°C ajustada pelo modelo de BET linearizado

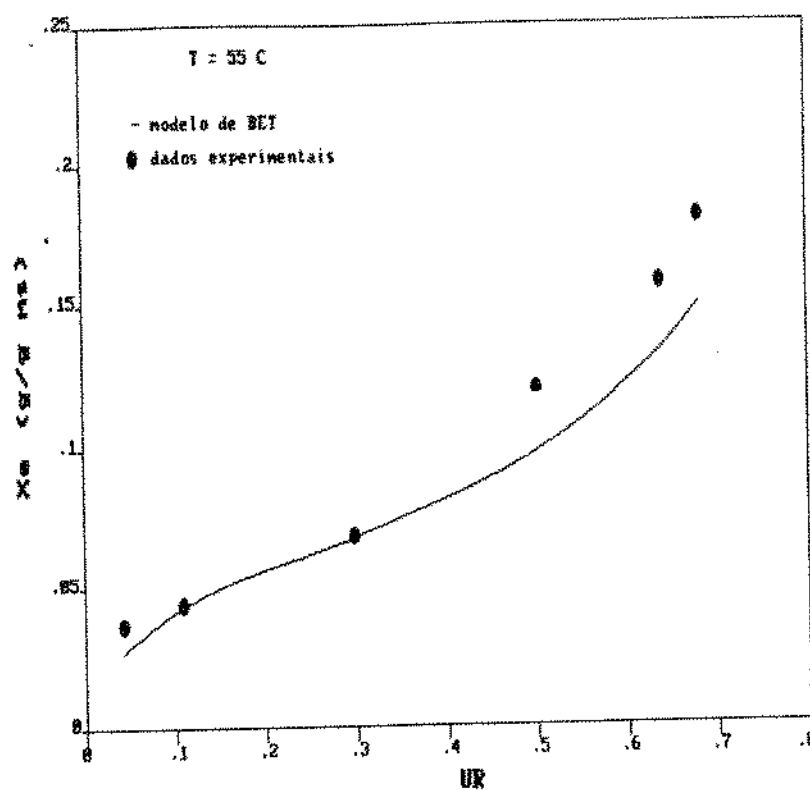


FIGURA B.3- Isotherma de dessorção para 55°C ajustada pelo modelo de BET linearizado

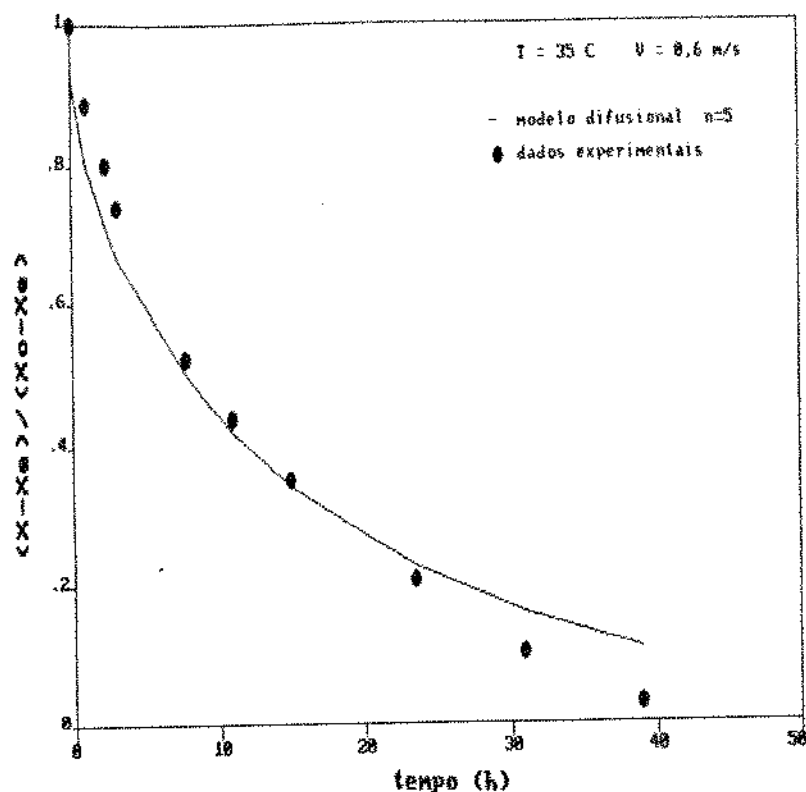


FIGURA B.4-Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 35°C e $0,6\text{ m/s}$

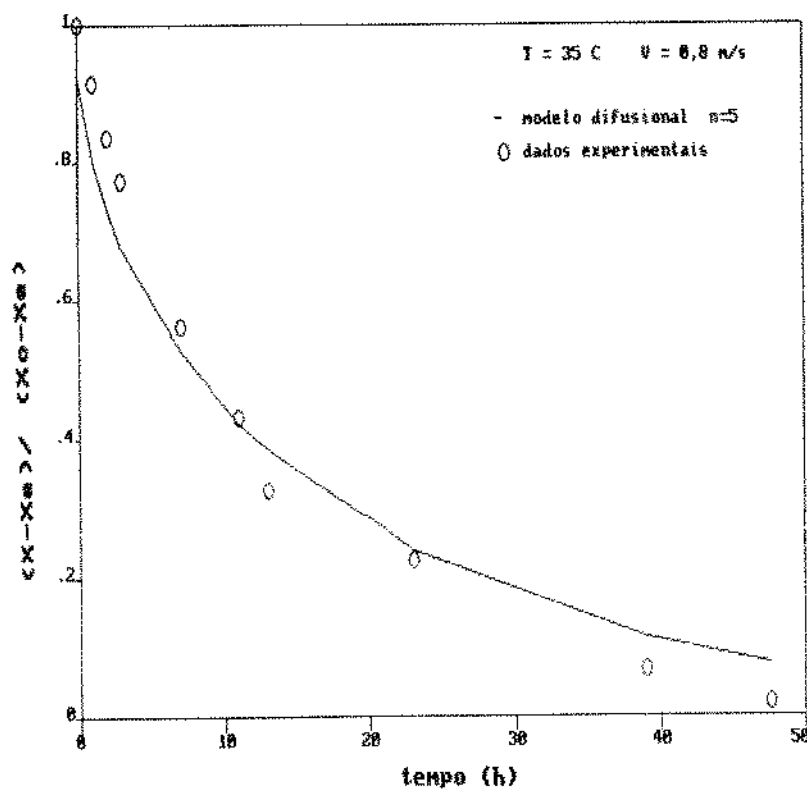


FIGURA B.5-Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 35°C e $0,8\text{ m/s}$

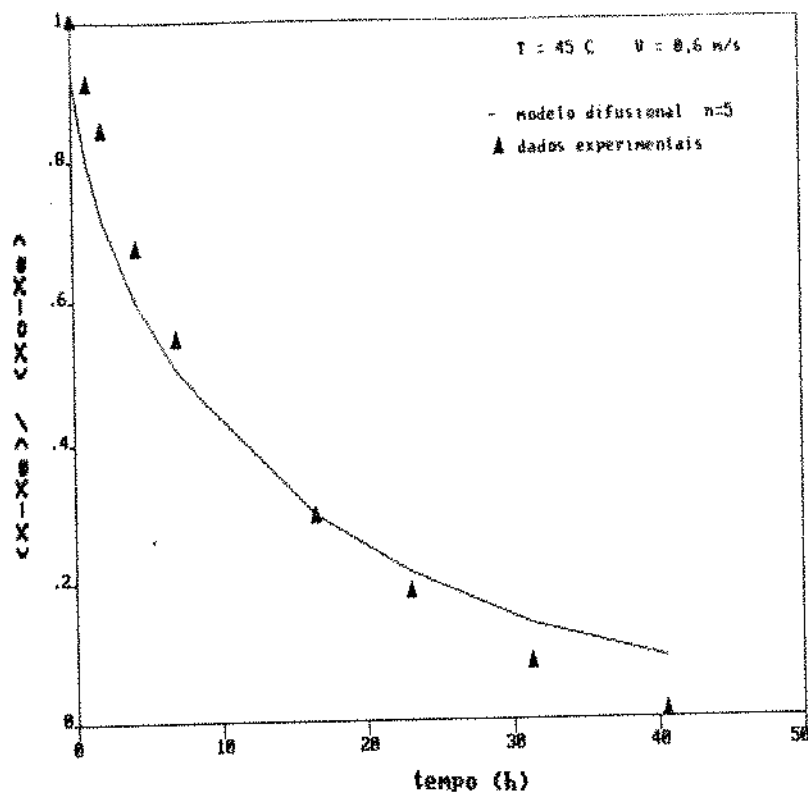


FIGURA B.6-Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 45°C e $0,6\text{ m/s}$

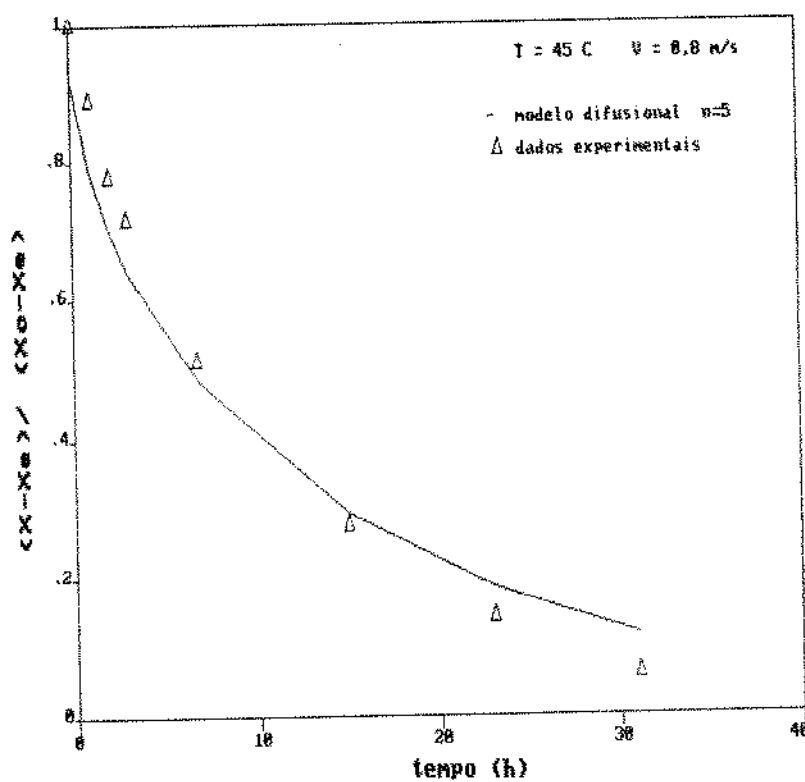


FIGURA B.7-Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 45°C e $0,8\text{ m/s}$

