

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS**

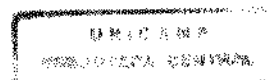
**FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**



UNICAMP

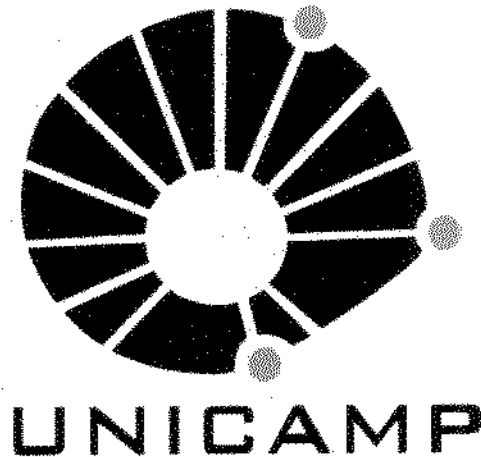
**SECAGEM DE TÂMARAS (*PHOENIX
DACTYLIFERA L.*) PARA OBTENÇÃO
DE TÂMARA PASSA**

**Campinas
Outubro de 1998**



FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS



SECAGEM DE TÂMARAS (*PHOENIX DACTYLIFERA L.*) PARA OBTENÇÃO DE TÂMARA PASSA

Mônica Elisabeth Torres Prado

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por MÔNICA ELISABETH TORRES PRADO Aprovada pela Comissão Julgadora em 16 de novembro de 1998.

Campinas, 16 de novembro de 1998

Prof. Dr. KIL JIN PARK
Presidente da Banca

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Alimentos

**CAMPINAS – S.P.
1988**

UNIDADE	70C
N.º CHAMADA:	
V.	Ex.
TÍTULO	80/26264
PROG.	229/99
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	23/05/99
N.º CPD	

CM-00120271-3

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

P882s Prado, Mônica Elisabeth Torres
Secagem de tâmaras (*Phoenix dactylifera* L.) para obtenção de
tâmara passa / Mônica Elisabeth Torres Prado -- Campinas, SP:
[s.n.], 1998.

Orientador: Kil Jin Park
Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas. Faculdade
de Engenharia de Alimentos.

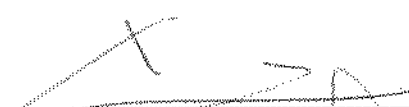
1. Tâmara. 2. Secagem. 3. Umidade. 4. Difusão em sólidos.
5. Pressão de vapor. I. Park, Kil Jin II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos III. Título.

Secagem de Tâmaras (*Phoenix dactylifera* L.) para Obtenção de Tâmara Passa

por

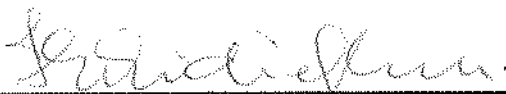
Monica Elisabeth Torres Prado

Tese aprovada em _____ de _____ de 1998.



Professor Dr. Kil Jin Park (orientador)

Professor Dr. Satoshi Tobinaga (banca)



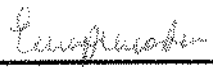
Professora Dra. Fernanda Elizabeth X. Murr (banca)



Professora Dra. Miriam Dupas Hubinger (banca)



Professor Dr. José Gilberto Jardine (banca)



Professora Dra. Enny T. Martucci (banca)

Professor Dr. Sylvio Luís Honório (banca)

Temor de Deus é o princípio de toda sabedoria

**Ofereço este
trabalho a Deus e a
meus pais**

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos para realização deste curso.

À FAEP pela ajuda na fase de finalização de redação da tese.

Ao Prof. Dr. Kil Jin Park, pela orientação, amizade, paciência e principalmente pela sua força e alegria contagiantes, o que faz dele sem dúvida nenhuma uma pessoa muito especial.

Aos Professores Satoshi Tobinaga, Fernanda E. X. Murr, Míriam D. Hubinger, Enny T. Martucci, José Gilberto Jardine e Sylvio Luís Honório, pela colaboração nas sugestões e correção deste trabalho.

Ao amigo e colega Luís Felipe Toro Alonso, que tanto colaborou, principalmente na fase de tratamento dos dados; sem ele não teria sido possível.

Aos amigos Brod, Marley, Jaime e Edson Sallatini, pela força.

Ao amigo de tantos anos Ednaldo, que me acolheu aqui na cidade de Campinas.

À Kellen, que me instruiu nas fotografias e ainda emprestou o equipamento de iluminação.

À grande amiga que aqui encontrei e que se transformou na irmã que eu não tive, Tânia, com quem sempre pude contar, principalmente nos momentos mais difíceis.

À Josivanda, Denise, Silmara e Sônia que fizeram com que este período que passei em Campinas se tornasse mais suave, agradável e divertida.

Em especial a minha querida mãe, Zilda Torres Prado, que me esperou durante estes quatro anos e ao meu pai, Haroldo Caio Prado, que infelizmente não conseguiu esperar todo este tempo, mas que acima de tudo e de todos, sempre me incentivou, motivou e principalmente acreditou em mim.

À você meu pai, eu dedico este trabalho.

Mônica

Índice

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO 1 - TÂMARA	01
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	03
2.1. Matéria prima.....	03
2.1.1. Tâmara.....	03
2.1.2. Composição química.....	08
2.1.3. Amadurecimento.....	11
2.2. A tamareira.....	13
2.3. Processamento.....	17
2.3.1. Descrição das etapas de processamento de tâmaras.....	18
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1. Métodos.....	20
3.1.1. Amadurecimento.....	20
3.1.2. Análises físicas e químicas.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
5. CONCLUSÕES.....	24
CAPÍTULO 2 - UMIDADE DE EQUILÍBRIO.....	25
1. INTRODUÇÃO.....	25
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	27
2.1. Equilíbrio higroscópico.....	27
2.1.1. Isotermas de sorção.....	27
2.1.2. Equações de equilíbrio higroscópico.....	30
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.1. Determinação dos teores de umidade de equilíbrio.....	39
3.1.1. Equipamentos e vidraria para o levantamento da umidade de equilíbrio.....	38
3.1.2. Métodos.....	49
3.1.2.1. Equilíbrio higroscópico das isotermas.....	49
3.1.2.2. Cálculo da cinética de sorção de água nas tâmaras.....	41

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1. Cinética de sorção de água	43
4.2. Equilíbrio higroscópico das isothermas de adsorção e dessorção	50
4.3. Ajuste das isothermas	52
4.4. Histerese	61
5.CONCLUSÕES	65
 CAPÍTULO 3 - ENCOLHIMENTO	66
1.INTRODUÇÃO	66
2.REVISÃO DE LITERATURA	68
3.MATERIAL E MÉTODOS	72
3.1. Material	72
3.2. Métodos	72
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
5.CONCLUSÕES	87
 CAPÍTULO 4 - SECAGEM	88
1.INTRODUÇÃO	88
2.REVISÃO DE LITERATURA	90
2.1. Processo de secagem	90
2.1.1. Período de secagem a taxa constante	92
2.1.2. Período de secagem a taxa de secagem decrescente	93
2.2. Teoria de secagem	96
2.2.1. Teoria da difusão líquida	96
2.2.2. Teoria capilar	98
2.2.3. Teoria de vaporização-condensação	99
2.2.4. Teoria de Luikov	99
2.2.5. Teoria de Philip e Devries	100
2.2.6. Teoria de Fortes e Okos	100
2.3. Modelos de secagem	100
2.3.1. Coeficiente de difusão	103
2.3.2. Coeficiente convectivo de transferência de massa	104
3.MATERIAL E MÉTODOS	106
3.1. Curvas de secagem	106
3.2. Tratamento matemático	107
3.2.1. Modelo difusional	107
3.2.2. Modelo difusional com encolhimento	109
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
4.1. Curvas de secagem	111
4.2. Modelo difusional	116

4.2.1. Modelo difusional para geometria esférica.....	117
4.2.2. Modelo difusional para geometria cilíndrica.....	119
4.3. Modelo difusional com encolhimento.....	126
4.3.1. Modelo difusional para geometria esférica englobando encolhimento.....	128
4.3.2. Modelo difusional para geometria cilíndrica englobando encolhimento.....	131
4.4. Energia de ativação.....	137
5.CONCLUSÕES.....	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142
APÊNDICES	
Apêndice 1 - Análises químicas da tâmara (phoenix dactylifera L.) da variedade Zahidi.....	1.1
Apêndice 2 - Isotermas de dessorção e adsorção de tâmaras ajustadas aos modelos de BET, BET linearizado, GAB e Halsey.....	2.1
Apêndice 3 - Valores das relações entre áreas relacionados ao encolhimento e fotografias das tâmaras.....	3.1
Apêndice 4 - Ajustes das curvas experimentais de secagem ao modelo difusional de Fick para geometria esférica.....	4.1

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 2

Umidade de Equilíbrio

$A, B, C =$	Constantes
$a_w =$	Atividade de água (adimensional)
$C_{BET} =$	Constante de BET
$C_{GAB} =$	Constante de GAB
$E =$	Erro médio relativo (%)
k_1, k_2, k_3, k_4	Constantes
$K_{GAB} =$	Constante de GAB
$n =$	Constante definida na equação 2.3 (adimensional)
$n_e =$	Numero de dados experimentais
$Q_s =$	Calor de sorção (J/mol)
$R =$	Constante universal dos gases (J/mol K)
$T =$	Temperatura (K)
$UR =$	Umidade relativa decimal
$V_E =$	Valor Experimental
$V_P =$	Valor predito
$X =$	Umidade da amostra em base seca (g água/g sólidos secos)
$X_e =$	Umidade de equilíbrio (g água/g sólido seco)
$X_m =$	Umidade da monocamada molecular (g água/g sólidos secos)
$\psi =$	Potencial químico (kg/m ³)

CAPÍTULO 3

Encolhimento

$A =$	Área da amostra no tempo t (m ²)
$a, b =$	Diametro dos cortes transversais equidistantes ao centro (m)
$A_0 =$	Área inicial da amostra (m ²)
$ACCT =$	Área do cilindro com tampa (m ²)
$AEC =$	Área da elipse cilíndrica (m ²)
$AEO =$	Área da elipse oblata (m ²)
$AEP =$	Área da elipse prolata (m ²)
$c =$	Comprimento longitudinal da amostra (m)
$Ca =$	Coefficiente angular
$Cr =$	Coefficiente da reta
$n =$	Expoente das equações (3.1), (3.3), (3.5)
$ErroM =$	Erro relativo médio (%)
$Exp =$	Expoente da curva
$X =$	Umidade da amostra (g água/ g sólido seco)
$X_0 =$	Umidade inicial (g água/ g sólido seco)
$X_e =$	Umidade de equilíbrio (g água/ g sólido seco)

$\sigma =$	Desvio padrão
$\varepsilon =$	Erro estatístico
$\rho_0 =$	Densidade inicial (g/cm ³)
$\rho_e =$	Densidade de equilíbrio (g/cm ³)

CAPÍTULO 4

Secagem

$A =$	Área da superfície exposta (m ²)
$a, b, c =$	Constantes da equação (4.17)
$b =$	Constante definida na equação (4.2)
$C =$	Umidade em base seca por volume (g água/ g sólido seco.m ³)
C_e	Umidade de equilíbrio em base seca por volume (g água/ g sólido seco . m ³)
$C_o =$	Umidade inicial em base seca por volume (g água/ g sólido seco.m ³)
$D =$	Difusividade efetiva de umidade (m ² /h)
$D_0 =$	Difusividade efetiva inicial (m ² /h)
$D_T =$	Incremento na difusividade em função da temperatura
$D_{T1} =$	Valor da difusividade correspondente à temperatura menor
$D_{T2} =$	Valor da difusividade correspondente à temperatura maior
$D_v =$	Incremento na difusividade em função da velocidade do ar
$D_{v1} =$	Valor da difusividade correspondente à velocidade menor
$D_{v2} =$	Valor da difusividade correspondente à velocidade maior
$E_0 =$	Energia de ativação para transferência de massa (J/mol)
$h =$	Coefficiente de transferência de calor (W/m ² °C)
$H_{vap} =$	Calor de vaporização (J/mol)
$J_0 =$	Função de Bessel de primeira espécie e ordem zero
$J_1 =$	Função de Bessel de primeira espécie e ordem um
$K_1 =$	Constante da equação (4.7)
$K_h =$	Condutividade hidráulica (s ⁻¹)
$Nu =$	Número de Nusselt (adimensional)
$P =$	Pressão de vapor (N/m ²)
$Pr =$	Número de Prandtl (adimensional)
$P_w =$	Pressão de vapor à temperatura de bulbo úmido (N/m ²)
$P_{wa} =$	Pressão de vapor à temperatura ambiente (N/m ²)
$R =$	Constante universal dos gases (J/mol K)
$r =$	Distância radial ou espessura (m)
$R =$	Raio da partícula (m)
$Re =$	Número de Reynolds (adimensional)
$t =$	Tempo (h)
$T =$	Temperatura (°C)
$UR =$	Umidade relativa ambiente, decimal
$X =$	Umidade da amostra em base seca (g água/ g sólidos secos)
$X_0 =$	Umidade inicial (g água/ g sólidos secos)
$X_e =$	Umidade de equilíbrio (g água/ g sólidos secos)

$\nabla =$	Operador de Laplace
$\rho_s =$	Massa específica do sólido seco (kg/m^3)
$\vec{J}_i =$	Fluxo de líquido, $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$;
$\Psi =$	potencial hidráulico capilar, J.kg^{-1} ;
$\lambda_n =$	Raízes da função de Bessel

LISTA DE FIGURAS

		Página
FIGURA 1.1	Corte longitudinal de uma tâmara.....	04
FIGURA 1.2	Aspecto do fruto da tamareira.....	05
FIGURA 1.3	Cachos de diversas variedades vermelhas e amarelas.....	05
FIGURA 1.4	A tamareira.....	13
FIGURA 1.5	Tamareira variedade amarela.....	14
FIGURA 1.6	Flor masculina.....	15
FIGURA 2.1	Curvas de sorção de tâmaras expostas a diferentes níveis de umidade relativa e temperatura ambiente controlada de 60 °C.....	45
FIGURA 2.2	Curvas de sorção de tâmaras expostas a diferentes níveis de umidade relativa e temperatura ambiente controlada de 70 °C.....	46
FIGURA 2.3	Curvas de sorção de tâmaras expostas a diferentes níveis de umidade relativa e temperatura ambiente controlada de 80 °C.....	47
FIGURA 2.4	Cinética de sorção de água de tâmaras expostas à temperatura de 60 °C e vários níveis de umidade relativa.....	48
FIGURA 2.5	Cinética de sorção de água de tâmaras expostas à temperatura de 70 °C e vários níveis de umidade relativa.....	48
FIGURA 2.6	Cinética de sorção de água de tâmaras expostas à temperatura de 80 °C e vários níveis de umidade relativa.....	49
FIGURA 2.7	Isoterma de dessorção na temperatura de 60 °C ajustada pelo modelo de BET linearizado	55
FIGURA 2.8	Isoterma de dessorção na temperatura de 70 °C ajustada pelo modelo de GAB.....	55
FIGURA 2.9	Isoterma de dessorção na temperatura de 80 °C ajustada pelos modelos de BET linearizado.....	56
FIGURA 2.10	Isoterma de adsorção na temperatura de 60 °C ajustada pelo modelo de GAB	59

FIGURA 2.11	Isoterma de adsorção na temperatura de 70 °C ajustada pelo modelo de BET.....	60
FIGURA 2.12	Isoterma de adsorção na temperatura de 80 °C ajustada pelo modelo de BET.....	60
FIGURA 2.13	Histerese de tâmara à temperatura de 60 °C.....	62
FIGURA 2.14	Histerese de tâmara à temperatura de 70 °C.....	63
FIGURA 2.15	Histerese de tâmara à temperatura de 80 °C.....	64
FIGURA 3.1	Comparação dos modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 60 °C e velocidade do ar de secagem de 0,5 m/s.....	81
FIGURA 3.2	Comparação dos modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e central, com os valores experimentais para a temperatura de 60 °C e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.....	81
FIGURA 3.3	Comparação dos modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e central, com os valores experimentais para a temperatura de 60 °C e velocidade do ar de secagem de 1,5 m/s.....	82
FIGURA 3.4	Comparação dos modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e central, com os valores experimentais para a temperatura de 70 °C e velocidade do ar de secagem de 0,5 m/s.....	82
FIGURA 3.5	Comparação dos modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 70 °C e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.....	83
FIGURA 3.6	Comparação dos modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 70 °C e velocidade do ar de secagem de 1,5 m/s.....	83
FIGURA 3.7	Comparação dos modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 80 °C e velocidade do ar de secagem de 0,5 m/s.....	84
FIGURA 3.8	Comparação dos modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 80 °C e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.....	84
FIGURA 3.9	Comparação dos modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e central, com os valores experimentais para a temperatura de 80 °C e velocidade do ar de secagem de 1,5 m/s.....	85
FIGURA 4.1	Efeito da velocidade do ar de secagem sobre o conteúdo de umidade das tâmaras na temperatura de 60°C.....	114

FIGURA 4.2	Efeito da velocidade do ar de secagem sobre o conteúdo de umidade das tâmaras na temperatura de 70°C.....	114
FIGURA 4.3	Efeito da velocidade do ar de secagem sobre o conteúdo de umidade das tâmaras na temperatura de 80°C.....	115
FIGURA 4.4	Efeito da temperatura sobre o conteúdo de umidade das tâmaras com velocidade do ar de secagem de 0,5 m/s nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C.....	115
FIGURA 4.5	Efeito da temperatura sobre o conteúdo de umidade das tâmaras com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C.....	116
FIGURA 4.6	Efeito da temperatura sobre o conteúdo de umidade das tâmaras com velocidade do ar de secagem de 1,5 m/s nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C.....	116
FIGURA 4.7	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica (T = 60 °C v = 1,5 m/s)....	118
FIGURA 4.8	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica (T = 70 °C v = 1,5 m/s)....	118
FIGURA 4.9	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica (T = 80 °C v = 1,5 m/s)....	119
FIGURA 4.10	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T = 60 °C v = 0,5 m/s)..	123
FIGURA 4.11	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T = 60 °C v = 1,0 m/s)..	124
FIGURA 4.12	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T = 60 °C v = 1,5 m/s)..	124
FIGURA 4.13	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T = 70 °C v = 0,5 m/s)..	124
FIGURA 4.14	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T = 70 °C v = 1,0 m/s)..	125
FIGURA 4.15	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T = 70 °C v = 1,5 m/s)..	125
FIGURA 4.16	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T = 80 °C v = 0,5 m/s)..	125
FIGURA 4.17	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T = 80 °C v = 1,0 m/s)..	126