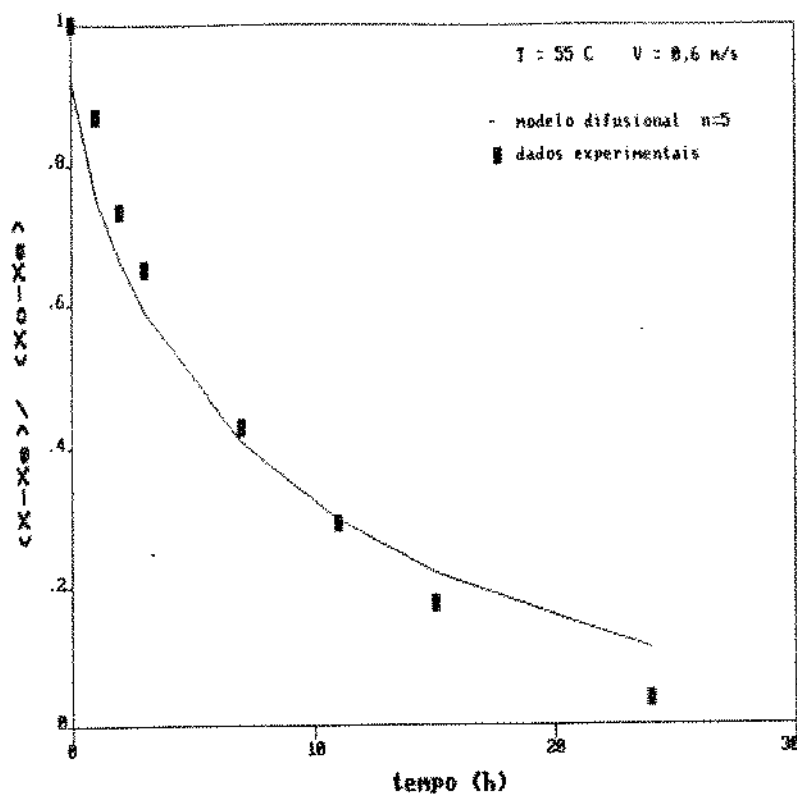


FIGURA B.8-Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 55°C e $0,6\text{ m/s}$

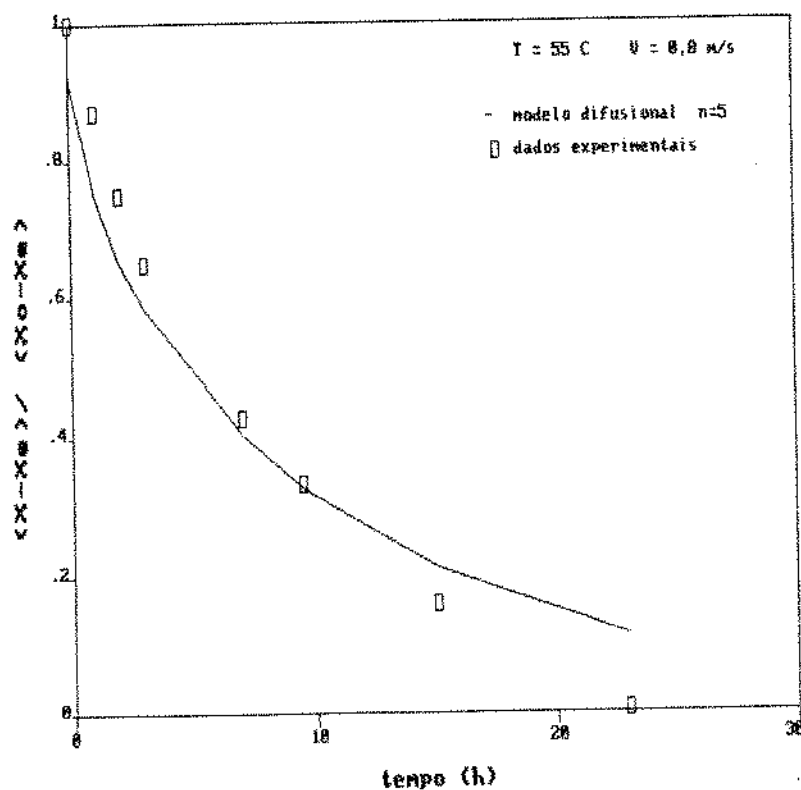


FIGURA B.9-Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional para 55°C e $0,8\text{ m/s}$