FIGURA 4.18	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica ($T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 1,5\text{ m/s}$)..	126
FIGURA 4.19	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria esférica ($T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 1,5\text{ m/s}$).....	129
FIGURA 4.20	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria esférica ($T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 1,5\text{ m/s}$).....	130
FIGURA 4.21	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria esférica ($T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 1,5\text{ m/s}$).....	130
FIGURA 4.22	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria cilíndrica ($T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 0,5\text{ m/s}$).....	132
FIGURA 4.23	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria cilíndrica ($T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 1,0\text{ m/s}$).....	133
FIGURA 4.24	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria cilíndrica ($T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 1,5\text{ m/s}$).....	133
FIGURA 4.25	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria cilíndrica ($T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 0,5\text{ m/s}$).....	133
FIGURA 4.26	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria cilíndrica ($T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 1,0\text{ m/s}$).....	134
FIGURA 4.27	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria cilíndrica ($T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 1,5\text{ m/s}$).....	134
FIGURA 4.28	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria cilíndrica ($T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 0,5\text{ m/s}$).....	134
FIGURA 4.29	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria cilíndrica ($T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 1,0\text{ m/s}$).....	135
FIGURA 4.30	Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria cilíndrica ($T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ $v = 1,5\text{ m/s}$).....	135

LISTA DE TABELAS

		Página
TABELA 1.1	Produção mundial de tâmaras.....	07
TABELA 1.2	Mudanças na composição de tâmaras durante o seu desenvolvimento.....	10
TABELA 1.3	Características químicas de tâmaras da variedade Zahidi para diferentes estádios de desenvolvimento.....	11
TABELA 1.4	Composição química da tâmara fresca, variedade Zahidi.....	22
TABELA 2.1	Diferentes valores de umidade relativas relacionadas a soluções salinas saturadas e as temperaturas 60, 70 e 80°C.....	40
TABELA 2.2	Valores experimentais de umidade de equilíbrio para dessorção de água em tâmaras.....	43
TABELA 2.3	Valores calculados de R_1 e R_2	50
TABELA 2.4	Número médio de dias decorridos para alcançar o equilíbrio higroscópico da tâmara na dessorção de água.....	50
TABELA 2.5	Número médio de dias decorridos para alcançar o equilíbrio higroscópico da tâmara na adsorção de água.....	51
TABELA 2.6	Valores experimentais de umidade de equilíbrio para dessorção de água nas tâmaras (<i>Phoenix dactylifera</i> L.).....	51
TABELA 2.7	Valores experimentais de umidade de equilíbrio para adsorção de água nas tâmaras (<i>Phoenix dactylifera</i> L.).....	51
TABELA 2.8	Parâmetros estimados do modelo de BET linearizado para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da dessorção de água na tâmara.....	53
TABELA 2.9	Parâmetros estimados do modelo de BET para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da dessorção de água na tâmara.....	53
TABELA 2.10	Parâmetros estimados do modelo de GAB para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da dessorção de água na tâmara.....	54
TABELA 2.11	Parâmetros estimados do modelo de Halsey para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da dessorção de água na tâmara.....	54

TABELA 2.12	Parâmetros estimados do modelo de Oswin para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da dessorção de água na tâmara.....	54
TABELA 2.13	Parâmetros estimados do modelo de BET linearizado para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da adsorção de água na tâmara.....	57
TABELA 2.14	Parâmetros estimados do modelo de BET para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da adsorção de água na tâmara.....	57
TABELA 2.15	Parâmetros estimados do modelo GAB para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da adsorção de água na tâmara.....	58
TABELA 2.16	Parâmetros estimados do modelo de Halsey para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da adsorção de água na tâmara.....	58
TABELA 2.17	Parâmetros estimados do modelo de Oswin para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da adsorção de água na tâmara.....	58
TABELA 3.1	Valores experimentais das dimensões características (fotos) em 10^{-3} m, durante todo o processo de secagem para a temperatura de 60 °C e três velocidades do ar de secagem (0,5; 1,0 e 1,5 m/s).....	74
TABELA 3.2	Valores experimentais das dimensões características (fotos) em 10^{-3} m, durante todo o processo de secagem para a temperatura de 70 °C e três velocidades do ar de secagem (0,5; 1,0 e 1,5 m/s).....	75
TABELA 3.3	Valores experimentais das dimensões características (fotos) em 10^{-3} m, durante todo o processo de secagem para a temperatura de 80 °C e três velocidades do ar de secagem (0,5; 1,0 e 1,5 m/s).....	75
TABELA 3.4	Valores experimentais das dimensões características (paquímetro) em 10^{-3} m, durante todo o processo de secagem para a temperatura de 60 °C e três velocidades do ar de secagem (0,5; 1,0 e 1,5 m/s).....	76
TABELA 3.5	Valores experimentais das dimensões características (paquímetro) em 10^{-3} m, durante todo o processo de secagem para a temperatura de 70 °C e três velocidades do ar de secagem (0,5; 1,0 e 1,5 m/s).....	76

TABELA 3.6	Valores experimentais das dimensões características (paquímetro) em 10^{-3} m, durante todo o processo de secagem para a temperatura de 80 °C e três velocidades do ar de secagem (0,5; 1,0 e 1,5 m/s).....	76
TABELA 3.7	Erro relativo da média calculado para paquímetro e fotografia.....	78
TABELA 3.8	Valores do coeficiente de encolhimento dos modelos Uniforme 1 e 2 e do modelo Central para diferentes temperaturas e diferentes velocidades do ar de secagem....	86
TABELA 4.1	Dados das curvas de secagem de tâmaras na temperatura de 60 °C e velocidades do ar de 0,5; 1,0 e 1,5 m/s.....	112
TABELA 4.2	Dados das curvas de secagem de tâmaras na temperatura de 70 °C e velocidades do ar de 0,5; 1,0 e 1,5 m/s.....	112
TABELA 4.3	Dados das curvas de secagem de tâmaras na temperatura de 80 °C e velocidades do ar de 0,5; 1,0 e 1,5 m/s.....	113
TABELA 4.4	Valores de UR no interior do secador em função da temperatura e velocidade do ar de secagem.....	113
TABELA 4.5	Valores de de difusividade efetiva (T = 60 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria esférica.....	117
TABELA 4.6	Valores de de difusividade efetiva (T = 70 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria esférica.....	117
TABELA 4.7	Valores de de difusividade efetiva (T = 80 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria esférica.....	117
TABELA 4.8	Valores de difusividade efetiva (T = 60 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional considerando a geometria cilíndrica.....	119
TABELA 4.9	Valores de difusividade efetiva (T = 70 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional considerando a geometria cilíndrica.....	120
TABELA 4.10	Valores de difusividade efetiva (T = 80 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional considerando a geometria cilíndrica.....	120
TABELA 4.11	Porcentagem de incremento da difusividade efetiva devida à variação de velocidade.....	121

TABELA 4.12	Porcentagem de incremento da difusividade efetiva devida à variação de temperatura.....	122
TABELA 4.13	Dados de concentração de tâmaras na temperatura de 60 °C e velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s.....	127
TABELA 4.14	Dados de concentração de tâmaras na temperatura de 70 °C e velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s.....	127
TABELA 4.15	Dados de concentração de tâmaras na temperatura de 80 °C e velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s.....	128
TABELA 4.16	Valores de de difusividade efetiva (T = 60 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria esférica e o encolhimento.....	128
TABELA 4.17	Valores de de difusividade efetiva (T = 70 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria esférica e o encolhimento.....	129
TABELA 4.18	Valores de de difusividade efetiva (T = 80 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria esférica e o encolhimento.....	129
TABELA 4.19	Valores de difusividade efetiva (T = 60 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria cilíndrica e o encolhimento.....	131
TABELA 4.20	Valores de difusividade efetiva (T = 70 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria cilíndrica e o encolhimento.....	131
TABELA 4.21	Valores de difusividade efetiva (T = 80 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria cilíndrica e o encolhimento.....	132
TABELA 4.22	Porcentagem de incremento da difusividade efetiva devido a variação de velocidade.....	136
TABELA 4.23	Porcentagem de incremento da difusividade efetiva devido a variação de temperatura.....	136
TABELA 4.24	Valores calculados para energia de ativação durante a secagem de tâmara sem encolhimento (cilindro).....	138
TABELA 4.25	Valores calculados para energia de ativação durante a secagem de tâmara com encolhimento (cilindro).....	138

RESUMO

Estudou-se o comportamento do processo de secagem de tâmaras da variedade Zahidi, a fim de se obter uma tâmara-passa deste fruto, que vem apresentando boas perspectivas de cultivo e comercialização no Brasil.

Os dados experimentais das isotermas de sorção nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C, com umidade relativa variando de 10,51% a 80,25% obtida através de soluções saturadas de sais, foram ajustadas pelos modelos de BET, GAB, Halsey e Oswin. Os melhores ajustes foram obtidos pelas equações de BET e GAB.

O encolhimento foi determinado e correlacionado com a perda de umidade através dos modelos propostos por SUZUKI et al. (1976). Para a caracterização da geometria do fruto foram testadas quatro formas geométricas distintas: cilindro com tampa, cilindro sem tampa, elipse oblata e elipse prolata. Os resultados mostraram que a tâmara pode ser considerada um cilindro sem tampa.

As corridas experimentais de secagem foram conduzidas em um secador vertical convectivo, nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C, com umidade relativa variando de 6,66 a 11,59%. As curvas de secagem foram ajustadas pela equação de difusão líquida para geometria esférica e geometria cilíndrica do material, considerando ou não o encolhimento. A melhor correlação das curvas de secagem foi obtida utilizando o modelo difusional de Fick para a geometria cilíndrica da tâmara considerando o encolhimento. Os valores de difusividade efetiva foram de $1,02 \cdot 10^{-7}$ a $4,52 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para curvas de secagem sem encolhimento e de $0,71 \cdot 10^{-7}$ a $3,81 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para curvas com encolhimento.

A energia de ativação de Arrhenius foi calculada para os valores de difusividade sem e com a consideração do encolhimento, variando de 41,23 kJ/mol. K a 60,98 kJ/mol. K e de 36,35 kJ/mol. K a 69,59 kJ/mol. K, respectivamente.

ABSTRACT

Drying process behavior of date was studied to obtain dried date (passa). The production and commercialization of date are successfully growing in Brazil.

The experimental values of sorption isotherms at 60, 70 and 80°C were obtained at relative humidity ranging from 10,51 % to 80,25% and were correlated by BET, GAB, HALSEY and OSWIN model. BET and GAB models presented the best correlation.

The shrinkage during drying was observed and verified by SUZUKI et al (1976) equations'. Date geometric forms were characterized by four different shapes: cylinder with caps, cylinder without caps, oblate ellipse and prolate ellipse. The results indicate that the date may be considered as a cylinder without caps.

The experimental drying curves were obtained to 60, 70 and 80°C in a convective vertical dryer. The relative humidity ranged from 6.66% to 11.59%. The drying curve was using Fick's second law for liquid diffusion solved for spherical and cylindrical boundaries, with and without shrinkage. The best correlation was obtained to cylindrical geometry with shrinkage. Effective diffusivity obtained ranged from $1.02 \cdot 10^{-7}$ to $4,52 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ without shrinkage and from $0.72 \cdot 10^{-7}$ to $3,81 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ with shrinkage.

Arrhenious type activation energy was calculated using the effective diffusivities, ranging from 41,23 kJ/mol. K to 60,98 kJ/mol. K without and from 36,35 kJ/mol. K to 69,59 kJ/mol. K with shrinkage.

CAPÍTULO 1
TÂMARA

1 - INTRODUÇÃO

A tâmara é um fruto conhecido e consumido mundialmente desde os tempos mais remotos, até hoje. No entanto, o consumo nacional dessa fruta só é viabilizado pela importação, devido principalmente à inexistência do cultivo desta cultura no Brasil e de técnicas de processamento do fruto.

O Brasil devido às suas características climáticas pode vir a se tornar um grande produtor de tâmaras. Entre todos os que já trabalharam com tamareiras no Brasil, parece unânime a opinião de que esta cultura é uma alternativa viável para o Nordeste semi-árido, tanto para complementar a alimentação, devido a sua caracterização de fruto altamente energético (grande quantidade de açúcar presente na sua polpa) e/ou à renda familiar de pequenos produtores da zona de sequeiro, como para exploração intensiva mais tecnificada dos produtores das áreas irrigadas.

Em vista disso, o Centro de Pesquisas Agropecuárias do Trópico Semi-Árido (CPATSA), da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), vem realizando trabalhos sobre o estudo do comportamento de variedades, a caracterização genética das variedades introduzidas e o desenvolvimento de técnicas de cultura de tecidos para a produção de mudas.

A preservação dos alimentos pela remoção de água permite a redução do crescimento microbiano e reduz o desenvolvimento da maioria das reações bioquímicas que ocorre na presença de umidade. Após o amadurecimento, as tâmaras com o seu teor de umidade inicial em torno de 80 a 90% podem ser transformadas em passas, por um processo de secagem até que a umidade da polpa esteja próxima de 23 a 30%, dependendo da variedade ou da classe a que pertence. Tâmaras com este teor de umidade podem ser armazenadas por bastante tempo, mantendo sua textura macia, sem risco de fermentação, contaminação ou perda de "flavor" (MUNIER, 1973 e RYGG, 1948).

Mesmo nos países que são grandes produtores e exportadores de tâmaras, como Irã, Iraque, Paquistão, entre outros, o processo de secagem destas,

ainda é realizado de maneira artesanal na maioria de sua produção. Tratando-se de uma cultura desconhecida e pouco estudada no Brasil, torna-se necessário o estudo de técnicas de manejo que envolvam desde os tratos culturais até a colheita e posterior processamento.

E o objetivo específico deste capítulo é:

- Determinar os valores dos principais componentes químicos encontrados na tâmara da variedade Zahidi, após o seu amadurecimento;

2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1 - Matéria prima

2.1.1 - Tâmara

O nome botânico da tâmara é *Phoenix dactylifera* L. Segundo BATTLER (1926) existem cerca de 12 espécies do gênero *Phoenix*.

O fruto é uma baga. A flor tem três carpelos, mas após a polinização somente um destes se desenvolve. O fruto pode ser de forma oblonga ou elipsoidal. A Figura 1.1 mostra seus diversos componentes numa seção longitudinal.

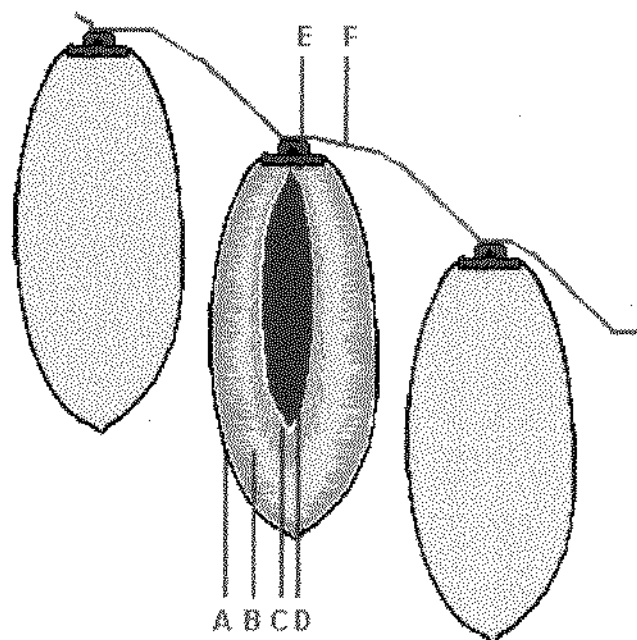
A semente, tem a forma de um cilindro ligeiramente pontiagudo nas extremidades, com um comprimento três vezes maior que o seu diâmetro e de uma cor entre o cinza e o pardo, com um embrião pequeno, apresentando grande abundância em endosperma.

Segundo NUNES et al. (1989) as tâmaras são drupas (frutos formados por um só carpelo, contendo no seu interior, uma só semente) cilindro-elípticas, de forma e tamanho muito variáveis, dependendo da variedade com sementes sulcadas. Variam de aproximadamente 20 a 40 mm de comprimento por 8 a 80 mm de largura. A polpa é quase translúcida, ligeiramente gelatinosa conforme pode ser visto na Figura 1.2.

O pericarpo é firme, carnoso, açucarado. Quando imatura a tâmara é verde e dura. Madura é amarela ou vermelha, conforme a variedade a que pertence. O início de formação de frutos da tamareira varia muito com as condições de clima e solo. A umidade relativa do ar quando baixa influi muito favoravelmente na polinização. Flores não fecundadas produzem frutos sem sementes, inferiores em quantidade e tamanho. Em terra fértil, com verão quente e longo, começam as tamareiras a frutificar ainda muito novas. Nos Estados Unidos (Arizona), a maioria das variedades obtidas

por sementes frutifica a partir dos 4 anos, na região de origem; de 8-10 anos e no Brasil, no semi-árido a partir dos dois anos e meio (GOMES, 1975).

Figura 1.1 - Corte longitudinal de uma tâmara.



- A - Epicarpo
- B - Mesocarpo
- C - Endocarpo
- D - Semente
- E - Perianto
- F - Espícula

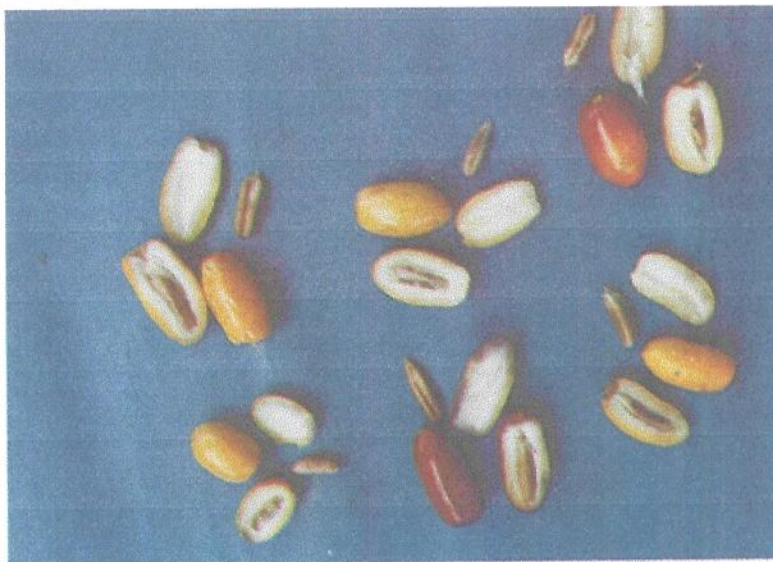


Figura 1.2. Aspecto do fruto da tâmareira

As tâmaras se formam em ramos. O ramo é formado por um eixo principal que pode ter uma altura de 4 a 7cm. Deste eixo nascem os outros eixos secundários (espículas), cujo comprimento pode ser de 10 a 100cm (Figura 1.3). As tâmaras, em grupos que vão de 2 a 3 até 50 ou 60, se unem por seus periantos diretamente ao ramo (DOWSON e ATEN, 1963). Uma tamareira produz normalmente de 10 a 15 cachos de frutos por ano.

São inúmeras as variedades que atualmente podem ser encontradas nos diversos países e nos vários estados do Brasil, algumas já obtidas localmente e outras importadas da Ásia, África e América do Norte (NUNES et al., 1989).

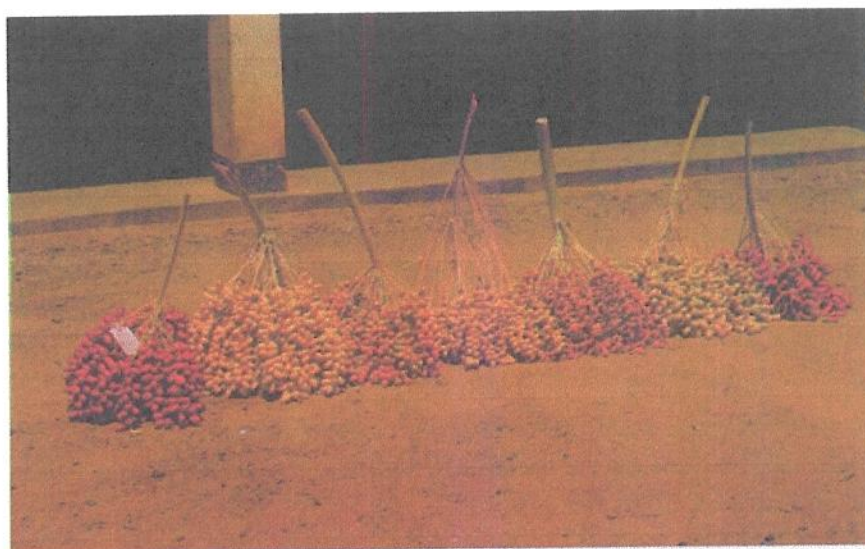


Figura 1.3. Cachos de diversas variedades vermelhas e amarelas

Existem muitas variedades, porém são poucas as que tem valor comercial. O objetivo da produção condiciona, evidentemente, a variedade a ser plantada. A variedade mais cultivada em todo o mundo é a Deglet Noor, que representa 90% da produção da Argélia e Tunísia e 75% da produção dos Estados Unidos (NIXON, 1950 e GOMES, 1975)

No Oriente a fruta é frequentemente fermentada, produzindo uma forte bebida alcoólica e também vinagre. As tâmaras são mais comercializadas como frutas secas, embora sejam muitas vezes encontradas em setores de produtos frescos no Egito desde a antiguidade, porém sua cultura somente tornou-se importante mais tarde, no Iraque, no Oeste do Irã, cruzando a Arábia e o Norte da África. A extensão mundial de produção de tâmaras, apresentada em trabalho mais recente (BUKAEV, 1987) é dada na Tabela 1.1.

A máxima produção ainda ocorre no Noroeste e Norte da África. Embora a produção de tâmaras na Califórnia na década de 70 tenha sido significativa para aquele ponto regional local, esta foi inferior à 1% da produção mundial. Consequentemente ocorreram grandes importações de tâmaras para os EUA todos os anos, principalmente do Iraque (75 %) e do Irã e um pouco de outros países do Noroeste e Norte da África. Em 1890, o "U. S .Department of Agriculture" conseguiu uma pequena importação de rebentos de tâmaras, porém estes mais tarde provaram ser de qualidade inferior. No ano seguinte rebentos de melhores variedades foram obtidos por cientistas quando visitaram as regiões da Argélia, Tunísia, Egito e Iraque. Plantações experimentais foram feitas no Arizona e mais tarde na Califórnia. Estes experimentos atraíram a atenção de prováveis produtores e levaram a grandes importações comerciais durante o período de 1911 a 1922 (CONSIDINE, 1982).

As variedades mais importantes cultivadas mundialmente são: Deglet Noor, Zahidi, Sayer, Medjool, Thoory, Itamir, Hajx, Khodrawy, Halawy, Khalasa e Empress.

Tabela 1.1. Produção mundial de tâmaras

CONTINENTES	PRODUÇÃO (1000 ton)	% da produção mundial
África	963	39,5
Norte e América Central	15	0,6
América do Sul	1	0,1
Ásia	1,439	59,7
Europa	17	0,7
TOTAL	2,435	100
PAÍSES		
Iraque	498	20,5
Egito	409	16,8
Irã	310	12,7
Arábia Saudita	262	10,8
Paquistão	186	7,6
Argélia	185	7,6
Sudão	105	4,3
Marrocos	102	4,2
Yemen	70	2,9
Líbia	65	2,7
Oman	50	2,1
Tunísia	46	1,9
Yemen Democrático	42	1,7
Chad	25	1,0
EUA	20	0,8
Espanha	16	0,7
Bahrain	16	0,7
Mauritania	13	0,5
Nigéria	6	0,2
Somália	6	0,2
outros	3	0,1
TOTAL	2435	100

Fonte: Bukaev(1987)

A produção mundial de tâmaras está em torno de 3.192.000 toneladas, segundo dados fornecidos pela FAO (1996).

A tâmara é um alimento altamente energético devido a sua alta concentração de açúcares e também uma fruta de uso medicinal em larga escala, bastante eficaz nas enfermidades das vias respiratórias (BALBACH, 1981; CORREIA, 1975 e JAWANDA, 1972).

No Brasil, a tâmara é uma fruta tradicional das festas natalinas e de início de ano. Contudo a demanda brasileira atualmente é totalmente dependente de importação.

2.1.2 - Composição química

Em termos gerais a tâmara totalmente madura, consiste em 2/3 de açúcar, uma quarta parte de água e o resto de celulose, pectinas, cinzas e outros (DOWSON e ATEN, 1963).

De acordo com MUNIER (1973) a polpa da tâmara é rica em açúcares e sais minerais. Os principais açúcares na tâmaras são a glicose, a sacarose e a frutose. Os minerais encontrados em maior quantidade são o potássio, o cálcio, o fósforo, o magnésio e o sódio. Segundo BOOIJ et al. (1992), a tâmara também apresenta alto teor de carotenóides (pró-vitamina A) e vitaminas do grupo B.

BA-ANGGOD (1984) analisou 30 variedades de tâmaras nos Emirados Árabes Unidos e verificou que os teores de açúcares e minerais podem apresentar uma ampla variação em função da variedade estudada. O autor encontrou teores de açúcar que variavam de 20 a 88%, proteína variando de 2 a 4,8%, potássio e fósforo de 400 a 1900 (mg/g de matéria-seca) e 40 a 120 (mg/g de matéria-seca), respectivamente.

A composição química das tâmaras varia muito durante o seu desenvolvimento e os teores de água e açúcar são utilizados para sua classificação. De acordo com o grau de umidade, as tâmaras maduras podem ser classificadas em três categorias: tâmaras moles, quando o teor de umidade é igual ou superior a 30%;

tâmaras semi-moles, quando o teor de umidade está entre 20 e 30%; tâmaras secas, quando o teor de umidade é menor que 20% (HUSSEIN et al., 1974).

As modificações químicas servem para caracterizar o estágio de desenvolvimento dos frutos da tamareira. Cada estágio de desenvolvimento é identificado nominalmente. MUNIER (1973), DOWSON e ATEN (1963); e BOOIJ et al. (1992), utilizam a nomenclatura iraquiana para classificar cada um destes estádios:

- Habbabook (H), imediatamente após o pegamento. O fruto tem cor creme esverdeado;

- Kimri (K), frutos de cor verde, com alta taxa de crescimento, aumento em peso e volume, acumulação de açúcares redutores e acidez elevada;

- Kalal (L), mudança de coloração verde para a cor característica da variedade, aumento rápido do teor de açúcares totais e de sacarose, decresce a acidez e o teor de água;

- Rutab (R), o fruto perde sua adstringência, começa a amolecer a partir da extremidade, diminui o teor de água;

- Tamar (T), corresponde ao estágio final da maturação, a tâmara agora perdeu quase toda sua umidade.

No início do amadurecimento, 80 a 85% do açúcar total está na forma de sacarose, o restante é açúcar invertido. Durante o amadurecimento, a sacarose é hidrolizada e na fruta totalmente madura a sacarose constitui de 60 a 80% do açúcar total. Um número de fatores influencia a quantidade de sacarose hidrolizada durante o amadurecimento. Tratamentos culturais durante o período de crescimento, e a temperatura, umidade, período de chuvas durante o amadurecimento, indubitavelmente influenciam o total de hidrólise (RYGG, 1948)

Embora o amido não seja usualmente encontrado em tâmaras maduras, outros polossacarídeos ácidos hidrolizados ocorrem em pequenas quantidades. Algumas destas substâncias pécticas são convertidas em pectina sóluvel no decorrer do amadurecimento e o total de substâncias pécticas diminui. Gorduras e ceras em tâmaras tem recebido pouca atenção.

O pH da variedade Deglett Noor pode aumentar de cerca de 5,3 a 5,6 para um pH de 6,0 a 6,4. com o amadurecimento, sendo que valores de pH mais altos caracterizam tâmaras de alta qualidade.

A Tabela 1.2 mostra algumas destas modificações que ocorrem durante o desenvolvimento da tâmaras da variedade Degleet Noor (RYGG, 1948).

Tabela 1.2 - Mudanças na composição de tâmaras durante o seu desenvolvimento

Estádio	P. fresco (g)	U (b.u) (%)	Aç. red. (%)	totais (%)	Sacarose (%)
Kimri	9,8	85	5	13	8
Kalal	15,1	79	20	60	40
50% Rutab	14,4	41	13	74	61
90% Rutab	13,6	35	20	78	58
Tamar	12,6	30	24	77	53

Segundo COOK e FURR (1952) a persistência da sacarose após o estágio Kalal, também serve para classificar as tâmaras. As tâmaras moles são mais ricas em açúcar invertido; as tâmaras secas (TAMAR) são mais ricas em sacarose e as tâmaras semi-moles ficam em posição intermediária.

BUKAEV et al. (1987) visando obter a melhor variedade para fins industriais estudaram as mudanças físicas e químicas de três variedades de tâmara durante quatro estádios de maturação (Kimri, Kalal, Rutab e Tamar). Os resultados mostraram algumas similaridades nas três variedades. Os teores de açúcar total e redutores aumentaram do estágio Kimri ao Tamar, enquanto que o teor de umidade, proteína, gordura e fibra diminuíram. Os resultados mostram ser a variedade Zahidi a mais indicada para fins industriais, devido ao seu alto teor de açúcar e baixo teor de pectina quando comparado com outras variedades. Na Tabela 1.3 são mostrados estes resultados, somente para a variedade Zahidi, que foi utilizada no presente trabalho.

Tabela 1.3 -Características químicas de tâmaras da variedade Zahidi para diferentes estádios de desenvolvimento.

(%) base seca							
Estádio	Cinza	Proteína	Gordura	Fibra	A. totais	Sacarose	A. redut.
Kimri	3,00	3,10	0,70	7,30	37,0	3,0	34,0
Kalai	3,72	2,89	0,48	3,60	56,0	16,0	40,0
Rutab	2,00	2,50	0,42	2,00	70,0	10,0	60,0
Tamar	2,12	2,30	0,40	1,86	83,4	7,1	76,4

2.1.3 - Amadurecimento

Existem alguns aspectos que devem ser considerados ou estudados, para que se possa determinar o momento mais adequado para colheita: variedades de tamareira que apresentam maturação escalonada dos frutos no ramo (MUNIER, 1973); precipitações pluviométricas ou alta umidade relativa na época da maturação o que provoca deterioração dos frutos nos ramos (COOK, 1940); oportunidade de mercado e qualidade dos frutos amadurecidos por processos artificiais (NIELSEN et al. 1950 e RYGG, 1948).

Em tamareiras cujos frutos amadurecem simultâneamente, a colheita pode ser feita cortando-se os cachos quando 90 a 100% da tâmaras estiverem totalmente maduras (Figura 1.4). Por outro lado, se a variedade tem amadurecimento escalonado, a colheita tem que ser realizada a medida que os frutos vão amadurecendo, acarretando aumento do custo de mão-de-obra (MUNIER, 1973).

Para amadurecimento apropriado, a tâmara requer verões prolongados sem chuva ou alta umidade relativa. A quantidade de chuva em particular é menos importante que as condições sobre as quais ela ocorre. Uma chuva leve acompanhada de períodos prolongados de tempo nublado e alta umidade pode causar mais danos, que uma chuva forte seguida de tempo claro e ventos secos. Desta forma as tâmaras tem seu crescimento melhor sucedido somente em regiões quentes e secas. Embora a tamareira seja bastante resistente, capaz de sobreviver por longos períodos sem irrigação, se há água abundante, uma irrigação regular resultará em uma boa colheita de frutos de tamanho adequado (CONSIDINE, 1982).

Variações climáticas, e características genéticas de cada variedades, interferem no amadurecimento das tâmaras. Por esta razão RYGG (1948) recomenda que se determine para cada caso, o estágio de desenvolvimento em que o fruto apresenta condições fisiológicas mais adequadas para a prática do amadurecimento artificial. Este mesmo autor (1950), estudando condições de colheita e amadurecimento artificial de tâmaras da variedade Deglet Noor na Califórnia observou que os frutos no estágio Kalal, já acumulavam toda a sacarose da sua composição normal, podendo portanto ser colhido e colocado para amadurecer artificialmente resultando um produto com qualidade comparável aos frutos amadurecidos naturalmente.

Segundo MUNIER (1973) a relação entre o conteúdo de sacarose e açúcares invertidos na polpa das tâmaras, tem uma influência muito marcante na qualidade final do produto quando se emprega o amadurecimento artificial.

O amadurecimento artificial das tâmaras pode ser obtido por processos físicos (calor e frio), químicos (ácidos, bases e sais) ou orgânicos (reguladores de crescimento). Entretanto, para cada variedade e condições de cultivo é necessário determinar o processo mais adequado para obtenção de um produto de alta qualidade.

DOWSON e ATEN (1963) recomendam que o amadurecimento artificial seja feito através do uso de temperatura e umidade relativa controladas. Segundo estes autores, qualquer que seja a forma em que as enzimas atuam nas tâmaras, o certo é que a temperatura permite ou acelera a conversão do amido em sacarose, a conversão da sacarose em açúcares redutores, a precipitação de taninos na forma insolúvel e o amaciamento da polpa e da porção fibrosa.

KALRA et al. (1976) obtiveram bons resultados no amadurecimento mergulhando tâmaras da variedade Medjool em água fervente (acima de 95°C) durante seis minutos.

MARLOTH et al. (1955) sugerem o amadurecimento das tâmaras ao sol com circulação de ar quente obtido através de um aquecedor solar.

Já MONCIERO (1950) conclui que as tâmaras da variedade Deglet Noor, amadureciam rapidamente em baixas temperaturas, mas com a mesma rapidez

tornavam-se escuras se colocadas em local quente. MONCIERO (1954) verificou que estas mesmas tâmaras no estádio Kalal se congeladas a -10°C por um período de 12 a 14 horas, amadureciam completamente após o descongelamento, mantendo a qualidade.

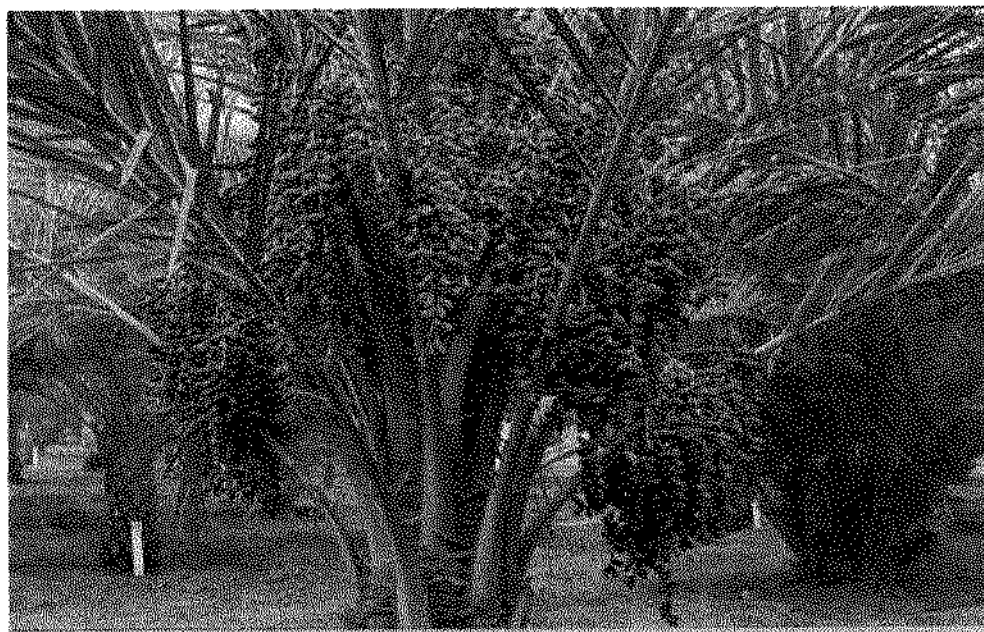


Figura 1.4. A tamareira

2.2 - A tamareira

A capacidade de adaptação e sobrevivência das tamareiras em condições ambientais desfavoráveis para a maioria das culturas é muito grande. A tamareira pode suportar tanto temperaturas mais elevadas das regiões mais quentes, como até certo ponto temperaturas próximas de 0°C . É ainda uma planta muito tolerante a salinidade e pouco exigente quanto a fertilidade do solo. Seu poderoso sistema radicular permite vegetar bem em regiões de atmosfera muito seca (MUNIER, 1973). Em geral, as raízes absorventes ficam em torno de 60 cm. A raiz primária não se desenvolve muito, as demais é que se desenvolvem formando raízes fasciculadas (NIXON, 1951). A tamareira é um estipe de porte ereto, grosso, forte, atingindo na idade adulta até 30 metros de altura e de 2 a 3 metros de circunferência, que suporta uma coroa de folhas pinadas, coreáceas, verdejantes (BALLANTYME, 1947 e GOMES, 1975). Uma árvore

adulta quando bem cuidada, pode produzir cerca de 100 kg de frutos anualmente (DOWSON e ATEN, 1963).