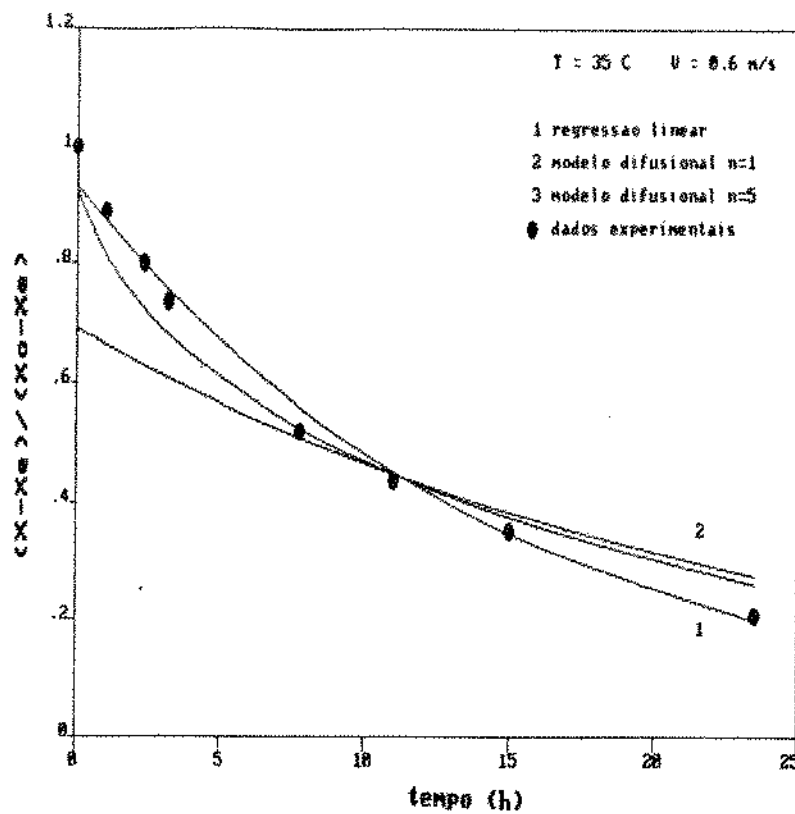


FIGURA B.10-Curva de secagem da 1^a fase para 35°C e $0,6\text{m/s}$

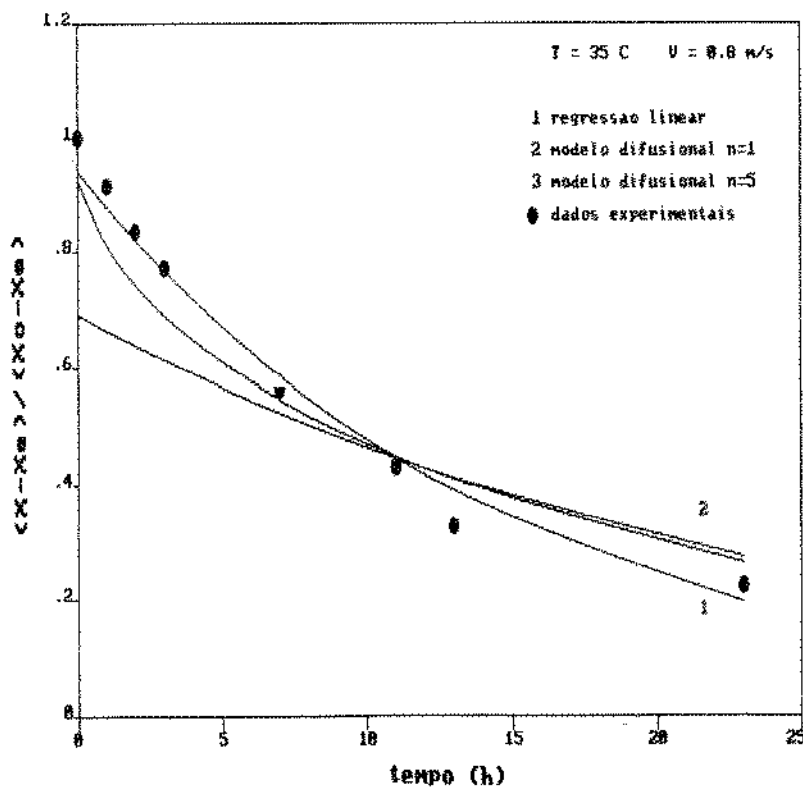


FIGURA B.11-Curva de secagem da 1^a fase para 35°C e $0,8\text{m/s}$

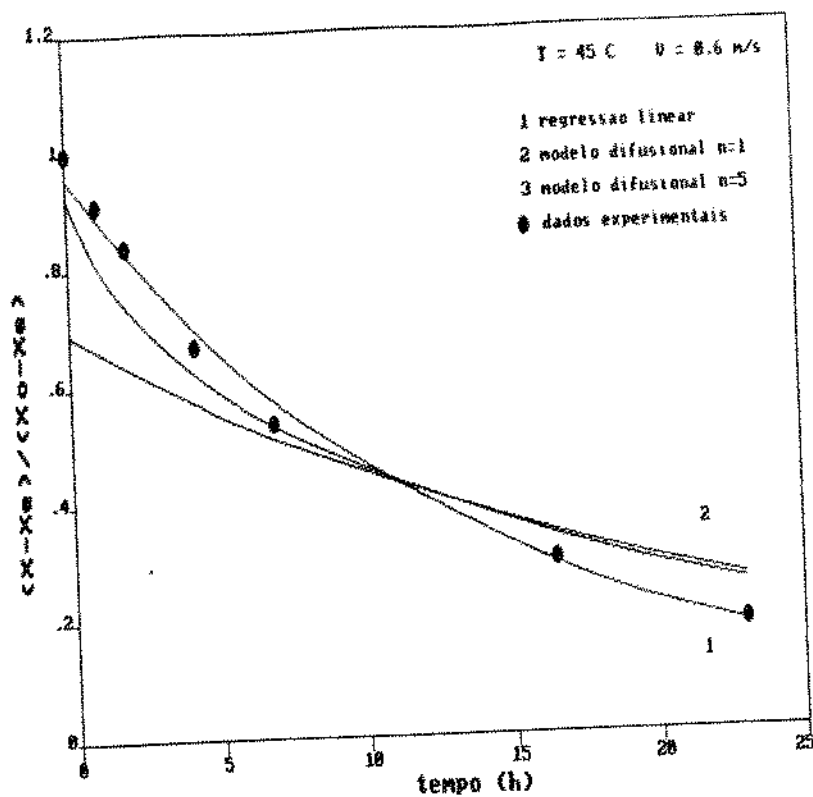


FIGURA B.12-Curva de secagem da 1ª fase para 45°C e 0.6 m/s

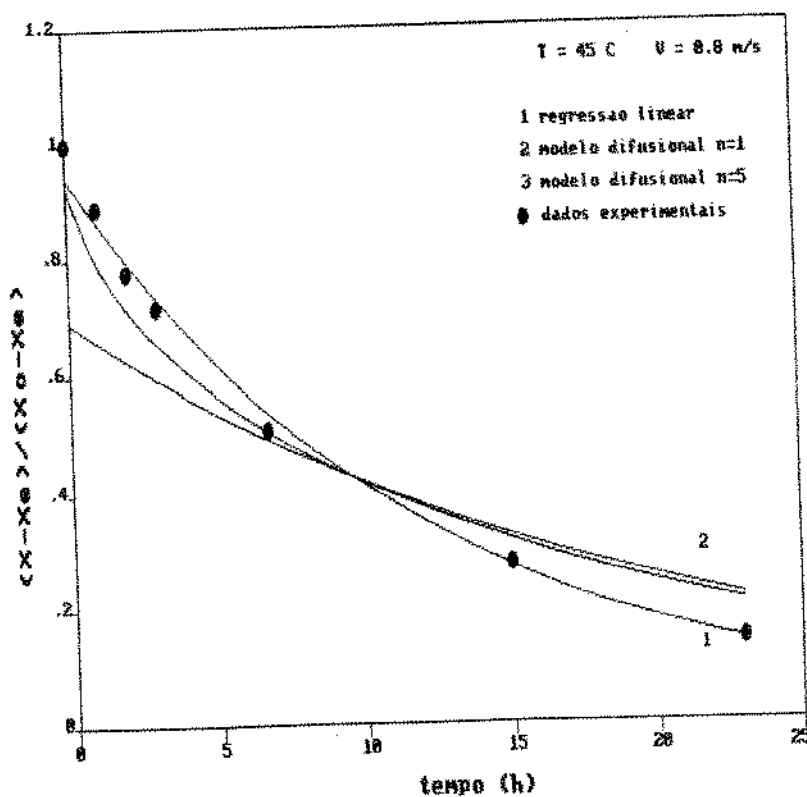


FIGURA B.13-Curva de secagem da 1ª fase para 45°C e 0.8 m/s

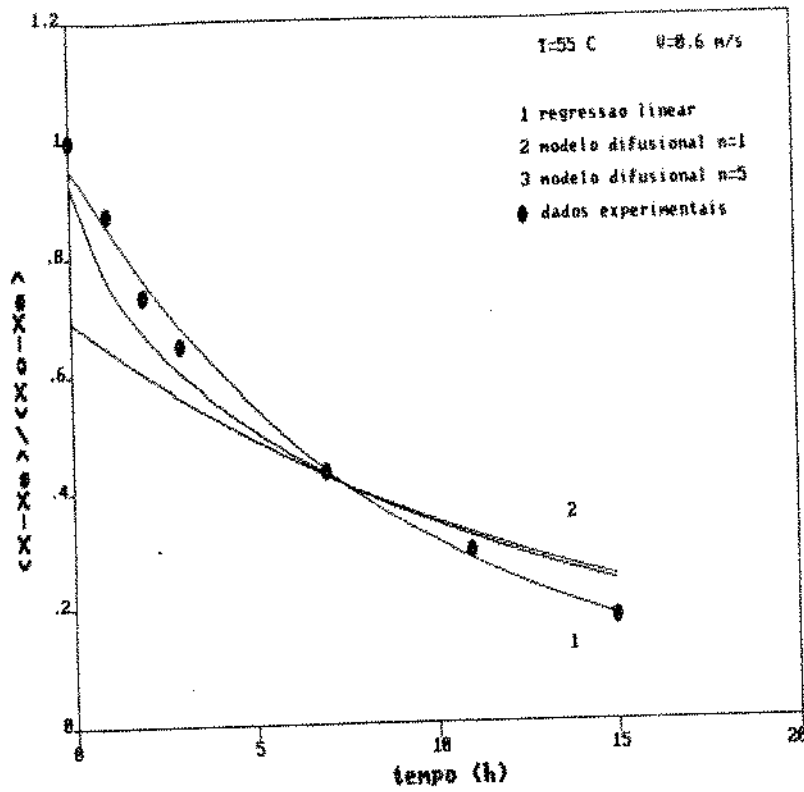


FIGURA B.14-Curva de secagem da 1ª fase para 55°C e 0,6 m/s

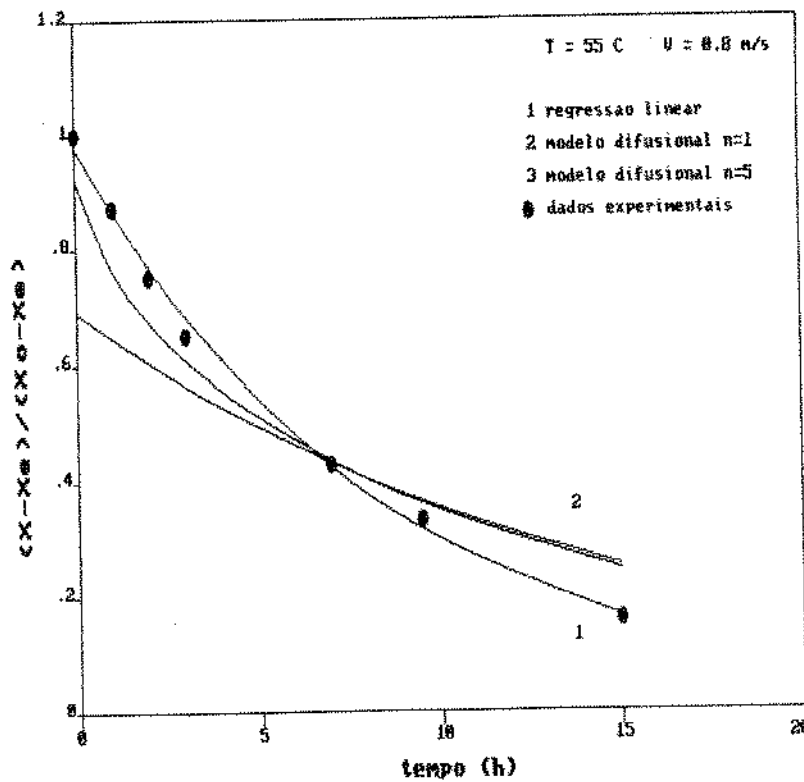


FIGURA B.15-Curva de secagem da 1ª fase para 55°C e 0,8 m/s

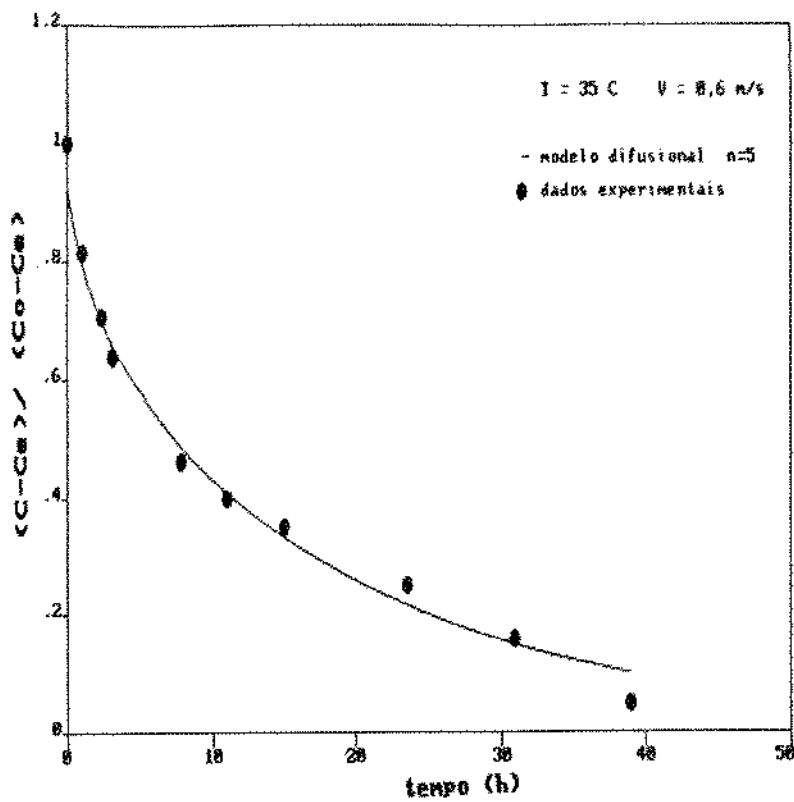


FIGURA B.16-Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional com encolhimento para 35°C e $0,6 \text{ m/s}$

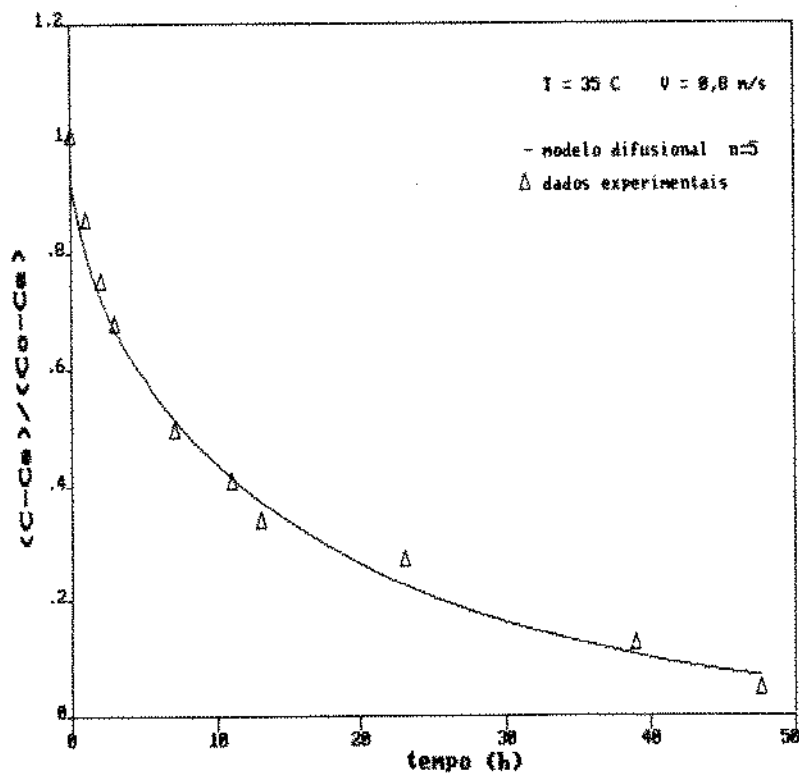


FIGURA B.17-Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional com encolhimento para 35°C e $0,8 \text{ m/s}$

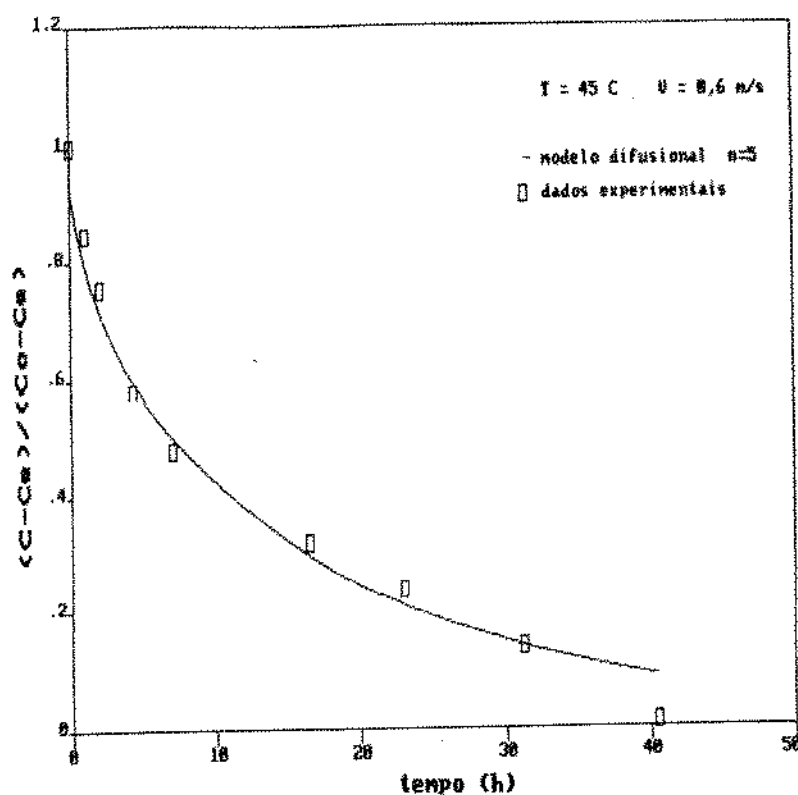


FIGURA B.18-Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional com encolhimento para 45°C e 0.6 m/s