A planta possui de 60 a 180 folhas, cada uma com duração de 2 a 7 anos. O número de cachos depende do número de folhas e há correlação positiva entre este número e a quantidade de frutos (EVREINOFF, 1956 e CANPENTE, 1981). As folhas são pecioladas, possuem bainha e lígula e apresentam comprimento de 2 a 5m e largura de 0,40 a 1,0m. Anualmente, aproximadamente 28 folhas se formam simetricamente ao redor do caule em uma definida filotaxia (Figura 1.5).

A inflorescência é um grande espigão ramificado. Em uma árvore madura, um único cacho de flor pode ser composto de milhares de flores. As flores são de dois sexos diferentes, nascidas de diferentes plantas e são pequenas, brancas e de textura firme. O pistilo das flores tem 3 carpelos, cada um com um estigma curto e curvado. Os carpelos são sempre cercados pelo perianto, composto de três sépalas unidas e três pétalas. As flores são resistentes e podem aguentar seis estames, que são de tamanho maior que o pistilo e mais ostentosos. Após a fertilização somente um dos três carpelos se desenvolve, os outros dois são eliminados. No início, o carpelo é branco, mas algumas vezes após a fertilização se torna verde e assim permanece durante o crescimento.

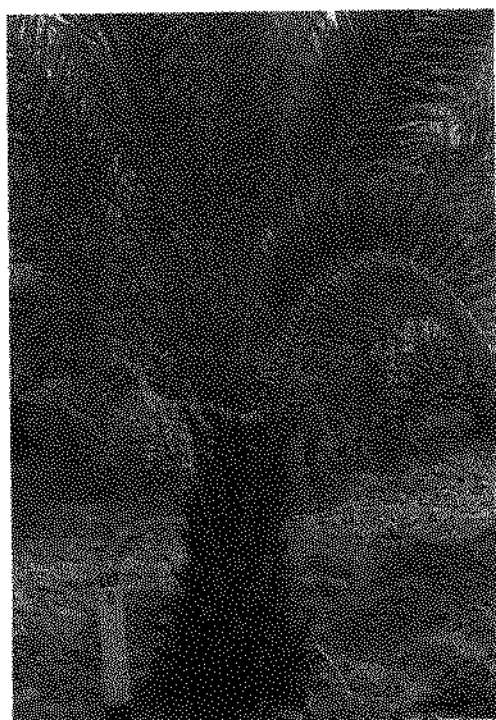


Figura 1.5. Tamareira variedade amarela

Com relação as suas flores, a tamareira classifica-se como planta dióica, isto é, cada palmeira só produz um tipo de flor, ou masculina ou feminina, sendo necessário a presença de uma planta de cada sexo para que haja frutificação. Porém uma planta masculina produz pólen suficiente para fecundar flores de dezenas de plantas femininas como pode ser visualizado através da Figura 1.6. A polinização usualmente ocorre com a ajuda do vento e/ou pelos insetos, mas utiliza-se também a polinização artificial, o que requer uma certa técnica (NUNES et al, 1989).



Figura 1.6. Flor masculina

De acordo com PIMENTEL GOMES (1978) os primeiros registros da tamareira no Brasil datam de 1928, quando pesquisadores da ESALQ (Piracicaba-SP), realizaram algumas pesquisas, chegando mesmo a produzir algumas variedades nacionais.

Outras tentativas de estabelecimento desta cultura foram feitas no país em diferentes condições climáticas, mas as mais promissoras foram aquelas realizadas na região semi-árida do Nordeste. BRITTO GUERRA (1939) relata que no Posto Agrícola de São Gonçalo, na Paraíba, foi realizado um estudo do comportamento de tamareiras, em plantas produzidas a partir de sementes adquiridas no mercado de Fortaleza-CE, as quais aos três anos de idade começaram a produzir frutos.

A existência de tamareiras na região Norte do Brasil data do século passado, segundo relato de SCHRADER (1946). Em 1983 o Centro de Pesquisas Agropecuárias do Trópico Semi-Árido (CPATSA), introduziu e está avaliando o comportamento de variedades de tamareiras de origem africana e norte-americana,

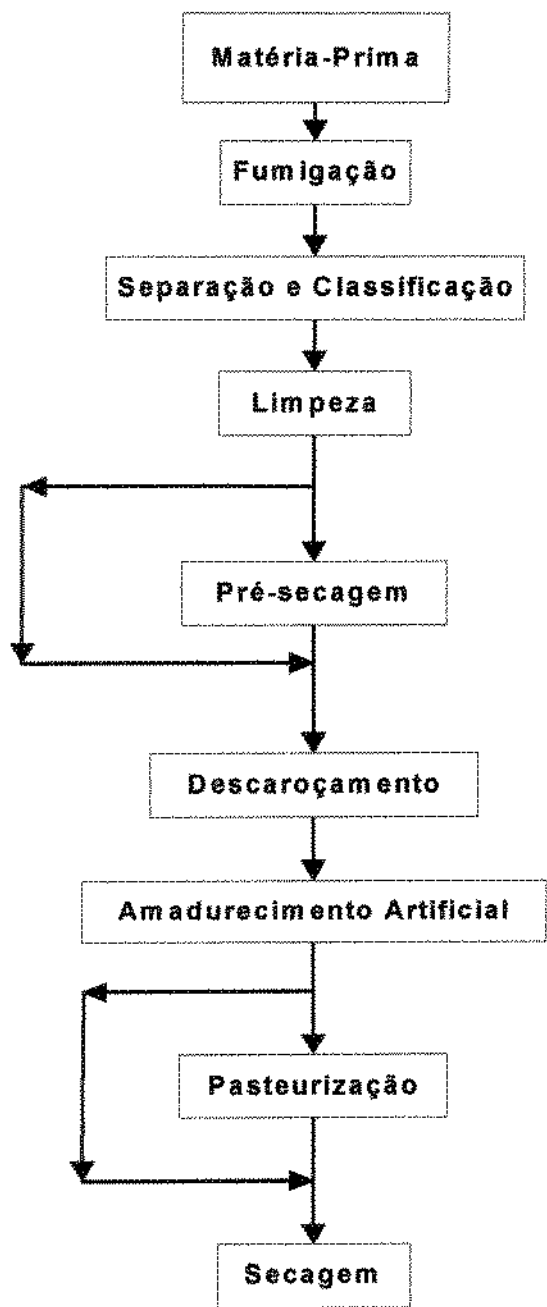
cultivadas com irrigação. Nestas condições as plantas iniciaram a produção a partir dos dois anos e meio após o transplântio das mudas. Além da precocidade, as tamareiras apresentam-se bastante vigorosas, florando sempre entre os meses de junho a agosto (NUNES et al., 1989).

Devido a condições climáticas peculiares, principalmente em relação a umidade relativa do ar e as temperaturas máximas e mínimas, o período de florescimento das tamareiras na região do Nordeste semi-árido, ocorre sempre entre os meses de junho a agosto, de modo que o período de amadurecimento dos frutos de dá entre dezembro e fevereiro, coincidindo com o período de maior probabilidade de ocorrência de chuvas, quando a umidade relativa do ar é mais elevada.

De acordo com MUNIER (1973) o amadurecimento das tâmaras requer baixa umidade relativa do ar. Quando a umidade é elevada, acima de 60%, verifica-se atraso na floração, queda na qualidade dos frutos e maior perda devido ao apodrecimento, o que onera bastante as operações de colheita resultando em queda na qualidade do produto.

2.3. - Processamento

O processamento das tâmaras geralmente apresenta a seguinte sequência, nos principais países produtores (DOWSON e ATEN, 1963):.



2.3.1 - Descrição das etapas de processamento de tâmaras (DOWSON e ATEN, 1963):

- Fumigação: consiste em colocar o fumigante na forma líquida nas caixas onde estão armazenadas as tâmaras. Este fumigante evapora, atuando as caixas como pequenas câmaras de fumigação.
- Separação e classificação: feita segundo o estágio de maturação e a qualidade do fruto.
- Limpeza: consiste em agitar os frutos em bandejas de telas metálicas. Após separadas as impurezas por agitação, as tâmaras são submetidas a limpeza utilizando jorro de ar ou a pulverização com água e detergentes, com posterior enxague em água pura. O procedimento utilizado para evitar a fermentação devido ao aumento da umidade do fruto após a pulverização, é a adição de 1cm^3 de uma solução de óxido de etileno para cada 454g de frutos.
- Pré-secagem: quando submetidas à pulverização com água e detergente, as tâmaras absorvem umidade (2-3%), sendo necessário uma secagem posterior com ventilação de ar quente sobre as tâmaras dispostas em bandejas com fundo de tela metálica.
- Descaroçamento: pode ser feito através de máquinas de descaroçamento manuais ou automáticas ou mesmo manualmente, fazendo um corte longitudinal na tâmara onde se extrai o caroço com a ponta do estilete, tendo cuidado de recolocar o tegumento que envolve o caroço, de volta no fruto, para que as duas bordas da incisão se juntem.
- Amadurecimento artificial: obtido submetendo as tâmaras a condições de temperatura e umidade relativa controladas.
- Pasteurização: é a operação na qual as tâmaras são submetidas a uma temperatura de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 20 minutos ou a uma temperatura ligeiramente superior por um tempo menor.

- Secagem: as tâmaras são colocadas em secadores que utilizam corrente de ar cuja temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem podem ser controladas.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

Esta etapa do presente trabalho foi realizada no Laboratório de Medidas Físicas da Faculdade de Engenharia de Alimentos e no Laboratório de Secagem da Faculdade de Engenharia Agrícola.

A matéria-prima utilizada foi a tâmara (*Phoenix dactylifera* L.) da variedade Zahidi, cultivada no Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA-EMBRAPA), em Petrolina-PE.

As tâmaras foram colhidas no estágio Kalal e em seguida congeladas à temperatura de -10°C e enviadas por via aérea até a Faculdade de Engenharia de Alimentos (DEA/FEA - UNICAMP).

3.1 - Métodos

3.1.1 - Amadurecimento

A cada etapa da fase experimental eram retirados lotes de tâmaras do freezer e descongelados à temperatura ambiente, por um período de 12 horas, onde se aproximavam do estágio Rutab, de acordo com a metodologia sugerida por QUEIROZ et al. (1989) e MONCIERO (1950 e 1954).

De acordo com a literatura (DOWSON e ATEN, 1963), as mudanças que se operam durante a maturação, só ocorrem desde que esta tenha começado de forma natural, isto é, na tamareira e tenha prosseguido até certo ponto. Se não se alcançou este ponto ou seja a maturidade fisiológica (estádio Kalal), o tratamento térmico não terá efeito nenhum.

Este ponto é provavelmente aquele no qual uma vez alcançada a grande produção de açúcar na tâmara, que se observa pouco antes da maturação, é liberada

uma enzima. Depois disso, mesmo que a tâmara tenha se separado da palmeira, o amadurecimento prossegue normalmente, sempre que exista a temperatura e umidade necessárias. Qualquer que seja a forma em que as enzimas atuam nas tâmaras, o certo é que o tratamento térmico (calor ou frio), permite ou acelera a conversão do amido em sacarose, a conversão da sacarose em açúcares redutores, a precipitação de taninos na forma insolúvel, o amaciamento da polpa e da porção fibrosa, isto é, a conversão da celulose em açúcar e o escurecimento da polpa e da casca (DOWSON e ATEN, 1963).

3.1.2 - Análises físicas e químicas

Após atingido o estágio Rutab foram feitas análises do conteúdo de umidade das tâmaras, utilizando estufa à vácuo, com pressão inferior a 60 mmHg e temperatura de $65^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 48 horas, conforme método fornecido pela AOAC (1984). Os resultados destas análises são mostrados na Tabela 1.4.

Além do teor de umidade determinou-se também o conteúdo de açúcares totais, redutores, sacarose, fibras, cinzas, proteína, gordura e amido segundo (AOAC, 1984). Todas estas análises estão descritas no Apêndice 1.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1.4 são apresentados os resultados das análises químicas feitas nas tâmaras no início do estágio Rutab, de acordo com os métodos fornecidos pela Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1984). Todas as análises foram feitas em triplicatas.

Tabela 1.4 - Composição química da tâmara fresca , variedade Zahidi.

Umidade (%)	67,79
Açúcares totais (%)	52,71
Açúcares redutores (%)	46,69
Fibras (%)	4,53
Cinzas (%)	2,25
Proteína (%)	1,39
Gordura (%)	0,80
Amido (%)	6,04
Sacarose (%)	5,72

O teor de umidade da tâmara varia muito de país para país, dependendo das condições climáticas, da variedade estudada, entre outros fatores. O valor aqui encontrado aproximou-se bastante do descrito na literatura (68%) para o estágio Kalal (BUKAEV et al., 1987), provavelmente porque a tâmara, no momento da análise, não atingiu totalmente o estágio Rutab, ficando na faixa de umidade entre o estágio Kalal e o Rutab.

A persistência da sacarose na tâmara depois de terminada a fase Kalal, guarda uma estreita relação com o amadurecimento da tâmara após atravessar a fase Rutab, ou com a quase omissão dessa fase Rutab em grande parte das tâmaras.

Desconhece-se a razão pela qual a tâmara com uma determinada relação entre sacarose, açúcares redutores e água deve ser de uma textura mais firme e mais seca que outra tâmara com relação análoga mas com todo seu açúcar invertido.

Os valores encontrados para açúcares totais, redutores e sacarose se encontram bastante próximos da faixa citada na literatura para a fase Kalal e a fase Rutab.

O teor de cinza e fibras aqui encontrado foi também próximo do valor descrito por BUKAEV et al. (1987) na fase Rutab., ao contrário da gordura que se apresentou quase duas vezes maior do que o valor encontrado pelo mesmo autor.

A proteína apresentou um valor inferior ao encontrado na literatura. DOWSON e ATEN (1963) relatam que as proteínas presentes nas tâmaras estão em quantidades mínimas (1,75% do peso fresco da polpa).

Essas pequenas variações podem ter ocorrido devido a transição entre o estágio Kalal e o Rutab, já que a maioria dos valores aqui determinados, situam-se entre os encontrados nos dois estádios relacionados na literatura.

O amido é um carboidrato que se encontra nas plantas. ASHMAWI (1956) observou o amido em tâmaras da variedade Samaani desde a fase Kimri com uma percentagem de 12,79% até o final da fase Rutab com 3,10%. Os valores encontrados aqui para o amido em tâmaras da variedade Zahidi na fase Kalal, estão dentro da faixa relatada.

As tâmaras foram então consideradas, no estágio Rutab inicial, ou ainda no estágio intermediário entre o Kalal e o Rutab, que de acordo com a literatura estudada estão no ponto ideal para o início do processo de secagem e a determinação da umidade de equilíbrio.

5. CONCLUSÕES

Em termos gerais podemos dizer que a tâmara da variedade Zahidi aqui analisada, com um teor de umidade em torno de 67,79% b.s. é basicamente constituída de açúcares totais (52,71%) e redutores (46,69%), seguida de uma pequena percentagem de fibras (4,53%), o que confere a tâmara um valor altamente energético.

Na tâmara a fração amido encontrada foi consideravelmente baixa em termos de constituintes do fruto.

É conhecido que a diminuição no teor de sacarose com o amadurecimento e o aumento nos teores de açúcares redutores são sincronizados com a crescente atividade da enzima invertase, a qual é característica de todas as cultivares de tâmaras.

Concluiu-se portanto que, em um estágio intermediário entre o Kalal e o Rutab já houve um considerável aumento do teor de açúcares redutores e diminuição da acidez, perdendo o fruto sua adstringência. A relação entre o conteúdo de sacarose e açúcar invertido na polpa das tâmaras, tem uma influência muito marcante na qualidade final do produto.

CAPÍTULO 2
UMIDADE DE EQUILÍBRIO

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das isotermas de equilíbrio higroscópico de produtos biológicos é de essencial importância devido estarem diretamente ligadas aos problemas de armazenamento e secagem.

A umidade de equilíbrio higroscópico é relevante no estudo da secagem porque determina o teor de umidade até o qual o alimento pode ser seco sob condições estabelecidas de secagem.

Materiais higroscópicos, como é o caso dos biológicos, tende a manter uma determinada pressão de vapor de água a uma dada temperatura e umidade relativa. Essa pressão de vapor é conhecida como pressão de vapor de equilíbrio e a umidade relativa correspondente é conhecida como umidade relativa de equilíbrio.

O teor de umidade de equilíbrio pode ser definido como o teor de umidade (massa de água por unidade de massa total, em base úmida, ou massa de água por unidade de massa seca em base seca) que um produto atinge quando é submetido, por um tempo suficientemente longo, a condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar, ou ainda, o produto está higroscopicamente em equilíbrio com o ar ambiente em que se encontra, quando a pressão de vapor da água do mesmo for igual à pressão parcial de vapor da água do ar ambiente.

O teor de umidade de equilíbrio de um material higroscópico, para uma certa condição de temperatura, umidade relativa de equilíbrio e determinada pressão, depende do caminho utilizado para atingir o equilíbrio. Assim para uma mesma umidade relativa pode haver duas isotermas, de dessorção e de adsorção. Tanto o processo de adsorção quanto o de dessorção dependem do teor de umidade inicial em que cada processo começa, ou seja, se o material está com o teor de umidade menor ou maior que o da umidade de equilíbrio para as condições do ambiente, respectivamente (HENDERSON, 1952).

O objetivo deste capítulo foi obter as isotermas de adsorção e dessorção de água nas tâmaras, nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C, além de testar algumas das diferentes equações de ajuste de isotermas existentes na literatura. As equações aqui testadas foram BET, BET linearizado, GAB, Halsey e Oswin.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1 - Equilíbrio higroscópico

2.1.1. - Isotermas de sorção

A umidade de equilíbrio higroscópico é relevante no estudo do processo de secagem porque determina a umidade até o qual o material pode ser seco sob condições estabelecidas de secagem.

LEWIS (1921) introduziu o conceito de umidade de equilíbrio na secagem, relacionando a taxa de secagem com a umidade livre, definida como a diferença entre a sua umidade e a de equilíbrio.

Uma isoterma de sorção é obtida quando se plota a umidade de equilíbrio em função da umidade relativa ou atividade de água de um material, para temperaturas e pressões constantes (LABUZA, 1968; LONCIN et al., 1976 e GAL, 1972). Para o equilíbrio, a atividade de água é relacionada com a umidade relativa do ar circundante.

SPIESS e WOLF (1983) definem a umidade de equilíbrio como sendo a umidade que este alimento apresenta quando a pressão de vapor da água em sua superfície se iguala a pressão de vapor da água do ar que envolve o alimento pela seguinte equação:

$$a_w = \frac{P}{P_o} = \frac{\% UR}{100} \quad (2.1)$$

Onde:

P = Pressão de vapor de água no alimento, mm Hg;

P_o = Pressão de vapor de água pura nas mesmas condições de temperatura e pressão, mm Hg;

UR = Umidade relativa

A curva de uma isoterma pode se apresentar de duas formas: isotermas de adsorção, obtidas quando um alimento totalmente seco é colocado em atmosferas com diversos incrementos de umidade relativa, sendo medidos o aumento de peso desse alimento devido ao ganho de água; isoterma de dessorção, obtida quando o alimento inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições atmosféricas criadas para adsorção sendo medidos neste caso a diminuição de peso do alimento, provocada pela perda de água (KAPSALIS, 1987).

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

Segundo AYERST (1965), quando os produtos são expostos a um ambiente com temperatura e umidade relativa controladas, até que o teor de umidade do produto seja constante, a histerese observada fica entre 1,5 a 2 pontos percentuais.

A isoterma de sorção é dividida em três regiões, de acordo com o estado físico da água presente no alimento. A primeira região representa a adsorção da monocamada molecular de um filme de água e engloba valores de atividade de água entre 0 e 0,35. A segunda região representa a adsorção das camadas adicionais da água acima da monocamada para níveis de atividade de água variando de 0,35 a 0,60. A terceira região representa a água condensada nos poros do alimento seguida pela dissolução de materiais solúveis presentes (LABUZA, 1968).

Para determinação experimental de umidade de equilíbrio torna-se necessário um ambiente com umidade relativa controlada. O método de controle de umidade relativa mais usado é o que utiliza compostos químicos, tais como soluções aquosas de ácido sulfúrico e soluções saturadas de sais. Cada solução apresenta um

grau de ajuste de umidade relativa que pode ser obtido variando-se a concentração das soluções a diferentes temperaturas.

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

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

A₁ - Métodos com registro contínuo de mudança de peso: a balança é uma parte fixa do sistema e as mudanças de peso podem ser continuamente determinadas, sem a interrupção do processo de sorção.

A₂ - Sistemas dinâmicos: a circulação de ar transfere o vapor de água para a amostra (adsorção) e da amostra para o ar (dessorção). A maioria destes equipamentos tem sido automatizados permitindo programação e controle da umidade relativa e automação da operação de pesagem.

A₃ - Métodos com registro descontínuo de mudança de peso: a balança não é uma parte fixa do sistema e as amostras são condicionadas em diferentes umidades relativas e a sua umidade é determinada por métodos apropriados em operações separadas. Com estes métodos é possível o exame visual das amostras, sendo possível detectar mudanças físicas tais como endurecimento, encolhimento, etc.

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

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

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

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

KUMAR e BALASUBRAHMANYAM (1986) utilizaram soluções de sais a 27°C para obter a umidade de equilíbrio de dezesseis produtos alimentícios divididos

em quatro grupos segundo o tipo de constituinte de maior percentagem: amido, gordura, proteína e os altamente higroscópicos.

TEIXEIRA NETO e QUAST (1977) determinaram as isotermas de adsorção de quarenta alimentos, utilizando o método estático onde os ambientes foram controlados por soluções salinas saturadas e soluções aquosas de ácido sulfúrico.

LABUZA (1968) discorrendo sobre o efeito da composição dos alimentos na forma das isotermas, sugeriu que em muitos casos a quantidade de água sorvida para uma atividade de água, pode ser obtida pela soma do peso percentual de cada componente, vezes a quantidade que este teria sorvida isoladamente. Partindo deste conceito, IGLESIAS et al. (1980), estudaram isotermas de sorção de modelos de alimentos elaborados com diferentes constituintes, conhecendo o comportamento da sorção de seus componentes. Concluíram que em alguns casos as isotermas preditas para o produto apresentaram resultados satisfatórios enquanto que para outros, os valores preditos da umidade de equilíbrio fora significativamente maiores que os valores obtidos experimentalmente, pois as interações entre os principais constituintes reduziram a capacidade de ligação da água.

A estimativa do calor de sorção requer isotermas de adsorção ou dessorção de umidade para várias temperaturas. Em geral, a umidade de equilíbrio de um alimento para uma dada atividade de água diminui quando se aumenta a temperatura. A dependência da temperatura pode variar com a umidade e atividade de água presentes nos alimentos, para alimentos com atividade de água acima de 0,65 (SARAVACOS e STINCHFIELD, 1965; SARAVACOS et al., 1986).

2.1.2 - Equações de equilíbrio higroscópico

Os dados de uma isoterma de sorção são usados para calcular a força motriz nas principais operações de transferência de massa e também para avaliar a umidade residual ótimo do produto final. O calor isostérico de sorção pode ser usado para estimar a energia requerida durante o processo de secagem. O nível de umidade do material para o qual o calor isostérico de sorção se aproxima do calor latente de vaporização da água, é frequentemente tomado como uma indicação do total da "água

ligada" presente no alimento (DUCKWORTH, 1972). Os valores desse calor isostérico podem ser aumentados, quando a umidade diminui abaixo do limite crítico (água ligada) o qual deve ser tomado em consideração em balanços de transferência de calor (RIZVI, 1986).

O calor de sorção da água em diversos alimentos tem sido determinado utilizando a equação de Clausius-Clapeyron (SOEKARTO e STEINBERG, 1981; ROMAN et al., 1982 e SARAVACOS et al., 1986) a equação de sorção de Brunauer, Emmett e Teller (BET) (CHIRIFE et al., 1986), a equação de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) (BALABAN et al., 1988), a equação de Othmer (AGUERRE et al., 1988) e outras equações de sorção (BALABAN et al., 1988).

Embora um grande número de equações teóricas, semi-empíricas e empíricas, tenham sido propostos para o cálculo da umidade de equilíbrio, segundo BROOKER et al. (1974), nenhuma equação teórica é ainda capaz de prever exatamente a umidade de equilíbrio de produtos agrícolas em uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa.

Equação de Langmuir

LANGMUIR (1918), assumiu que no equilíbrio a taxa à qual as moléculas se condensam na superfície é igual a taxa em que elas evaporam da superfície. Além disso, assumiu que a probabilidade de evaporação das moléculas é a mesma se as posições vizinhas na superfície estivessem ocupadas ou não, e que todas moléculas provenientes da fase gasosa colidem com a molécula já adsorvida na superfície e é elasticamente refletida. A equação proposta é a seguinte:

$$\frac{X}{X_m} = \frac{C \cdot a_w}{1 + C \cdot a_w} \quad (2.2)$$

Onde,

X = umidade em base seca, g água/g sólidos secos;

X_m = umidade na monocamada molecular; g água/g sólidos secos;

C = parâmetro variando com o ar, temperatura e natureza do material;

a_w = atividade de água, adimensional.

Equação de BET

Tecendo considerações da natureza química da umidade e ampliando o conceito de Langmuir, BET propõe para camadas polimoleculares:

$$\frac{X}{X_m} = \left(\frac{1 - (n+1)a_w^n + n a_w^{n+1}}{1 - (1-C)a_w - C a_w^{n+1}} \right) \quad (2.3)$$

O modelo de BET (BRUNAUER, EMMETT e TELLER, 1938) se baseia na suposição de que a água se adsorve na forma de camadas; a primeira se fixa por adsorção sobre pontos uniformemente localizados e as camadas seguintes se fixam entre si mediante pontes de hidrogênio, sendo que o fator que limita o número de camadas adsorvidas é o diâmetro dos capilares. A equação geral da isoterma de BET, quando o número de camadas tende a um número infinito, pode ser escrita na seguinte forma:

$$\frac{a_w}{(1-a_w)X} = \frac{1}{X_m C_{BET}} + \frac{a_w (C_{BET} - 1)}{X_m C_{BET}} \quad (2.4)$$

A constante de BET é dada por:

$$C_{BET} = const. \exp\left(\frac{Q_s}{RT}\right) \quad (2.5)$$

Este modelo apresenta dois parâmetros de ajuste (C_{BET} e X_m), que são calculados plotando-se $\{a_w / [(1-a_w)X]\}$ versus a_w .

Onde,

a_w = atividade de água, adimensional;

X = umidade em base seca, g água/g sólidos secos;

X_m = umidade da monocamada molecular;

n = número de camadas moleculares

Esta equação dá uma isoterma sigmoideal, similar a observada experimentalmente em materiais biológicos. Segundo LABUZA (1968), a isoterma de BET apresenta ajuste satisfatório somente para dados de sorção com a_w entre 0,1 - 0,5.

Equação de GAB

GUGGHENHEIM (1966), ANDERSON (1946) e De BOER (1953) estenderam as teorias de adsorção física de BET, resultando numa equação triparamétrica, que permite um melhor ajuste dos dados de sorção dos alimentos até a atividade de água de 0,9. A equação de GAB é escrita como:

$$X = \frac{X_m C_{GAB} K_{GAB} a_w}{(1 - K_{GAB} a_w)(1 - K_{GAB} a_w + C_{GAB} K_{GAB} a_w)} \quad (2.6)$$

Onde C_{GAB} e K_{GAB} são constantes de adsorção relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes, num dado sítio de sorção. Quando $K_{GAB} = 1$, a equação de GAB fica reduzida à equação de BET.

Equação de Henderson

Esta é uma das mais conhecidas e usadas equações para previsão da umidade de equilíbrio em grãos. HENDERSON (1952), através da equação de adsorção de Gibbs, estabeleceu a seguinte equação para as isotermas de materiais biológicos:

$$1-UR = \exp [-a \cdot T_{abs} \cdot (Xe^b)] \quad (2.7)$$

Esta equação pode ser linearizada na forma de:

$$\ln (-\ln(1-UR)) = \ln(a) + \ln(T_{abs}) + b \cdot \ln(Xe) \quad (2.8)$$

Onde:

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

Xe = umidade de equilíbrio, g água/g sólidos secos.

Equação de Chung e Pfof

Em 1967, CHUNG e PFOF desenvolveram a seguinte equação:

$$Xe = e^{-f \cdot \ln(-R \cdot (T+c) \cdot \ln(UR))} \quad (2.9)$$

Onde,

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

T = temperatura absoluta, °R;

e, f, c = constantes que dependem do produto

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

Equação de Halsey

HALSEY (1948), considerando a adsorção física sobre superfícies uniformes, definiu a seguinte equação:

$$a_w = \exp (a / X^b) \quad (2.10)$$

Onde,

X = umidade, g água/ g sólidos secos;

a_w = atividade de água, adimensional;

a e b = constantes

Segundo SARAVACOS et al. (1986), estudando as isotermas de adsorção de uva-passa, esta equação apresentou resultados satisfatórios para um maior raio de temperaturas e atividade de água que o modelo de GAB, por ser uma equação que leva em consideração a adsorção e a dissolução dos açúcares presentes no produto.

Equação de D'Arcy-Watt

É uma equação com cinco parâmetros (SARAVACOS et al., 1986), apresentada da seguinte forma:

$$X = \frac{k_1 k_2 a_w}{1 + k_1 a_w} + k_5 a_w + \frac{k_3 k_4 a_w}{1 - k_3 a_w} \quad (2.11)$$

Onde:

X = umidade em base seca; g água/g sólidos secos;

k_1, k_2, k_3 e k_4 = constantes;

a_w = atividade de água, adimensional

SARAVACOS et al. (1986) conseguiram o melhor ajuste para as isotermas com esta equação de cinco parâmetros, a qual segundo eles pode ser aplicada para atividades de água de 0,10 a 0,90.

Equação de Aguerre

A equação de AGUERRE (1989) é uma equação triparamétrica, obtida através do conceito de multicamadas de BET, dada como:

$$\psi \ln a_w = k_1 k_2 \quad (2.12)$$

$$\psi = \left(\frac{1}{380,5} - \frac{1}{T} \right) - 1 \quad (2.13)$$

Onde:

ψ = potencial químico; kg/m³;

X = umidade em base seca, g água/ g sólidos secos;

k_1 e k_2 = constantes;

a_w = atividade de água, adimensional;

T = temperatura, K.

Equação de Peleg

PELEG (1992) apresentou uma equação semi-empírica de quatro parâmetros, utilizada para o ajuste de isotermas de sorção:

$$X = k_1 a_w^{n_1} + k_2 a_w^{n_2} \quad (2.14)$$

Onde,

X = umidade em base seca, g água/ g sólidos secos;

a_w = atividade de água, adimensional;

k_1 , k_2 , n_1 , n_2 = constantes

PARK et al. (1996), utilizaram essa equação para o ajuste de isotermas de gengibre, a qual apresentou um resultado bastante satisfatório, com desvio médio relativo em torno de 10%.

Equação de Oswin

A equação de OSWIN (1946) é uma equação de dois parâmetros apresentada como :

$$X = a \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b \quad (2.15)$$

Onde:

X = umidade em base seca, g água/g sólidos secos;

a_w = atividade de água, adimensional

a , b = constantes

Quando testada por PARK et al. (1996) esta equação se desviou um pouco mais dos dados experimentais das isotermas analisadas, com um desvio um pouco superior ao desvio encontrado pela equação de Aguerre.

PARK e NOGUEIRA (1992) mostraram a conceituação do modelo de BET, chegando até a sua extensão, comumente referida como modelo de GAB. Concluíram que por apresentar três parâmetros a serem estimados (X_m , C_{BET} , n) e sendo uma equação polinomial de grau maior que 2, dependendo do valor numérico de n estimado, o modelo de BET na sua forma original apresenta maior possibilidade de ajuste dos dados experimentais.

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

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

SARAVACOS et al. (1986), determinaram isotermas de adsorção de água para uva-passa, a 20, 25, 30 e 35°C. Através dos dados experimentais foram efetuados os ajustes das curvas usando os modelos com três parâmetros de GAB e de Halsey, e o modelo com cinco parâmetros de D'Arcy-Watt. Os autores afirmam que o modelo de GAB descreve bem as isotermas para atividade de água de 0,30 a 0,65, o que corresponde as condições normais de armazenagem comercial de frutas secas. Já o modelo de Halsey apresentou resultados mais satisfatórios para uma faixa maior de temperatura e atividade de água, que o modelo de GAB. Os autores relatam ainda que o modelo de D'Arcy-Watt pode ser aplicado para uma faixa de atividade de água de 0,10 a 0,90, mas a necessidade de se estimar cinco parâmetros torna-o menos atrativo para uma larga aplicação a materiais alimentícios.

MARAOULIS et al. (1988), usaram o modelo de GAB para ajustar as isotermas de adsorção de algumas frutas secas. Concluíram que a aplicabilidade do modelo tem dependência do método de regressão empregado e recomendam a regressão não linear direta para ajuste das curvas e estimativa das constantes de GAB.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

Esta etapa do presente trabalho foi realizada no Laboratório de Matérias-Primas e no Laboratório de Secagem da Faculdade de Engenharia Agrícola, e no Laboratório de Medidas Físicas da Faculdade de Engenharia de Alimentos.

As tâmaras foram cedidas pelo CPATSA (EMBRAPA) localizado em Petrolina - PE. Foram recebidas congeladas e armazenadas assim, até o início da fase experimental.

Elas foram congeladas em fase inicial do estágio Kalal com umidade em torno de 80 a 70% e após o descongelamento a temperatura ambiente, durante aproximadamente 12 horas, atingiram a fase intermediária entre o estágio Kalal e Rutab em cerca de 68% de umidade em base úmida. Este descongelamento foi feito em lotes a medida em que se desenvolvia a fase experimental.

3.1 - Determinação dos teores de umidade de equilíbrio

3.1.1 - Equipamentos, vidraria e reagentes para o levantamento da umidade de equilíbrio.

- balança analítica Mettler modelo PC 400, com quatro casas decimais;
- estufa à vácuo;
- bomba de vácuo para a estufa;
- estufa com controlador de temperatura;
- dessecadores;
- folha de alumínio;
- potes herméticos de vidro temperado;
- espátula;
- beckers;
- pentóxido de fósforo;

- sílica gel;
- sais: Cloreto de Lítio
 - Fluoreto de Potássio
 - Cloreto de Magnésio
 - Carbonato de Potássio
 - Brometo de Sódio
 - Iodeto de Potássio
 - Cloreto de Sódio
 - Cloreto de Potássio

3.1.2 - Métodos

3.1.2.1 - Equilíbrio higroscópico das isotermas

As umidades de equilíbrio das tâmaras foram determinados por meio do método estático, utilizando-se soluções de sais saturadas em água destilada, para uma faixa de umidade relativa de 10,51 a 80,25% (GREENSPAN, 1977) e estão apresentadas na Tabela 2.1. Os testes foram conduzidos às temperaturas de 60, 70 e 80°C±1°C. Para isto foram utilizadas três estufas bacteriológicas, com o objetivo de se manter as amostras nas temperaturas e umidades desejadas. Essas temperaturas eram verificadas regularmente com o auxílio de termômetros colocados no interior de cada estufa.

As amostras em triplicata foram colocadas em cadinhos de alumínio e em seguida armazenadas em potes herméticos com as respectivas soluções de sais para cada valor de umidade relativa desejada. Os potes herméticos foram então colocados nas estufas com temperaturas controladas de 60, 70 e 80°C±1°C.

As amostras com umidade previamente determinada, foram pesadas em intervalos regulares de tempo, diariamente na primeira semana, e após este período os intervalos foram de 2 em 2 dias e 4 em 4 dias até se alcançar o ponto de equilíbrio.

Tabela 2.1 - Diferentes valores de umidade relativas relacionadas as soluções salinas saturadas e as temperaturas de 60, 70 e 80°C.

SAIS	Umidade Relativa (%)		
	T = 60°C	T = 70°C	T = 80°C
LiCl	10,95	10,75	10,51
KF	20,77	21,44	22,85
MgCl ₂	29,26	27,77	26,05
CaCO ₃	44,00	44,00	44,00
NaBr	49,26	49,70	51,43
KI	63,11	61,93	60,97
NaNO ₃	67,35	66,04	65,22
NaCl	74,50	76,06	76,29
KCl	80,25	79,49	78,90

Fonte: GREESPAN (1977)

Após alcançado o equilíbrio, as amostras foram levadas a estufa à vácuo à uma pressão inferior a 60 mmHg e a temperatura de 65°C ± 1°C durante 48 horas (AOAC, 1984) a fim de se obter a sua massa seca.