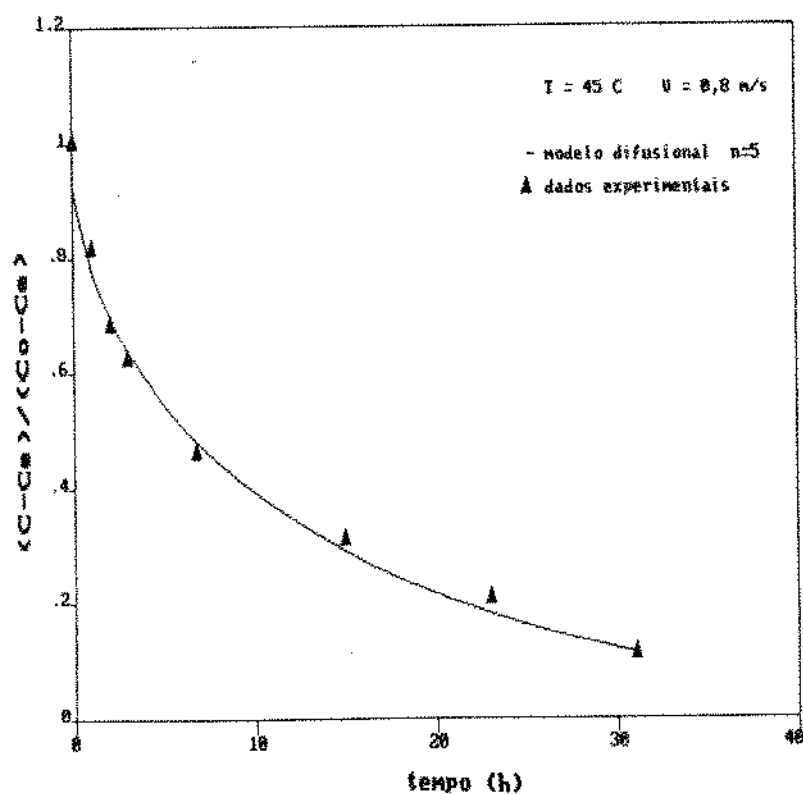


FIGURA B.19-Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional com encolhimento para 45°C e 0.8 m/s

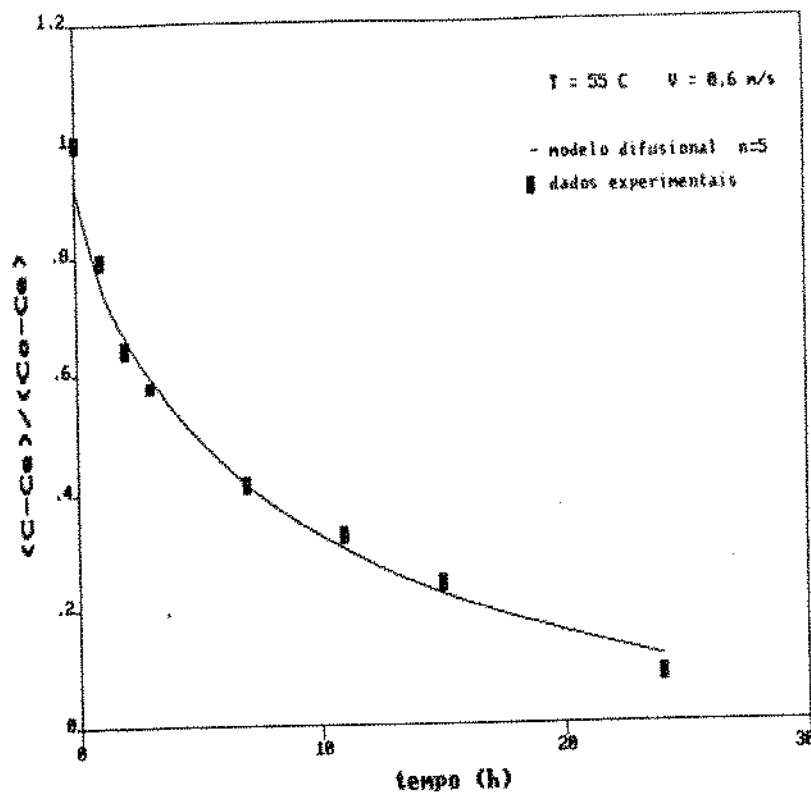


FIGURA B.20-Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional com encolhimento para 55°C e $0,6 \text{ m/s}$

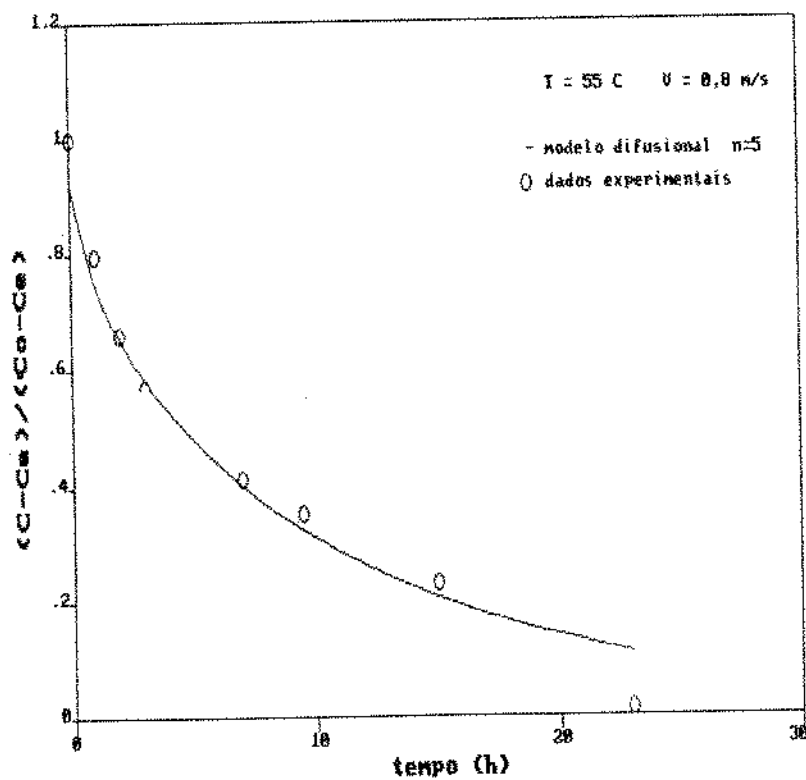


FIGURA B.21-Curva de secagem ajustada pelo modelo difusional com encolhimento para 55°C e $0,8 \text{ m/s}$

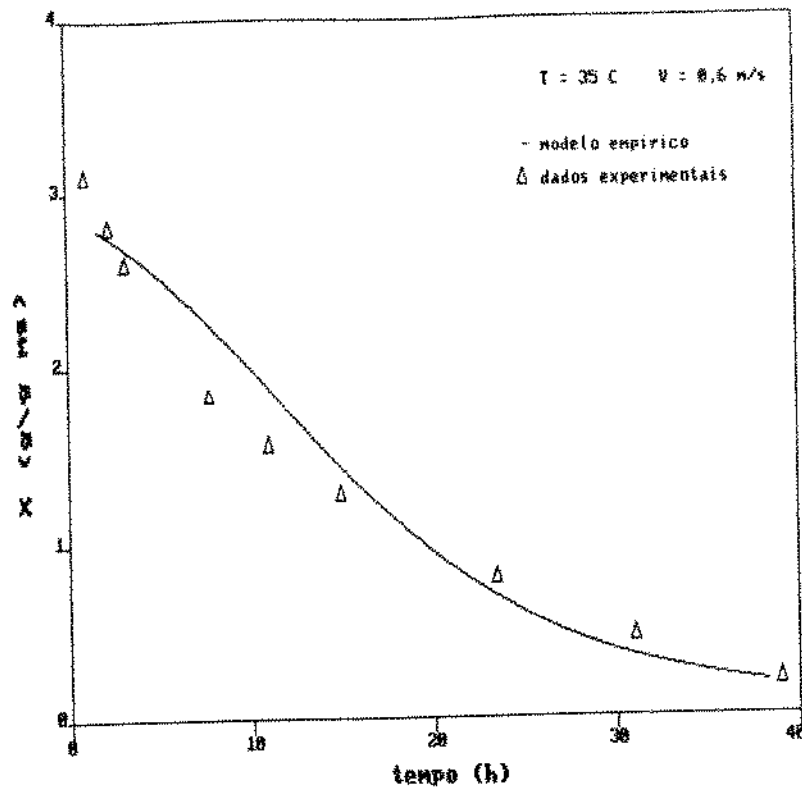


FIGURA B.22-Curva de secagem ajustada pelo modelo empírico para 35°C e $0,6 \text{ m/s}$

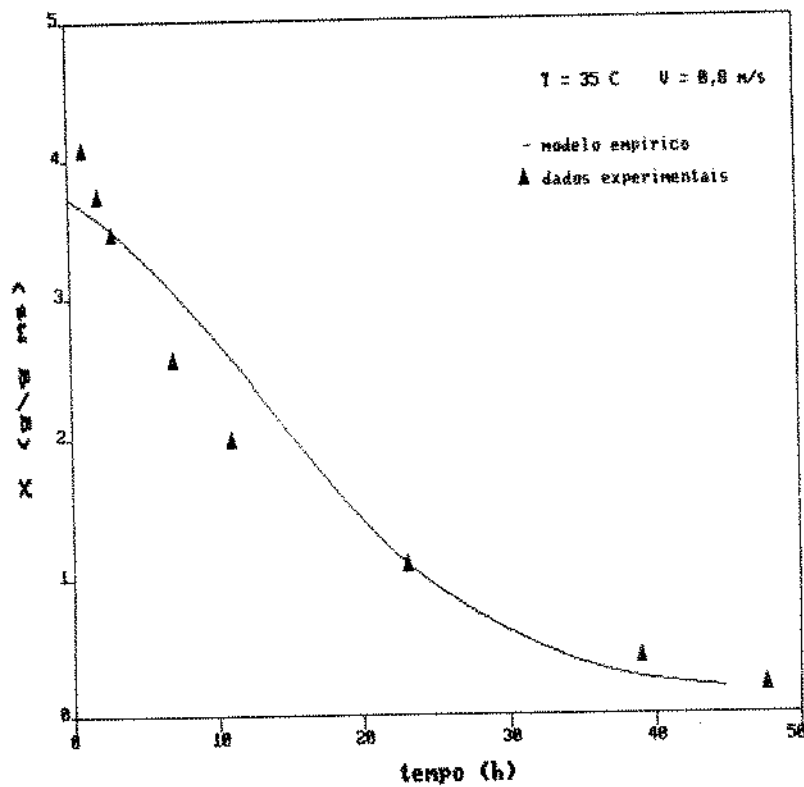


FIGURA B.23-Curva de secagem ajustada pelo modelo empírico para 35°C e $0,8 \text{ m/s}$