Depois de obtidas as curvas de dessorção, outro lote de tâmaras era previamente descongelado até o ponto intermediário, entre o estágio Kalal e Rutab, e seco em estufa à vácuo (pressão inferior a 60mmHg e tempertura de 65°C) por 48 horas. Em seguida as tâmaras foram colocadas em dessecadores com pentóxido de fósforo, para retirada da umidade restante, segundo método relacionado no COST 90 (SPIESS e WOLF, 1983). Os dessecadores foram mantidos fechados e em intervalos regulares de 3 em 3 dias as amostras eram pesadas a fim de se verificar a sua variação em peso. Após atingido o peso constante, as amostras foram novamente colocadas em potes de vidro hermeticamente fechados com as respectivas soluções salinas e levados às estufas nas mesmas temperaturas a fim de se obter a curva de adsorção de água. O mesmo procedimento usado para dessorção foi também utilizado para adsorção das tâmaras.

A umidade de equilíbrio foi calculada pela diferença entre a massa que a amostra apresentou no equilíbrio e a sua massa seca.

Para o ajuste das isotermas de sorção das tâmaras foram testados os modelos de BET, BET linearizado, GAB, Halsey e Oswin . Com a finalidade de se encontrar os coeficientes das equações citadas, os dados experimentais foram submetidos a uma análise de regressão não linear, utilizando o programa computacional STATISTICA 5.0.

3.1.2.2 - Cálculo da cinética de sorção de água nas tâmaras

A taxa de sorção para cada intervalo de tempo foi calculada do gráfico da quantidade de água dessorvida (A) para o tempo (t) (Figuras 2.1 e 2.2 e 2.3). Foram tomadas tangentes correspondentes a estas curvas e os respectivos valores obtidos foram graficados; a água dessorvida, adsorvida e o conteúdo de umidade em função do tempo para diferentes temperaturas e umidade relativas. Foi considerado desejável caracterizar a taxa de sorção da água como único valor que possa representar a curva inteira de sorção de umidade com o tempo.

De acordo com UDANI et al. (1968), a taxa instantânea para qualquer intervalo de tempo é proporcional a força-motriz, que é igual a diferença entre a umidade de equilíbrio de uma amostra e a umidade da amostra para aquele instante.

Desta forma temos:

$$\frac{dX}{dt} = \left(\frac{1}{R} \right) (X_e - X) \quad (2.16)$$

Onde:

X é a umidade da amostra para qualquer tempo t; kg água/kg sólidos secos

t é o tempo desde o início do processo de dessorção; horas

X_e é a umidade de equilíbrio, para uma dada temperatura e umidade relativa; kg água/ kg sólidos secos

R é uma constante chamada de taxa característica de sorção

Integrando a equação (2.6), tem-se:

$$\frac{X - X_0}{X_e - X} = 1 - e^{(-t/R)} \quad (2.17)$$

Dados R , X_0 e X_e , a curva inteira pode ser reproduzida pela Equação (2.17). Deste modo os valores de R para cada curva foram obtidos do gráficos de $\ln(X_e - X/X_e - X_0)$ em função do tempo (dias).

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Cinética de sorção de água

Os resultados experimentais da umidade de equilíbrio para dessorção da tâmara são mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Valores experimentais de umidade de equilíbrio para dessorção de água em tâmaras.

TEMPERATURA (°C)					
60		70		80	
Xe	a _w	Xe	a _w	Xe	a _w
1,959	0,2077	1,272	0,2077	2,575	0,2077
4,930	0,4400	4,410	0,4400	-	-
6,652	0,4926	5,161	0,4926	6,082	0,4926
9,104	0,6311	-	-	15,568	0,6311
12,585	0,6735	15,180	0,6735	19,374	0,6735
19,541	0,7450	20,787	0,7450	30,233	0,7450
35,662	0,8025	25,467	0,8025	43,632	0,8025

Fez-se um estudo da cinética de dessorção de água na tâmara a fim de se comparar as taxas de dessorção e desta forma, calcular uma taxa característica de dessorção R que relaciona características físicas e químicas do material (UDANI et al., 1968), obtida da curva de dessorção de água.

As Figuras 2.1, 2.2 e 2.3 mostram a influência da temperatura e da umidade relativa sobre o grau de água dessorvida pelas tâmaras. Foi possível observar que nas umidades relativas acima de 67,35%, as amostras levaram mais tempo até alcançarem a umidade de equilíbrio. Um resultado similar foi encontrado por BORGES e CAL-VIDAL (1994), trabalhando com flocos de banana desidratada e De GOIS e CAL-VIDAL (1986), trabalhando com papaia liofilizado. Este tipo de representação é a base

para se estimar a cinética de sorção relacionada aqui. A cinética de sorção de água é governada por diversos fatores tais como, a quantidade de água sorvida no material, as condições ambientais (temperatura e umidade relativa) e a microestrutura do produto. Através dos gráficos relacionando a quantidade de água dessorvida e o tempo (Figuras 2.1, 2.2 e 2.3) foram tomadas tangentes correspondentes a estas curvas e os respectivos valores obtidos, foram graficados a água dessorvida e a umidade em função do tempo para diferentes temperaturas e umidade relativas.

As curvas da taxa de sorção são apresentadas nas Figuras 2.4, 2.5 e 2.6, representando o efeito do total de água dessorvida sobre a taxa de água dessorvida pelas tâmaras. Estas curvas mostram o efeito da umidade relativa e da temperatura sobre as taxas de sorção. Se a temperatura é mantida constante, pode-se verificar que os valores da taxa de dessorção de água diminuem com o aumento da umidade relativa ambiente.

Se a temperatura é mantida constante, pode-se verificar que os valores da taxa de dessorção diminuem com o aumento da umidade relativa ambiente. A temperatura também apresenta um efeito contrário sobre esta taxa, de acordo com o que já foi observado em trabalhos anteriores (ROMAN, et al.; 1982). Valores mais altos da taxa de dessorção foram encontrados para a temperatura de 60°C, exceto para os níveis de umidade relativa de 49,66 e 63,11%, onde um comportamento oposto foi observado. Este mesmo fenômeno foi observado por De GOIS e CAL-VIDAL (1986), estudando a cinética de sorção de vapor de água de papaia liofilizada, onde concluíram que pode existir um valor de umidade relativa crítico e desta maneira, a taxa de sorção não deve ser vista como influenciada somente pelas temperaturas ambientais utilizadas no referido estudo.

Para altas de umidades, quando a membrana celular está ainda integra, o fenômeno de sorção é de natureza osmótica. Desta forma pode-se ver a dessorção como o processo de uma estrutura regular bem ordenada onde as forças osmóticas prevalecem até que se forme uma estrutura mais porosa, onde celulose, pectina e material da membrana celular degenerada, juntos com açúcares sólidos, formam uma estrutura sólida heterogênea (ROTSTEIN e CORNISH, 1978).

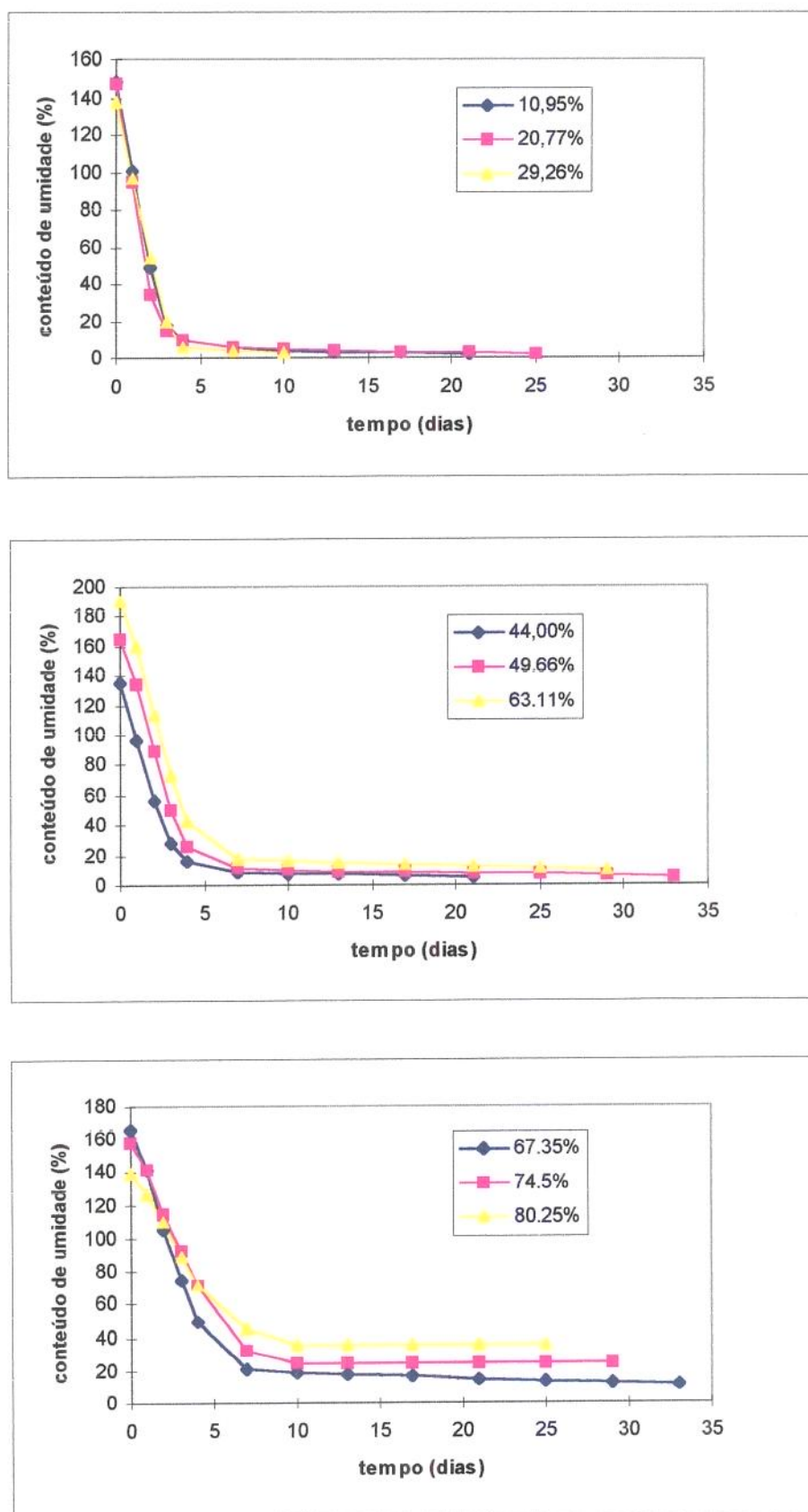


Figura 2.1 - Curvas de sorção de tâmaras expostas a diferentes níveis de umidade relativa em temperatura ambiente controlada de 60°C.

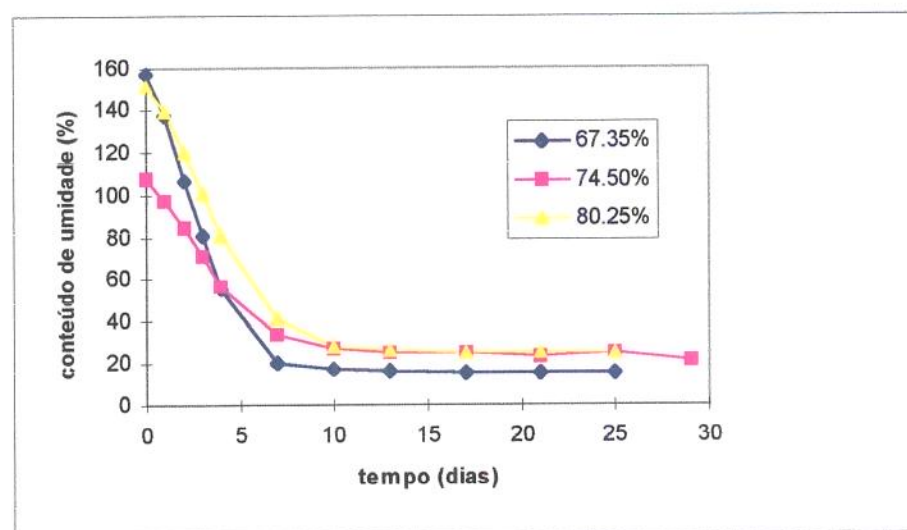
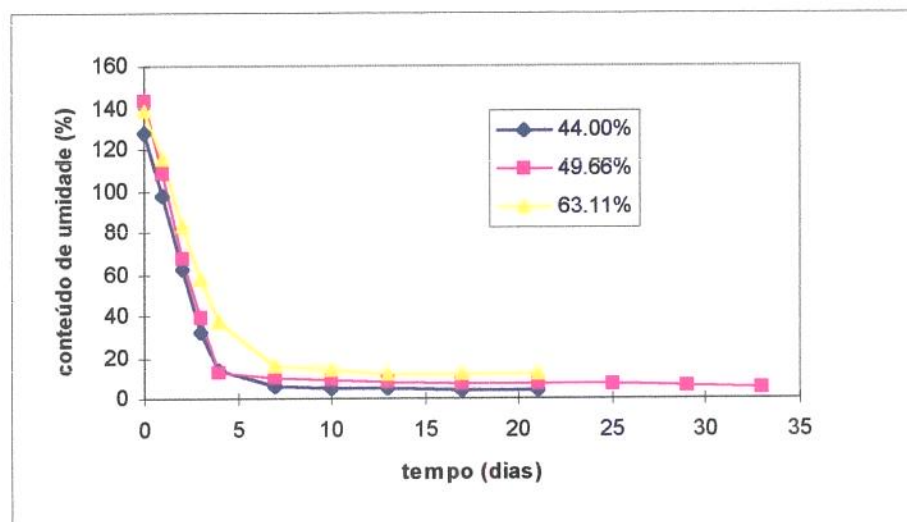
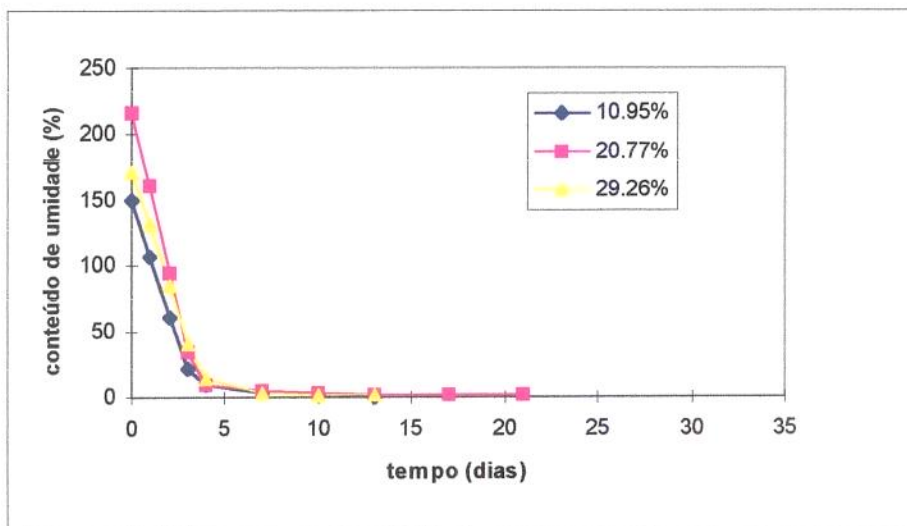


Figura 2.2 - Curvas de sorção de tâmaras expostas a diferentes níveis de umidade relativa em temperatura ambiente controlada de 70°C.

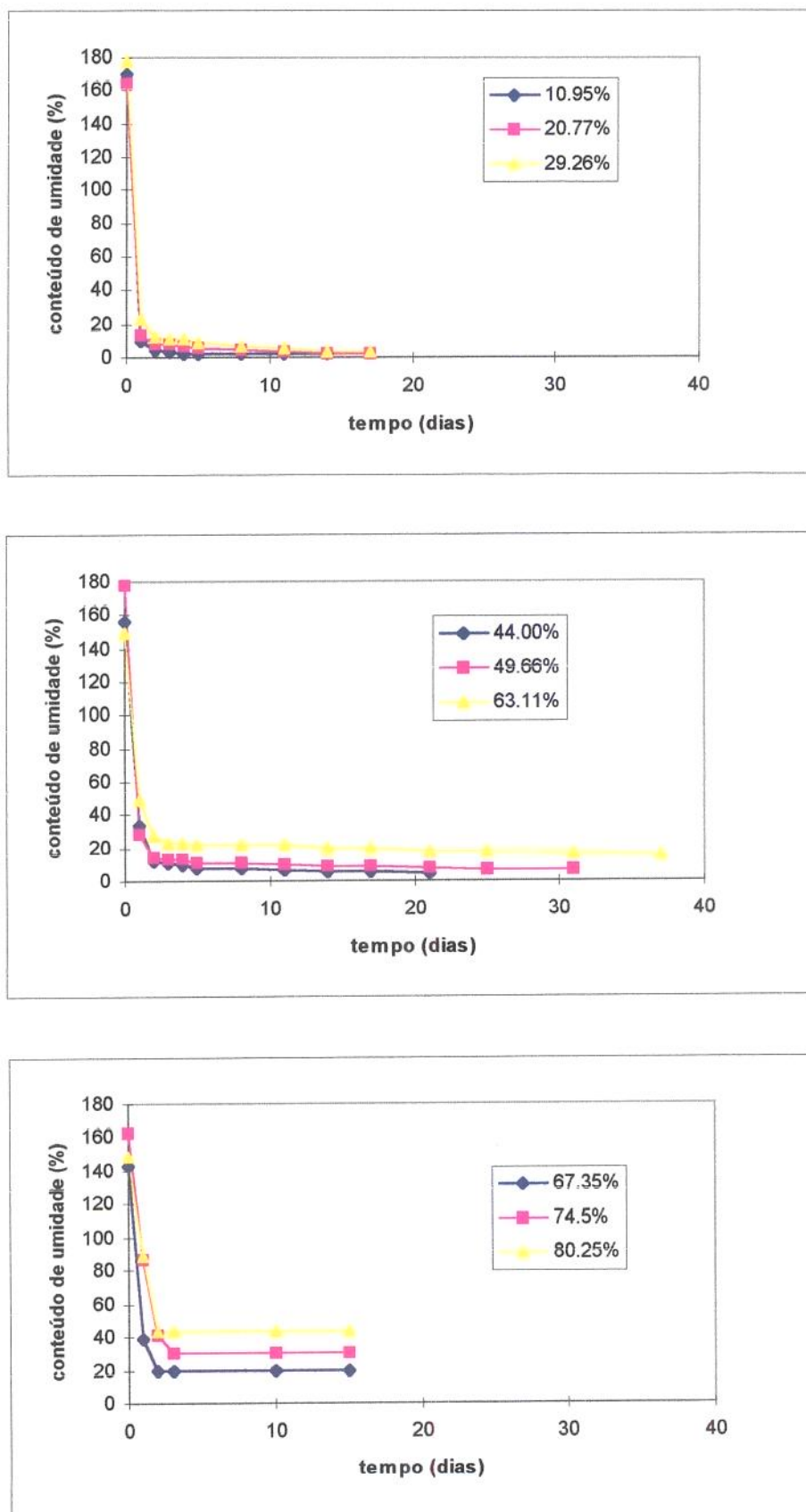


Figura 2.3 - Curvas de sorção de tâmaras expostas a diferentes níveis de umidade relativa em temperatura ambiente controlada de 80°C.