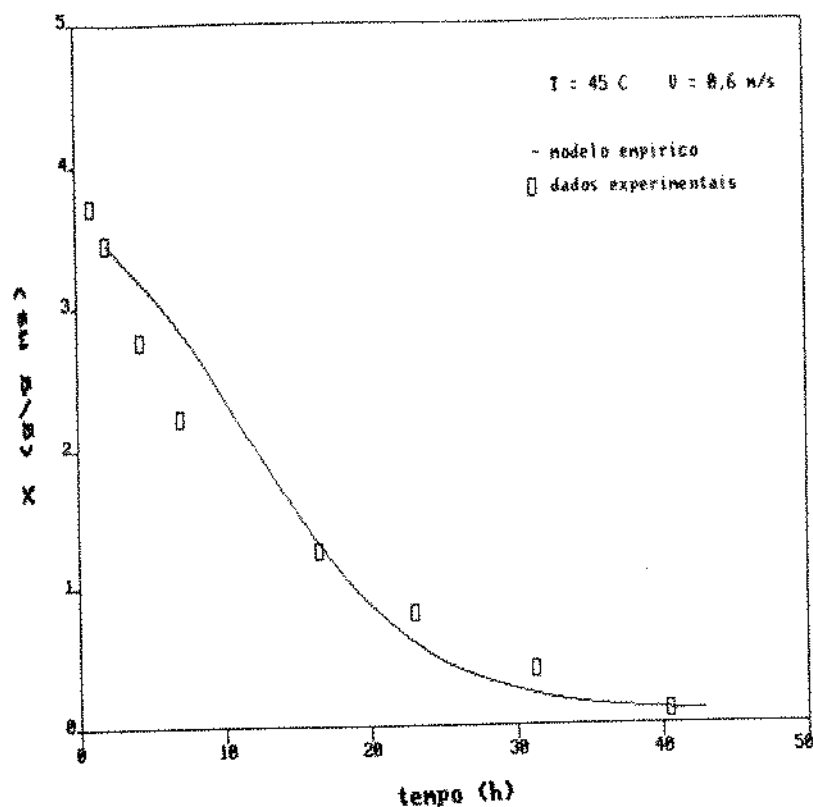


FIGURA B.24-Curva de secagem ajustada pelo modelo empírico para 45°C e $0,6 \text{ m/s}$

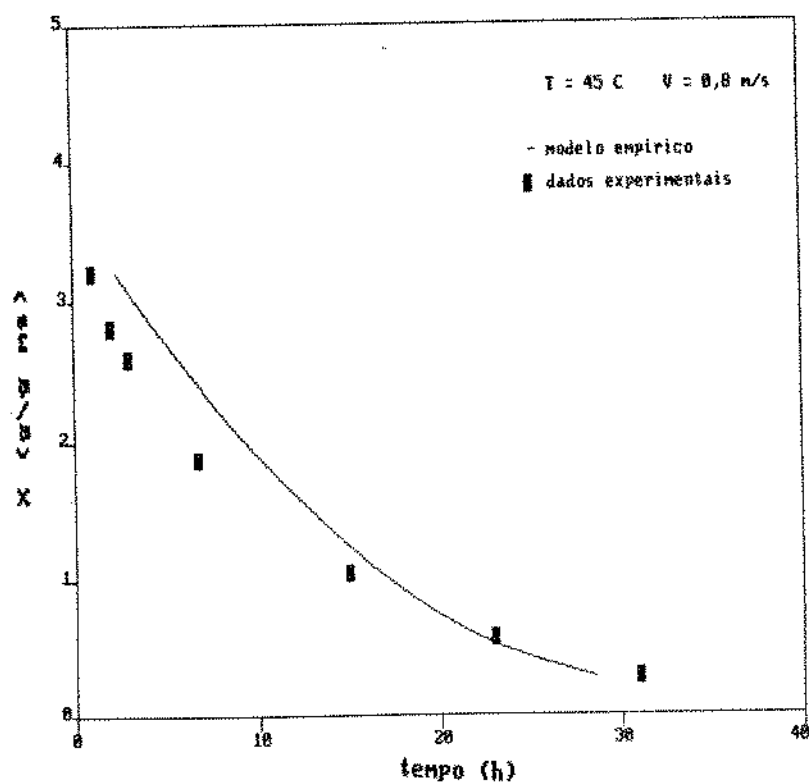


FIGURA B.25-Curva de secagem ajustada pelo modelo empírico para 45°C e $0,8 \text{ m/s}$

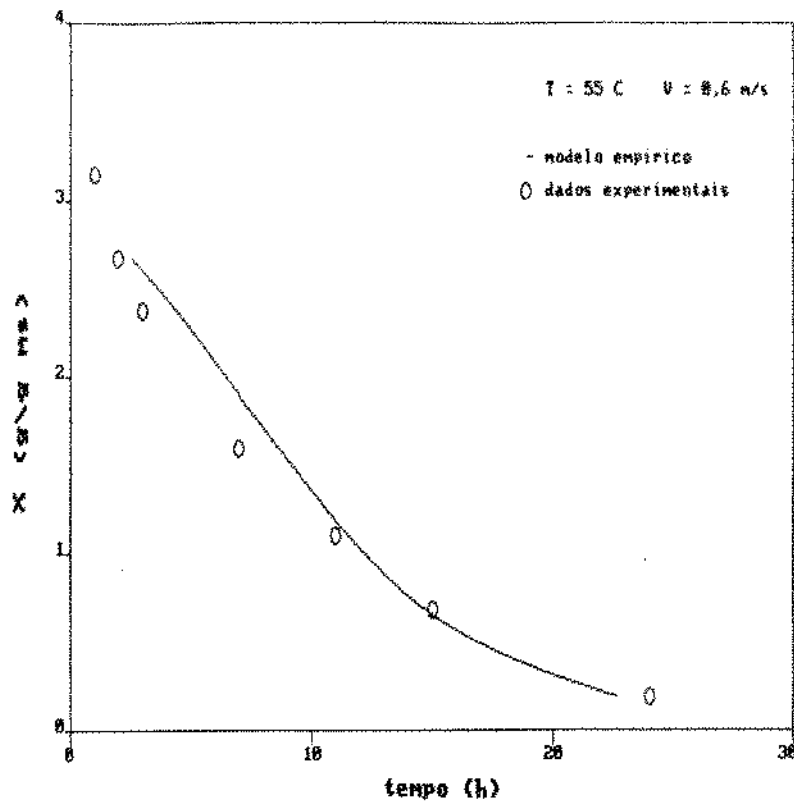


FIGURA B.26-Curva de secagem ajustada pelo modelo empírico para 55°C e $0,6 \text{ m/s}$

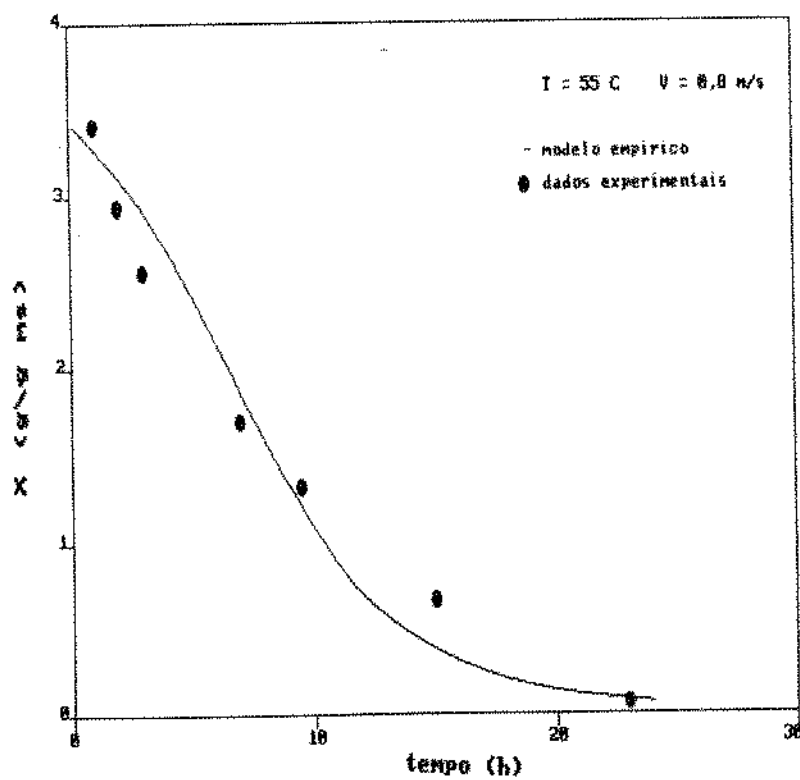


FIGURA B.27-Curva de secagem ajustada pelo modelo empírico para 55°C e $0,8 \text{ m/s}$

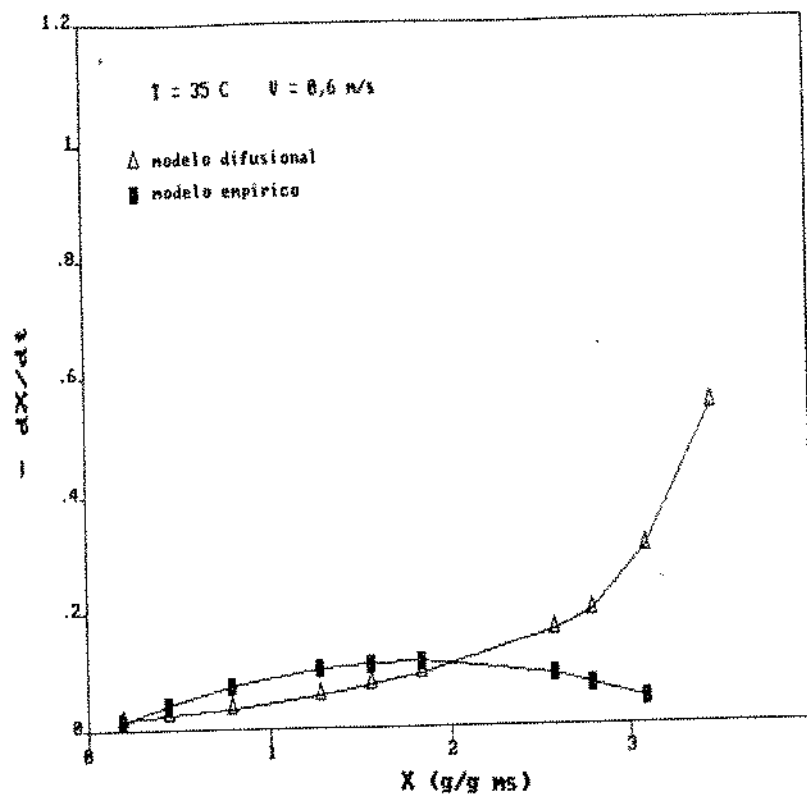


FIGURA B.28-Curva de taxa de secagem para 35°C e 0.6 m/s

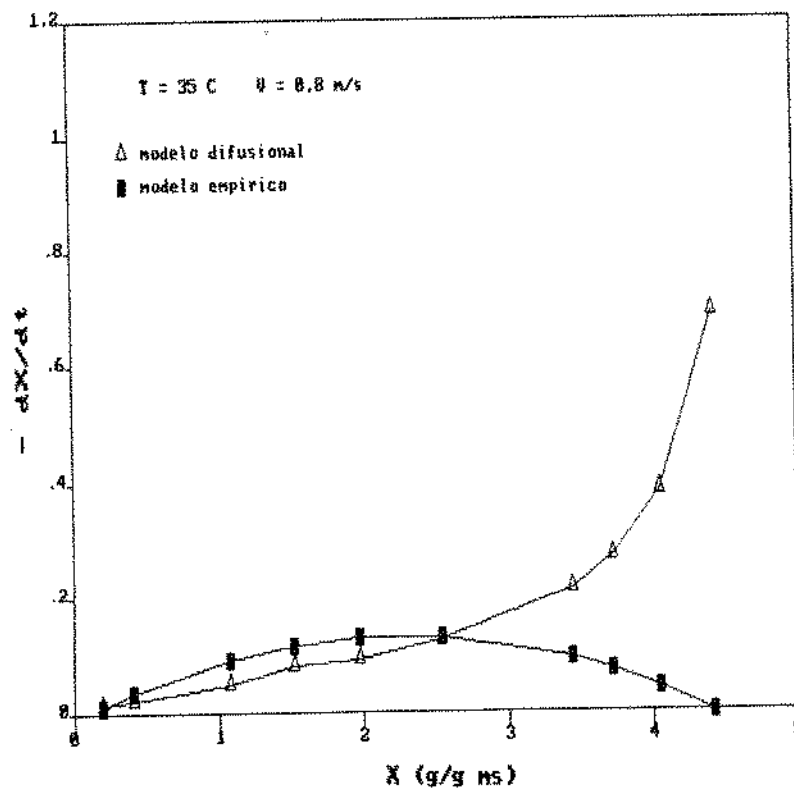


FIGURA B.29-Curva de taxa de secagem para 35°C e 0.8 m/s

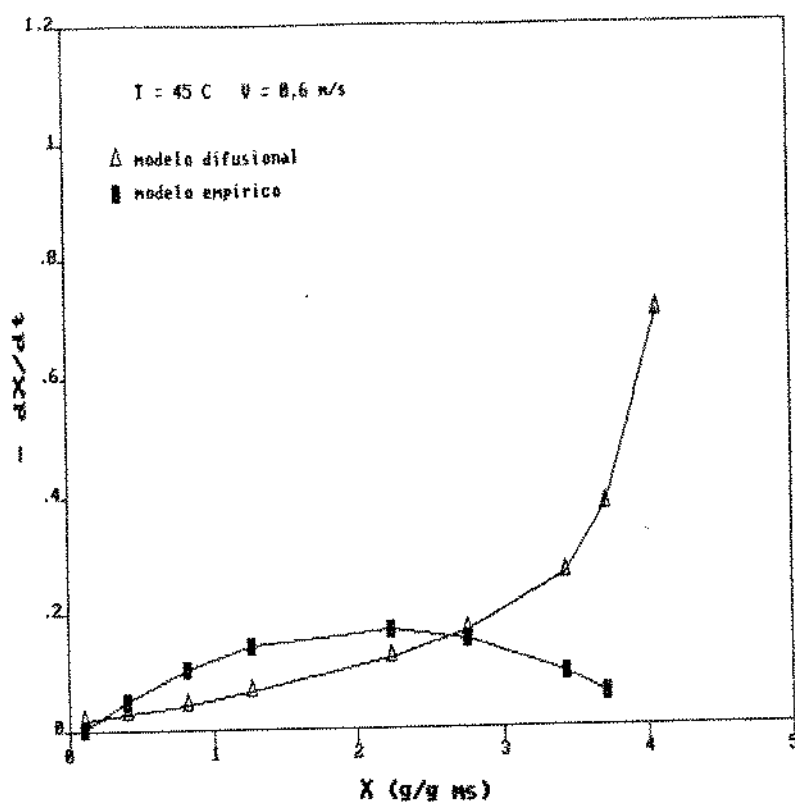


FIGURA B.30—Curva de taxa de secagem para 45°C e $0,6 \text{ m/s}$

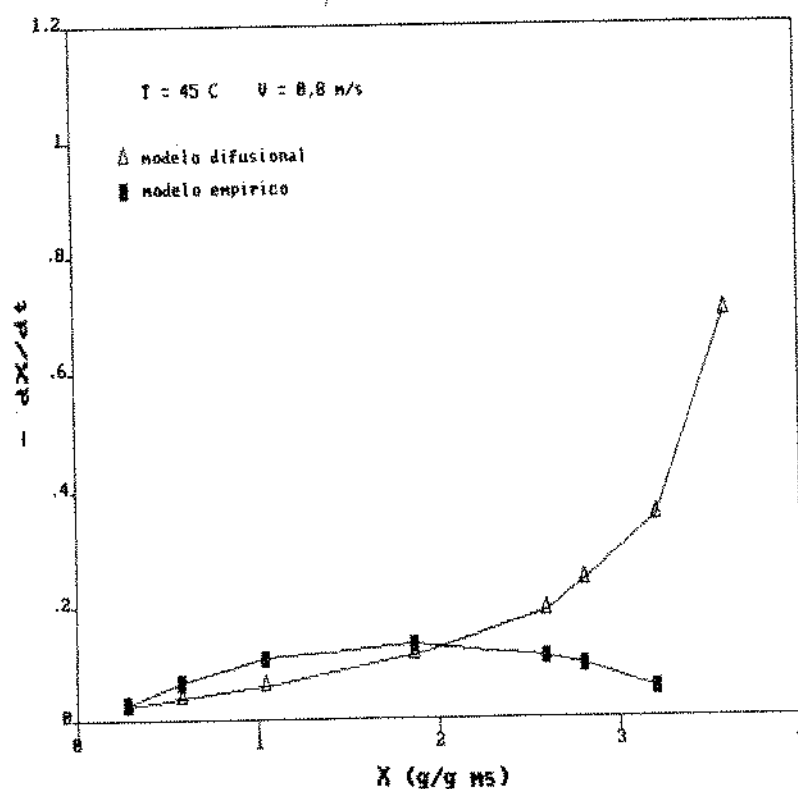


FIGURA B.31—Curva de taxa de secagem para 45°C e $0,8 \text{ m/s}$

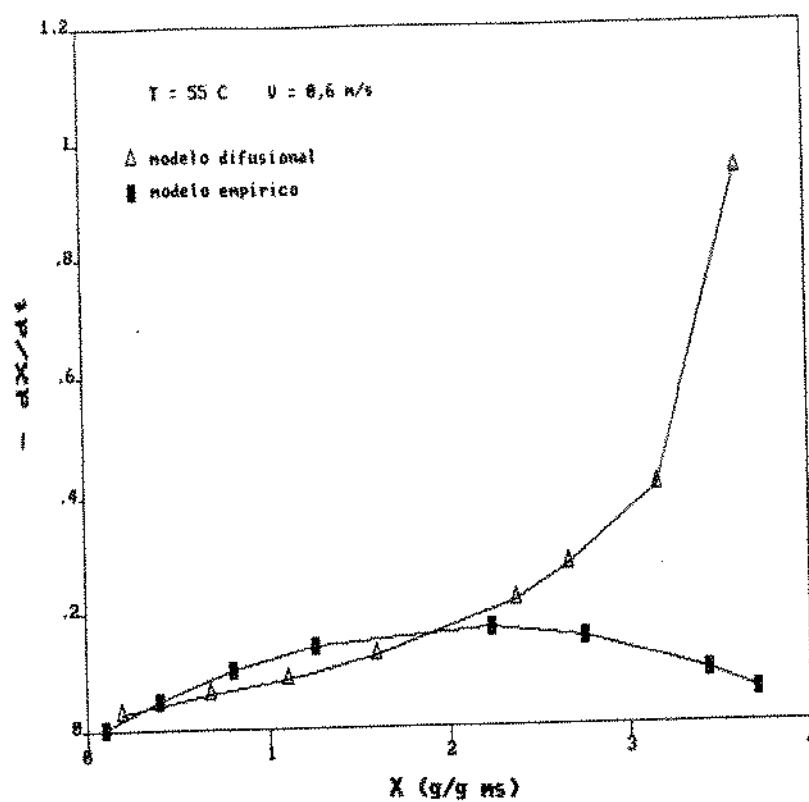


FIGURA B.32-Curva de taxa de secagem para 55° C e 0,6 m/s

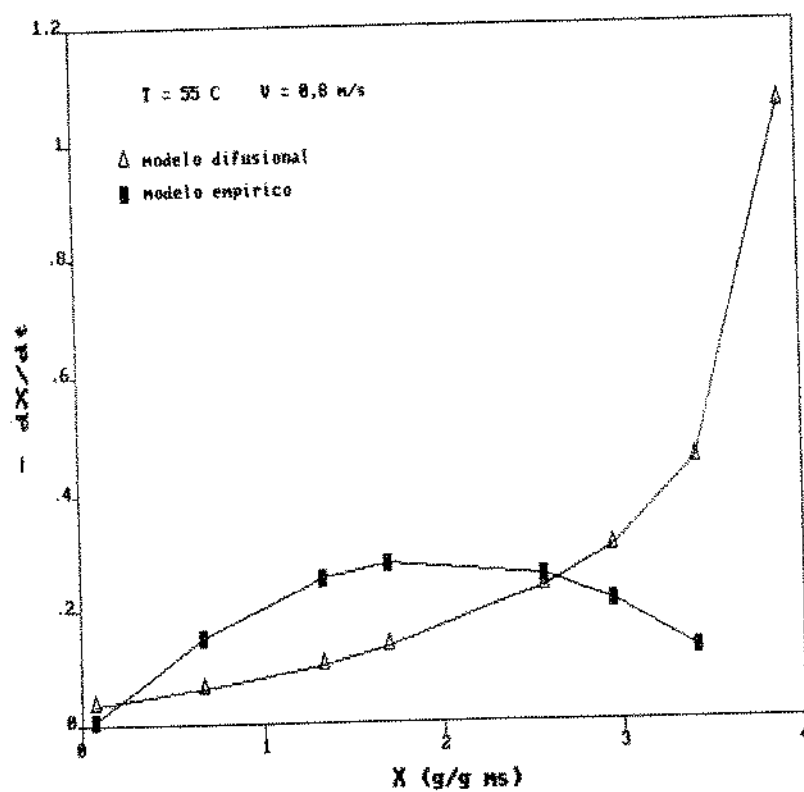


FIGURA B.33-Curva de taxa de secagem para 55° C e 0,8 m/s

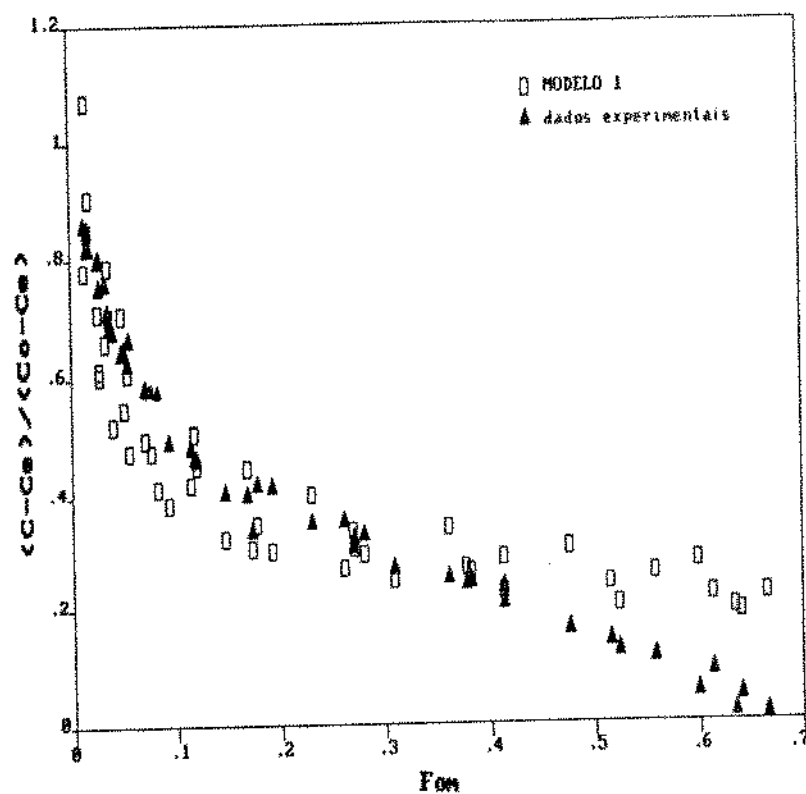


FIGURA B.34-Normalização das curvas de secagem por adimensionalização com modelo 1 para adimensional de concentração de umidade