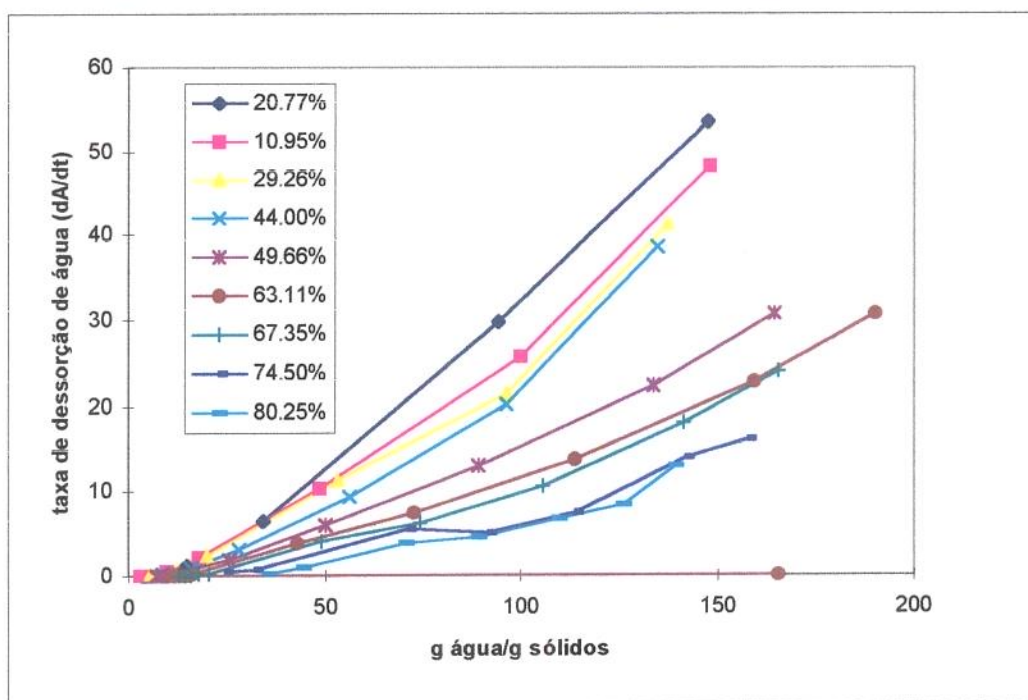


Figura 2.4.- Cinética de sorção de água de tâmaras expostas a temperatura de 60°C e vários níveis de umidade relativa.

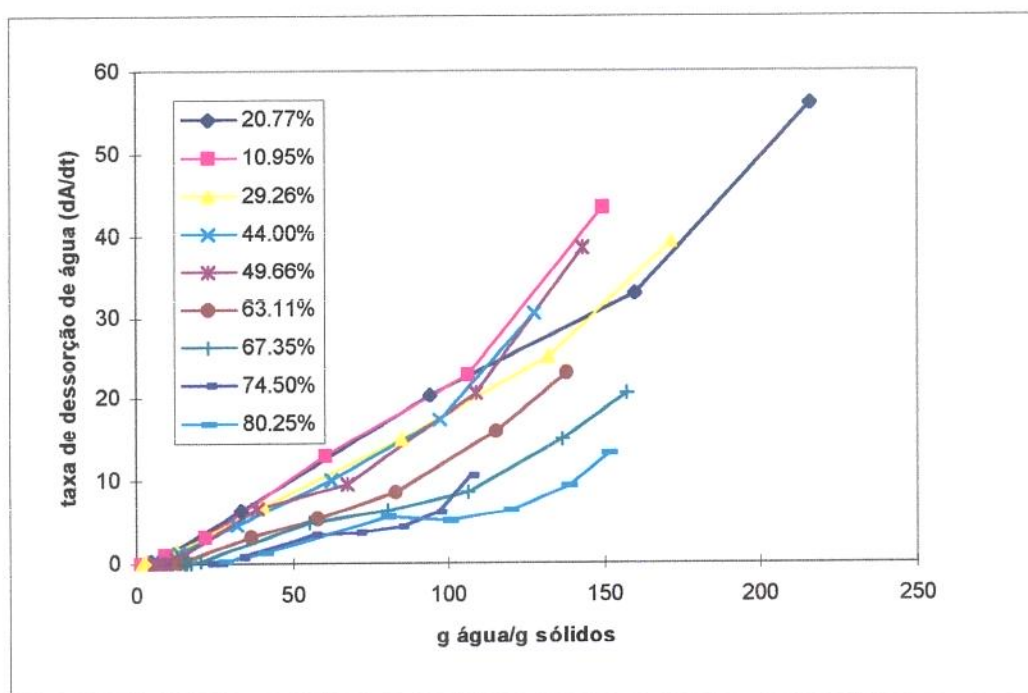


Figura 2.5.- Cinética de sorção de água de tâmaras expostas a temperatura de 70°C e vários níveis de umidade relativa.

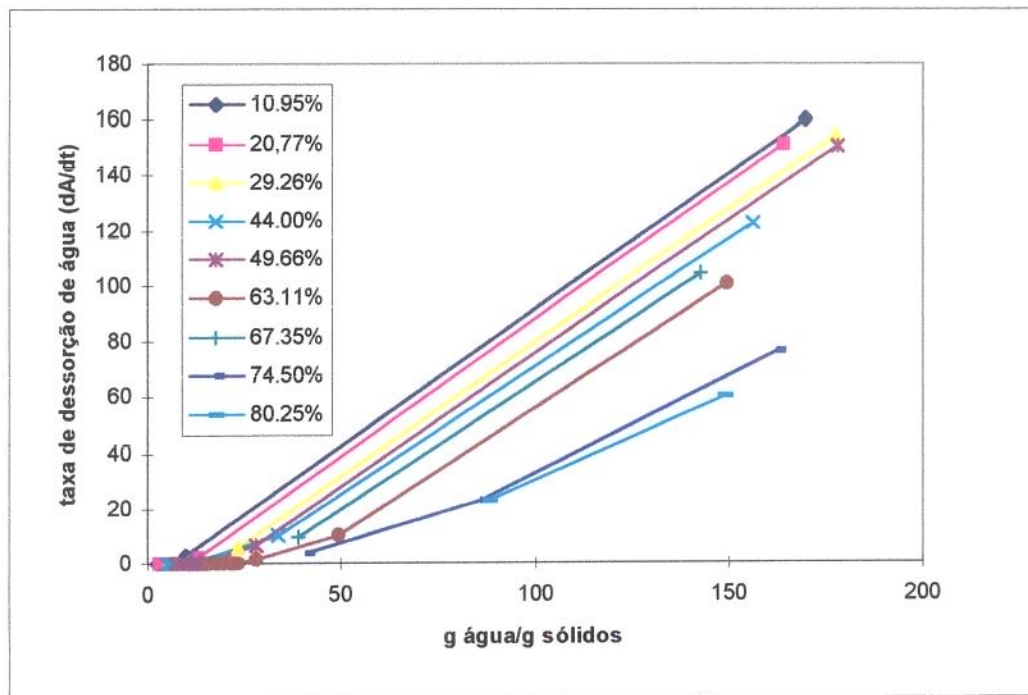


Figura 2.6.- Cinética de sorção de água de tâmaras expostas a temperatura de 80°C e vários níveis de umidade relativa.

Conforme visto na Tabela 2.3 os valores da taxa característica de sorção da primeira fase, R_1 , diminuem com o aumento da temperatura, provavelmente porque mudanças na temperatura também modificam a resistência externa entre o ar e o produto, contribuindo desta forma para o efeito observado, de forma que a diminuição nos valores da taxa são totalmente atribuídos a transferência de calor e massa na superfície do produto. Considerando os valores da segunda fase, R_2 , observa-se que estas taxas são na sua maioria mais altas que as da primeira fase, mas são praticamente independentes da temperatura e controladas totalmente pela resistência interna.

Tabela 2.3 - Valores calculados de R_1 e R_2

UR	T = 60°C		T = 70°C		T = 80°C	
	R_1	R_2	R_1	R_2	R_1	R_2
10.95%	1.51	3.84	1.62	1.08	0.17	1.68
20.77%	1.38	4.81	1.59	1.97	0.93	4.56
29.26%	1.64	0.98	1.82	1.21	1.11	5.26
44.00%	1.76	4.19	2.14	1.98	1.15	6.64
49.66%	2.21	13.63	1.75	10.12	1.15	11.78
63.11%	2.28	5.13	2.59	2.19	1.36	12.69
67.35%	2.68	10.93	2.45	2.70	1.35	-
74.50%	4.35	2.86	3.68	10.62	1.53	-
80.25%	4.64	2.92	4.89	3.24	1.54	-

4.2 - Equilíbrio higroscópico das isotermas de adsorção e dessorção

As umidades de equilíbrio das tâmaras da variedade Zahidi, foram atingidos entre 24 e 4 dias, para as temperaturas de 60, 70 e 80°C, como mostrado nas Tabelas 2.4 e 2.5. Nessas tabelas observa-se que o equilíbrio higroscópico é atingido em menor tempo com o aumento da temperatura do ar, o que também foi constatado por WHITE (1972), KOSOSKY (1977) , SILVA e PINHEIRO FILHO (1979), em estudos com milho, grãos e cacau, respectivamente.

As umidades de equilíbrio das tâmaras obtidas por dessorção e adsorção para as temperaturas e umidades relativa indicadas na Tabela 2.1 são mostradas respectivamente nas Tabelas 2.6 e 2.7.

Tabela 2.4 - Número médio de dias decorridos para alcançar o equilíbrio higroscópico da tâmara na dessorção de água

Número de dias			
Temperatura	60°C	70°C	80°C
	24	20	14

Tabela 2.5 - Número médio de dias decorridos para alcançar o equilíbrio higroscópico da tâmara na adsorção de água

Número de dias			
Temperatura	60°C	70°C	80°C
	11	05	04

Tabela 2.6 - Valores experimentais de umidade de equilíbrio para dessorção de água nas tâmaras (*Phoenix dactilyfera* L.)

Temperatura (°C)					
60		70		80	
Xe	aw	Xe	aw	Xe	aw
0,0196	0,2077	0,0127	0,2144	0,0257	0,2285
0,0493	0,4400	0,0410	0,4400	0,0608	0,5143
0,0652	0,4926	0,0516	0,4970	0,1557	0,6097
0,0910	0,6311	0,1518	0,6604	0,1937	0,6522
0,1258	0,6735	0,2079	0,7606	0,3023	0,7629
0,1954	0,7450	0,2579	0,7949	0,4363	0,7890
0,3566	0,8025	-	-	-	-

Tabela 2.7 - Valores experimentais de umidade de equilíbrio para adsorção de água nas tâmaras (*Phoenix dactilyfera* L.)

Temperatura (°C)					
60		70		80	
Xe	aw	Xe	aw	Xe	aw
0,091	0,1095	0,130	0,1075	0,069	0,1051
0,166	0,2930	0,228	0,2780	0,170	0,2610
0,217	0,4400	0,243	0,4400	0,262	0,4400
0,231	0,6310	0,265	0,4970	0,284	0,6520
0,251	0,6740	0,279	0,7950	-	-

4.3 - Ajuste das isotermas

Os valores experimentais da umidade de equilíbrio das tâmaras para as temperaturas de 60, 70 e 80°C e diversos incrementos de umidade relativa foram correlacionados e ajustados pelas equações de BET, BET linearizado, GAB, Halsey, Oswin, de forma a se encontrar através dos ajustes os coeficientes das referidas equações que são de interesse neste estudo. A fim de se verificar qual equação se ajustou melhor aos dados experimentais, foi calculado o erro relativo entre os valores experimentais e os valores preditos.

Os dados experimentais das isotermas de dessorção da tâmara ajustados pelas referidas equações são apresentados nas Figuras 1 a 12 localizadas no Apêndice 2. As curvas que apresentaram melhor ajuste e consequentemente melhores resultados para X_m , são destacadas pela Figura 2.7 (BET linearizado) para a temperatura de 60°C; a isoterma de 70°C é mostrada na Figura 2.8 (GAB) e a de 80°C na Figura. 2.9 (BET linearizado).

De forma geral todas as isotermas de dessorção apresentaram ajustes muito bons em relação às equações testadas, observando os valores dos coeficientes de determinação para cada modelo que se apresentaram superiores a 96%. Porém para uma avaliação mais adequada desses ajustes, calculamos o erro médio relativo como:

$$E = \frac{100}{n_e} \sum_{i=1}^{n_e} \frac{|V_E - V_P|}{V_E} \quad (2.17)$$

Onde:

V_E = valor experimental;

V_P = valor predito;

n_e = número de dados experimentais.

Para a temperatura de 60°C o melhor ajuste foi obtido pela equação de BET linearizada, a qual apresentou um maior coeficiente de determinação (r^2) e um menor erro relativo médio calculado entre os pontos experimentais e os pontos estimados pela equação. Na temperatura de 70°C o melhor ajuste foi conseguido pelo

modelo de GAB com o menor erro relativo e um maior valor do coeficiente de determinação. Analisando os valores dos coeficientes de determinação dos modelos usados na isoterma de 80°C, verificamos ser BET linearizado o melhor modelo com erro relativo calculado inferior aos demais modelos, apesar de diferir muito pouco do erro relativo calculado pelo ajuste da equação de Halsey (0,48 pontos percentuais). Os valores dos parâmetros estimados para as equações aqui testadas para a dessorção de água nas tâmaras são mostradas nas Tabelas 2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12.

As melhores equações testadas nas isotermas de dessorção BET linearizado (60° C) , GAB (70 °C) e BET linearizado (80 °C) forneceram valores de Xm variando de 0,013 a 0,032.

Tabela 2.8 - Parâmetros estimados do modelo de BET linearizado para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da dessorção de água na tâmara.

Parâmetros de BET linearizado			Coeficiente de determinação (%)
T (°C)	Xm	C	r ²
60	0,0135	1,8770	98,24
70	0,0554	1,1148	98,33
80	0,0324	1,6506	98,50

Tabela 2.9 - Parâmetros estimados do modelo de BET para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da dessorção de água na tâmara.

Parâmetros de BET				Coeficiente de determinação (%)
T (°C)	Xm	C	n	r ²
60	0,2062	0,1229	140,98	98,24
70	0,3201	0,1147	6,8067	99,43
80	0,3357	0,2713	8,3833	96,69

Tabela 2.10 - Parâmetros estimados do modelo de GAB para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da dessorção de água na tâmara.

Parâmetros de GAB				Coeficiente de determinação (%)
T (°C)	Xm	C	K	r ²
60	0,0302	4,2887	1,1425	99,81
70	0,0137	4,7608	0,7682	98,94
80	0,0593	1,4655	1,1046	97,26

Tabela 2.11 - Parâmetros estimados do modelo de Halsey para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da dessorção de água na tâmara.

Parâmetros de Halsey			Coeficiente de determinação (%)
T (°C)	A	B	r ²
60	0,1179	0,5896	98,77
70	0,0798	0,7967	97,46
80	0,1322	0,6641	97,06

Tabela 2.12 - Parâmetros estimados do modelo de Oswin para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da dessorção de água na tâmara.