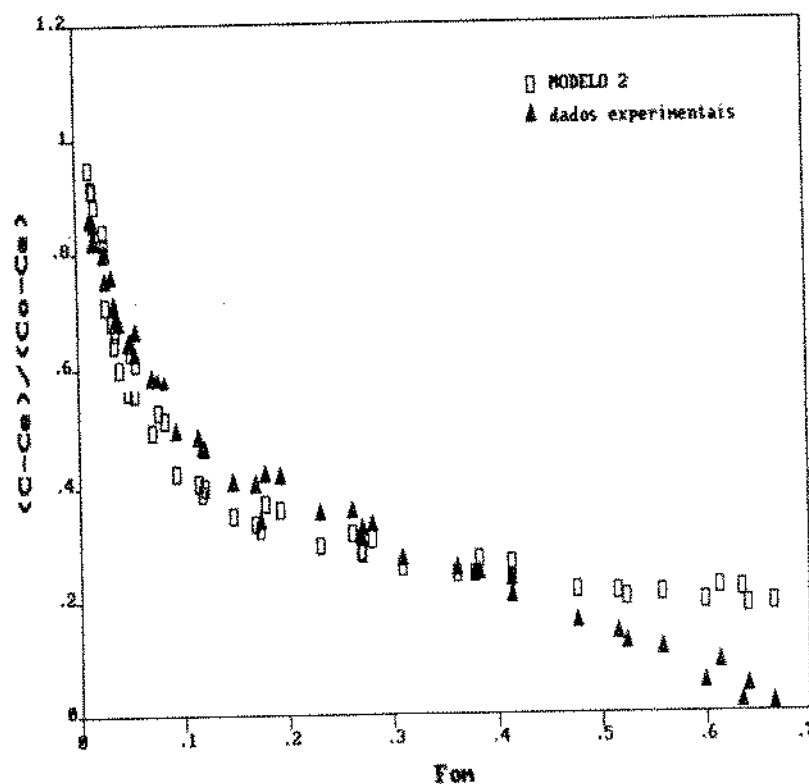


FIGURA B.35-Normalização das curvas de secagem por adimensionalização com modelo 2 para adimensional de concentração de umidade

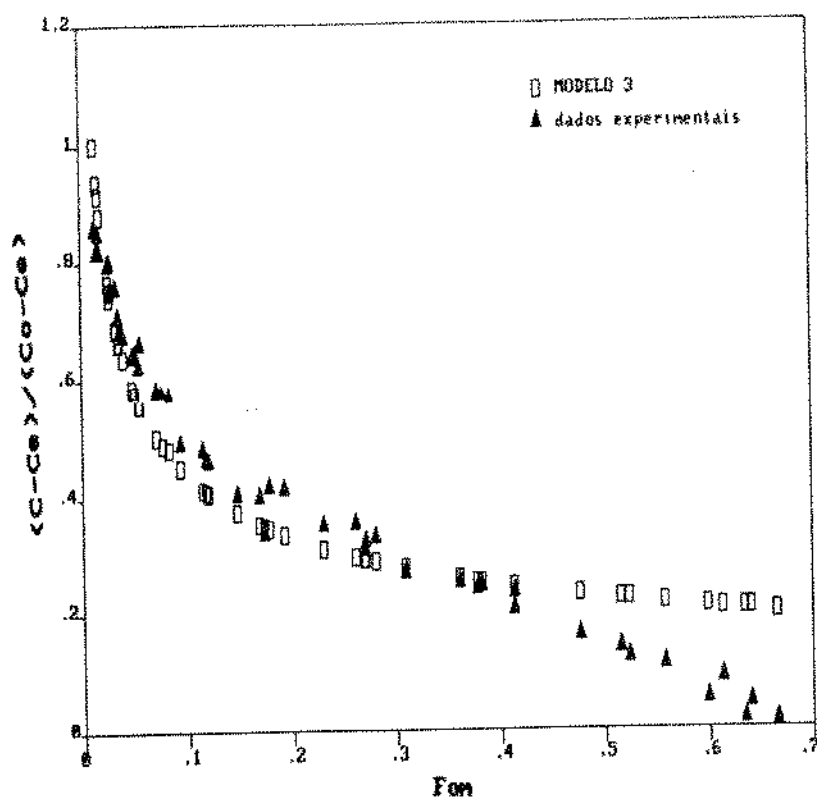


FIGURA B.36-Normalização das curvas de secagem por adimensionalização com modelo 3 para adimensional de concentração de umidade

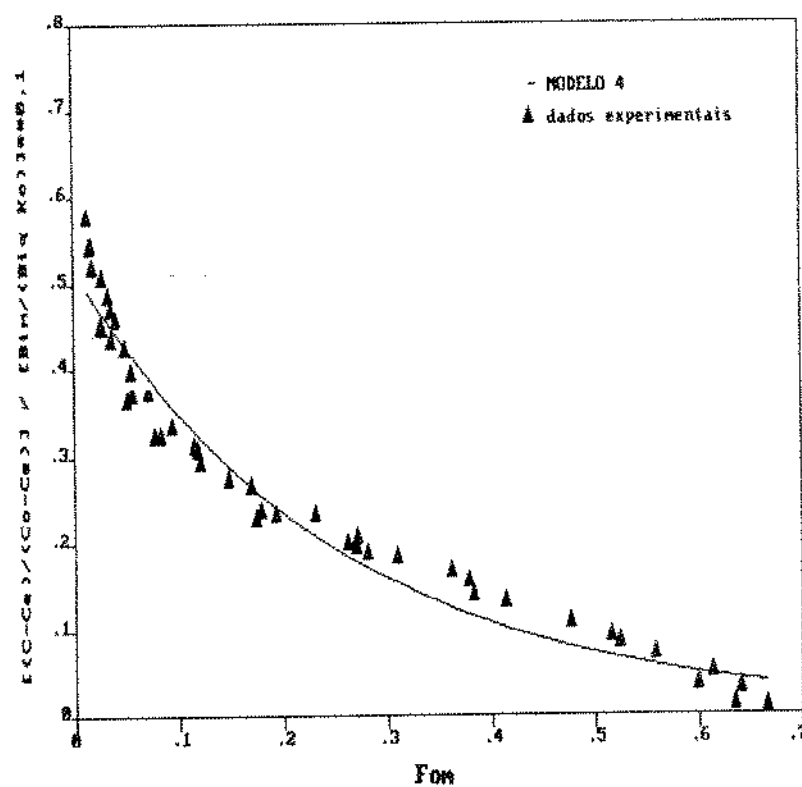


FIGURA B.37-Normalização das curvas de secagem por adimensionalização com modelo 4 para adimensional de concentração de umidade

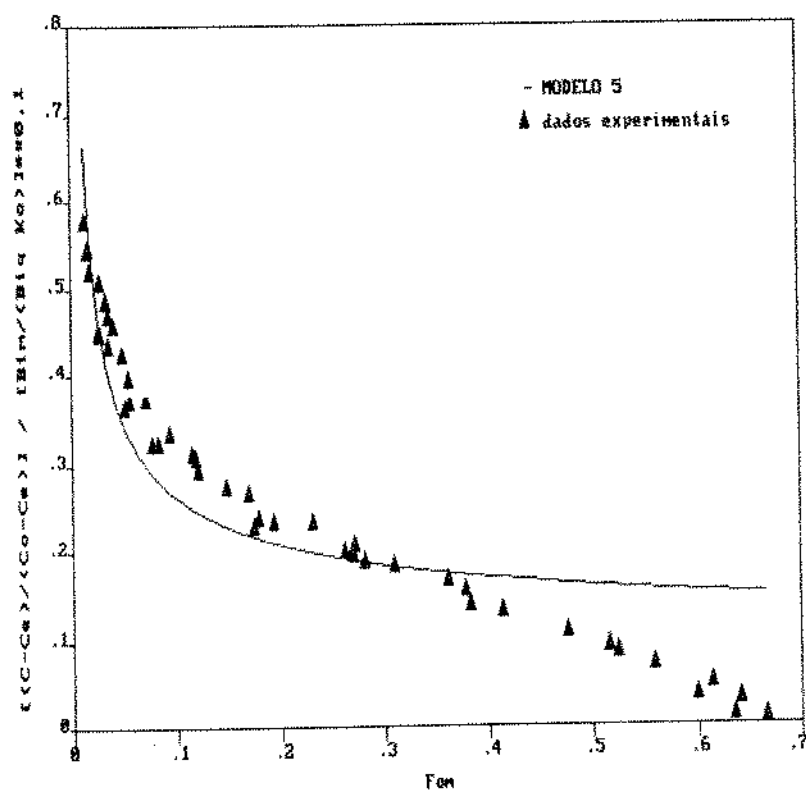


FIGURA B.38-Normalização das curvas de secagem por adimensionalização com modelo 5 para adimensional de concentração de umidade

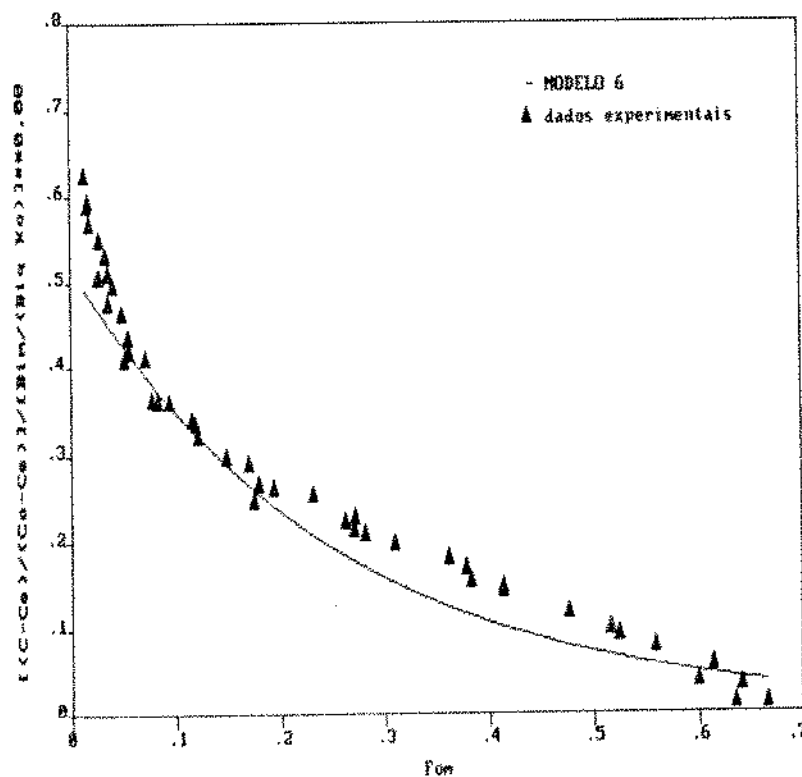


FIGURA B.39-Normalização das curvas de secagem por adimensionalização com modelo 6 para adimensional de concentração de umidade

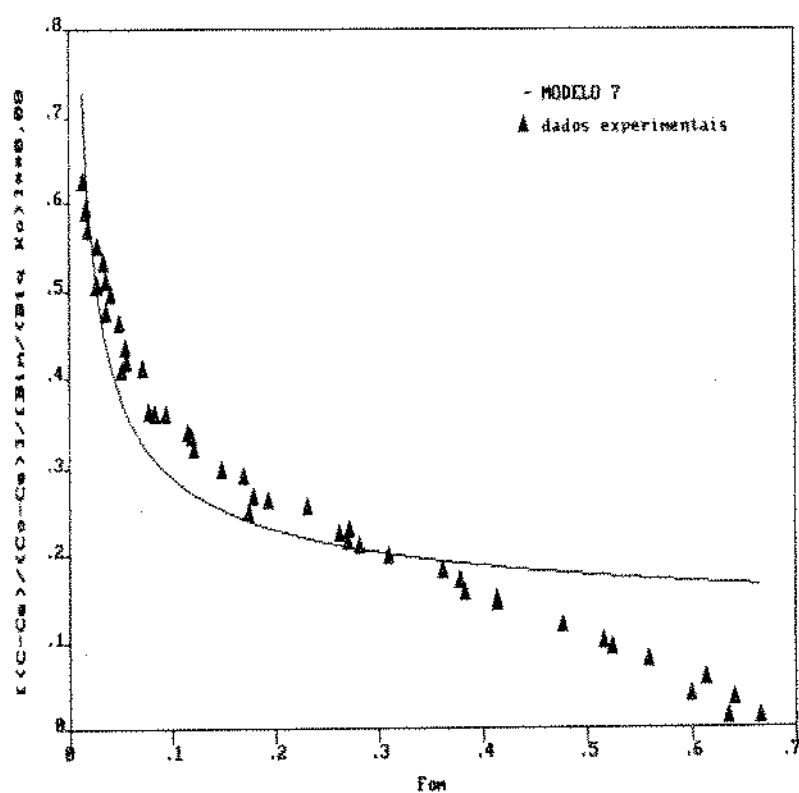


FIGURA B.40-Normalização das curvas de secagem por adimensionalização com modelo 7 para adimensional de concentração de umidade

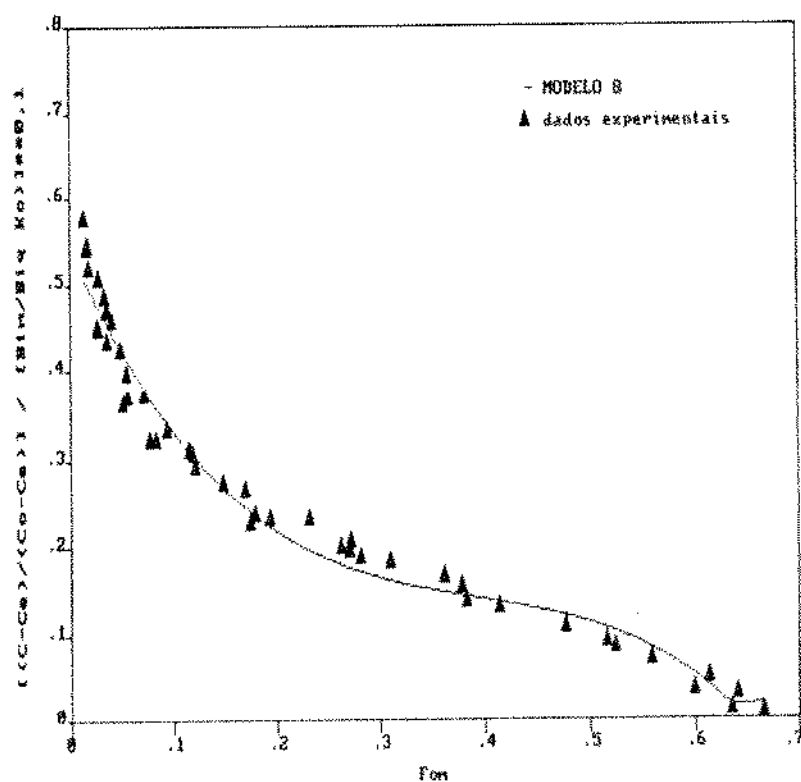


FIGURA B.41-Normalização das curvas de secagem por adimensionalização com modelo 8 para adimensional de concentração de umidade

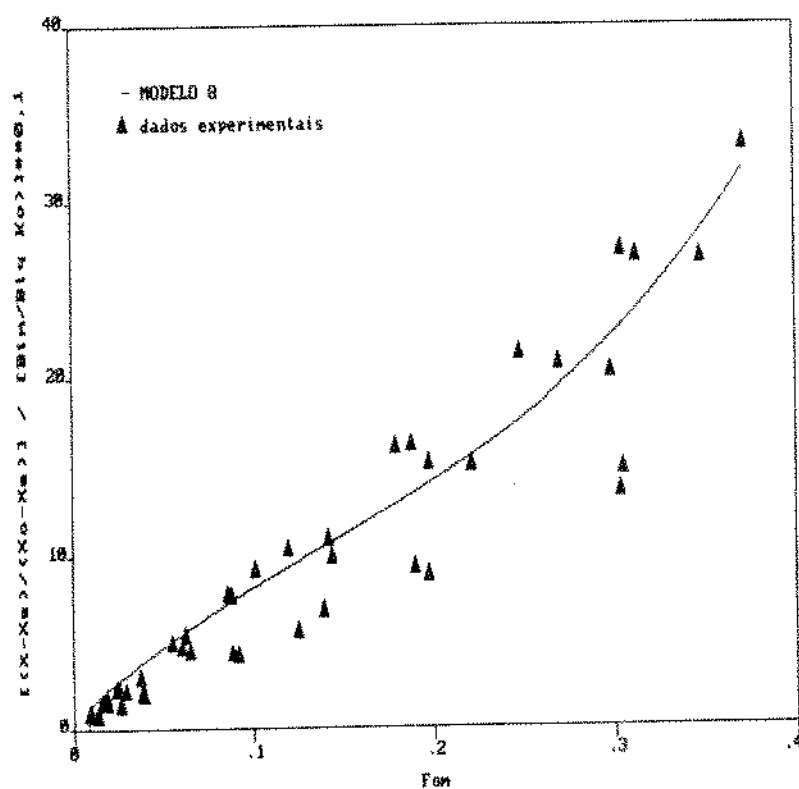


FIGURA B.42-Normalização das curvas de secagem por adimensionalização com modelo 8 para adimensional de conteúdo de umidade

APÊNDICE A - Análises para determinação da composição centesimal de Batata (*Solanum tuberosus*, L.)

Amido

O método usado para determinação do amido de batata foi o de EWERS modificado por HADORN e DOLWELAAR e consiste em solubilizar uma quantidade conhecida de amido em solução e determinar a rotação óptica do amido e açúcares presentes. Numa segunda amostra preparada, o amido é precipitado, os açúcares restantes são hidrolizados e o desvio da solução é determinado. A soma algébrica dos desvios multiplicada por um fator que depende do material analisado corresponde à porcentagem de amido na amostra.

$$\% \text{ amido} = (A - B) F$$

A = leitura correspondente ao amido + açúcares

B = leitura correspondente aos açúcares

F = fator que está relacionado com a rotação específica da batata que é igual a 5,501

Cinzas

Consiste na incineração do material na mufla à 540°C durante 4 horas

$$\% \text{ Cinzas} = \frac{\text{peso do material seco}}{\text{peso da amostra}} \times 100$$

Fibras

O método consiste de uma extração com detergente ácido (ácido hexacetyl trimetil brometo de armônia, $\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrNO}$). Após uma hora de refluxo o material é filtrado em cadinho lavado com água quente e acetona e colocado para secar por 8 horas. à 100°C .

A determinação inclui toda a liguina e celulose com alguma matéria inorgânica.

$$\% \text{ fibras} = \frac{\text{peso do material seco}}{\text{peso da amostra}} \times 100$$

Gordura

O método utilizado, segundo A.O.C.S. Official Method, é aplicável à farinhas de alto e baixo teor de óleo como também para desengorduradas.

Trata-se de um método de extração por éter de petróleo em extratos de Butt por 8 horas. Em seguida o material é seco em estufa a 100°C por 40 minutos.

$$\% \text{ GORDURA} = \frac{\text{peso do óleo}}{\text{peso da amostra}} \times 100$$

Proteína

O método utilizado foi o de KJELDAHL que consiste na digestão das amostras com ácido sulfúrico concentrado seguida de uma destilação com NaOH e uma titulação com HCl na presença de indicador misto.

$$\% \text{ PROTEINA BRUTA} = \frac{\text{NaHCl} \times 0,0018 \times N_{\text{real}}}{\text{peso da amostra}} \times 100$$

Umidade

O conteúdo de umidade da batata "in natura" foi determinado colocando-se 5g moída num recipiente de alumínio previamente tarado e secando em estufa com circulação forçada à 70°C por aproximadamente 16 horas e depois à 105°C até o peso constante. Isto evita a gelatinização do amido, SCHIPPERS (1976) e LEES (1975).

As amostra parcialmente secas foram colocadas em estufa com circulação forçada de ar a 105°C até peso

constante. As leituras em balança analítica foram feitas após 24, 48 e 72 horas.

$$\% \text{ UMIDADE (b.u)} = \frac{\text{peso amostra} - \text{peso massa seca}}{\text{peso da amostra}} \times 100$$

Densidade

A densidade das amostras cilíndricas foi determinado por deslocamento volumétrico. Uma quantidade conhecida de amostra foi colocada num volume conhecido de água

$$\rho = \frac{m}{V}$$