Parâmetros de Oswin			Coeficiente de determinação (%)
T (°C)	A	B	r ²
60	0,0462	1,4326	98,07
70	0,0663	1,0168	98,31
80	0,0796	1,2463	97,05

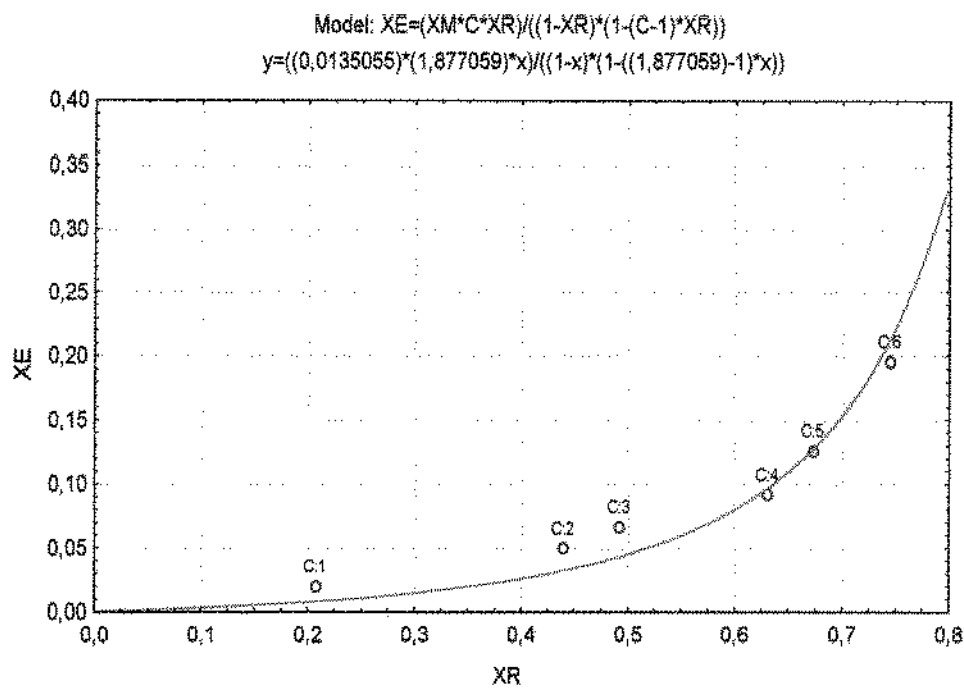


Figura 2.7 - Isoterma de dessorção na temperatura de 60°C ajustada pelo modelo de BET linearizado

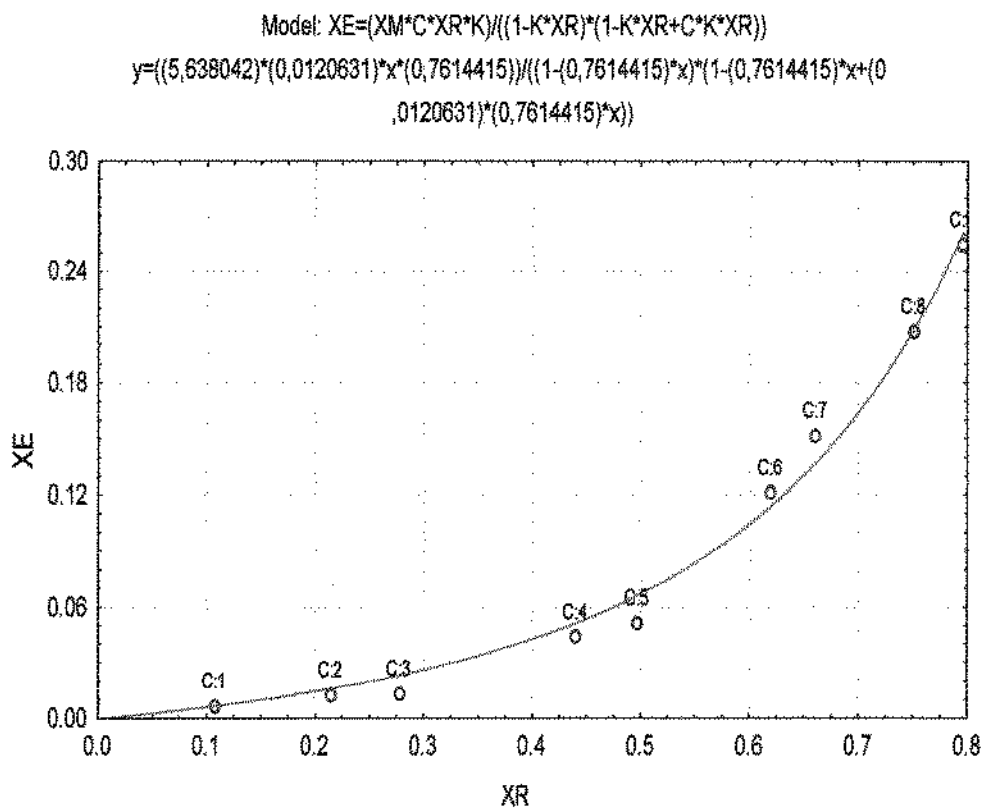


Figura 2.8 - Isoterma de dessorção na temperatura de 70°C ajustada pelo modelo de GAB.

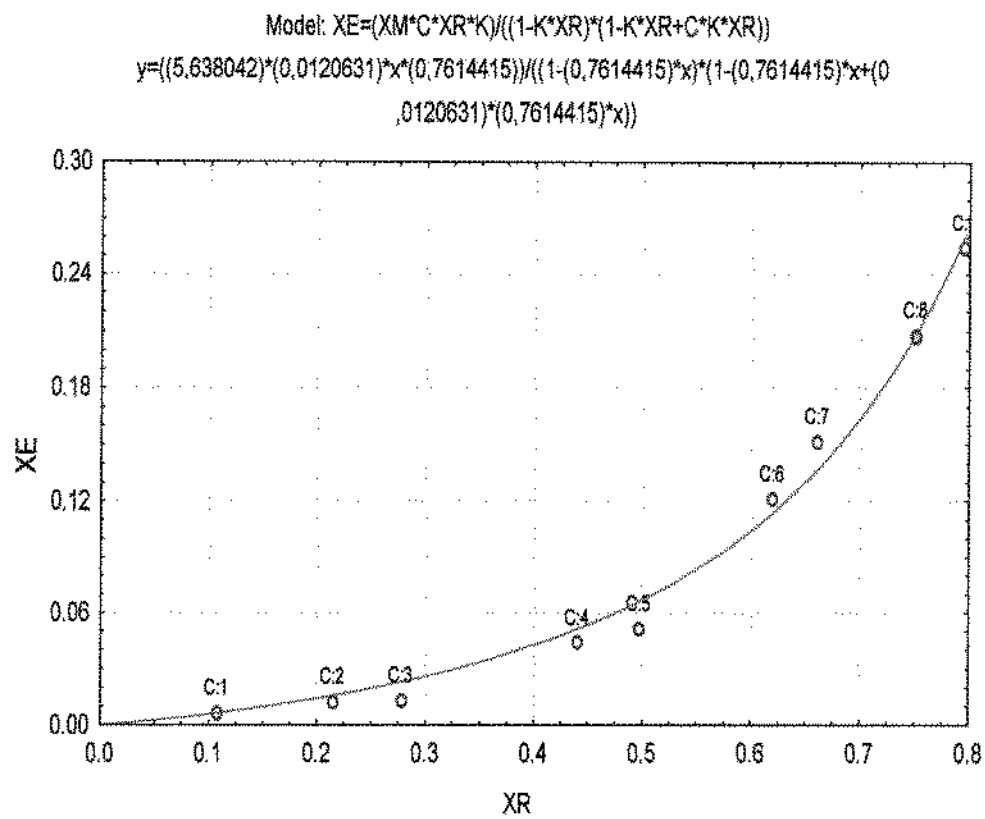


Figura 2.9 - Isoterma de dessorção na temperatura de 80°C ajustada pelo modelo de BET linearizado

Os parâmetros estimados pelos modelos testados, agora na adsorção de umidade são apresentados nas Tabelas abaixo (Tabelas 2.13 a 2.17). Nestes casos nota-se que não foi possível um ajuste das isotermas ao modelo de BET linearizado, que considera o número de camadas polimoleculares tendendo para infinito, conforme mostra o valor do coeficiente de determinação (r^2), e os vares exorbitantes de X_m apresentados na Tabela 2.13.

Os melhores ajustes para as isotermas de adsorção são apresentados nas Figuras 2.10, 2.11 e 2.12. As Figuras referentes aos outros ajustes encontram-se no Apêndice 2 (Figuras 10 a 18)

Verificou-se aqui nas isotermas de adsorção, que nos melhores ajustes, ou seja, no modelo de BET para as três temperaturas analisadas, X_m variou de 0,3707 a 0,3401 (Tabela 2.14) a medida que se aumentava a temperatura.

Tabela 2.13 - Parâmetros estimados do modelo de BET linearizado para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da adsorção de água na tâmara.

Parâmetros de BET linearizado			Coeficiente de determinação (%)
T (°C)	X_m	C	r^2
60	901,1342	0,000268	-
70	1596,276	0,000113	-
80	501,9970	0,000618	25,48

Tabela 2.14 - Parâmetros estimados do modelo de BET para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da adsorção de água na tâmara.

Parâmetros de BET				Coeficiente de determinação (%)
T (°C)	X_m	C	n	r^2
60	0,3707	2,9214	0,9998	98,65
70	0,3692	5,8943	0,8918	97,88
80	0,3400	2,5338	1,5951	97,30

Tabela 2.15 - Parâmetros estimados do modelo de GAB para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da adsorção de água na tâmara.

Parâmetros de GAB				Coeficiente de determinação (%)
T (°C)	X _m	C	K	r ²
60	0,3632	222,5938	0,0134	98,65
70	0,3389	1379,436	0,0045	97,83
80	0,5696	284,7250	0,0057	96,97

Tabela 2.16 - Parâmetros estimados do modelo de Halsey para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da adsorção de água na tâmara.

Parâmetros de Halsey			Coeficiente de determinação (%)
T (°C)	A	B	r ²
60	0,0193	2,2252	87,80
70	0,0011	4,4391	65,49
80	0,0560	1,7205	80,24

Tabela 2.17 - Parâmetros estimados do modelo de Oswin para atividades de água variando de 0,1 a 0,8 no caso da adsorção de água na tâmara.

Parâmetros de Oswin			Coeficiente de determinação (%)
T (°C)	A	B	r ²
60	0,2060	0,2986	92,73
70	0,2405	0,1659	76,34
80	0,2405	0,3857	86,92

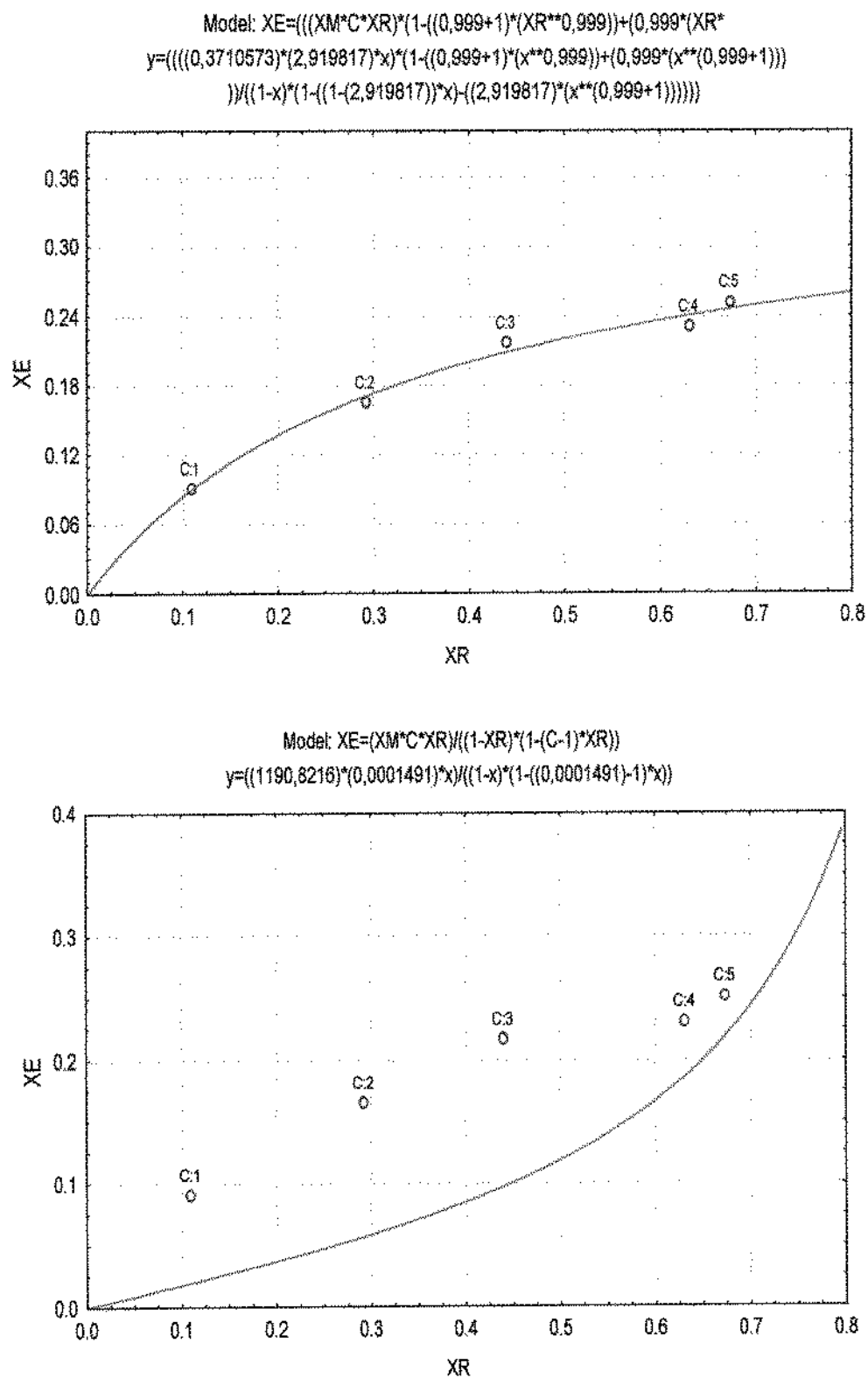


Figura 2.10 - Isoterma de adsorção na temperatura de 60°C ajustada pelos modelos de BET e BET linearizado

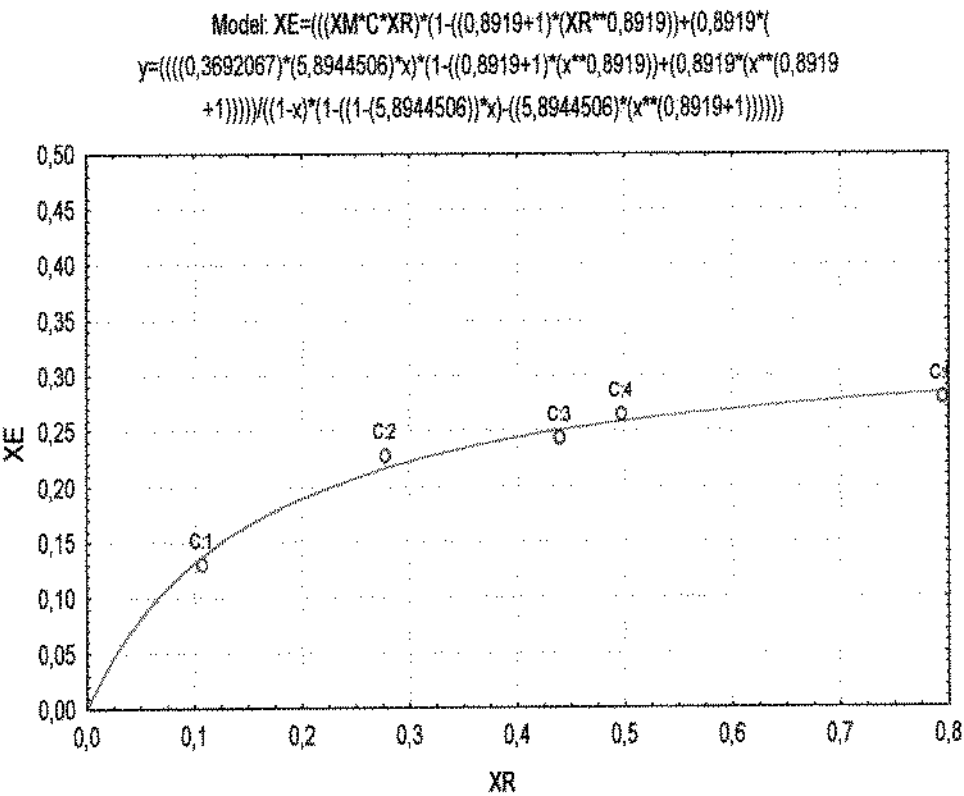


Figura 2.11 - Isoterma de adsorção na temperatura de 70°C ajustada pelo modelo de BET

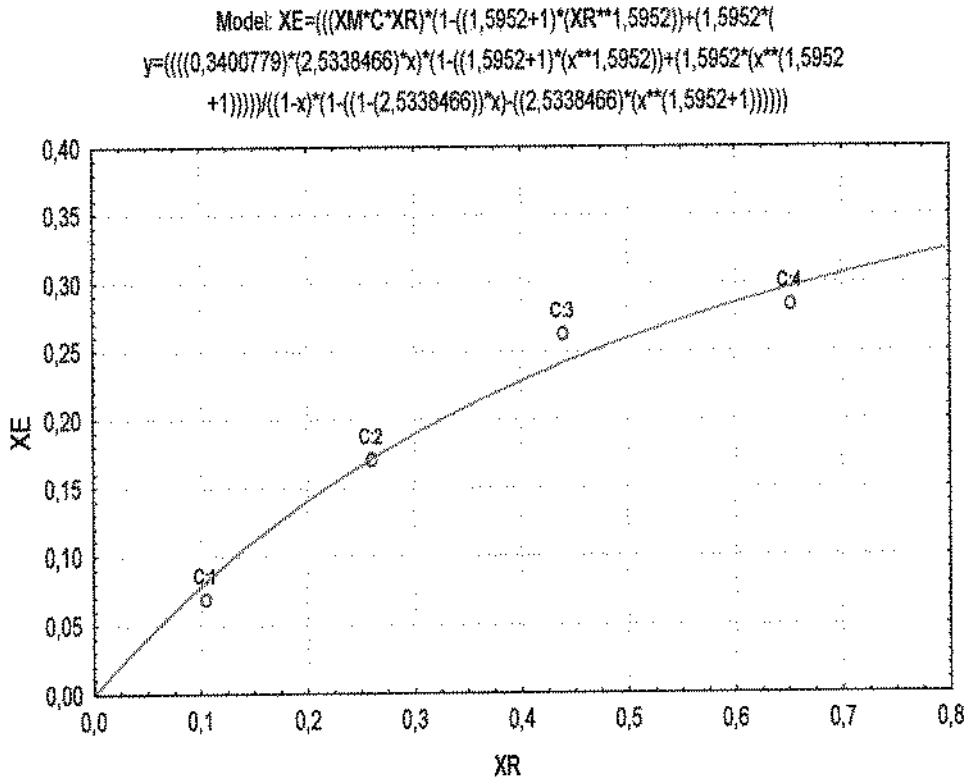


Figura 2.12 - Isoterma de adsorção na temperatura de 80°C ajustada pelo modelo de BET

MYHARA et al. (1996) num estudo sobre isotermas de sorção de água de tâmaras ajustadas pelo modelo de GAB para temperaturas de 25 e 45 ° C, obtiveram valores para a monocamada (X_m), variando de 8 a 10% em base seca e C de 1 a 2 . RYGG (1948) calculou valores para X_m de tâmaras da variedade Khaladry em torno de 18%, base seca.

Os valores calculados aqui para a monocamada molecular são dados em g de água/g de sólidos secos. Em termos de porcentagem estes valores variaram no ajuste de GAB, de 1,3 a 5,9% na dessorção, sendo que os valores de C variaram na faixa de 1,46 a 4,76, estando estes valores coerentes com àqueles relacionados por MYHARA et al. (1996).

As formas das isotermas são características de alimentos com alto teor de açúcares, os quais sorvem relativamente pequenas quantidades de água para baixas atividades de água e maiores quantidades para altos valores de atividade de água. Tâmaras contém cerca de 70% de açúcares totais e o restante consiste basicamente de biopolímeros. A forma levemente sigmoidal da primeira parte da isoterma é causada pela sorção de água dos biopolímeros e o pronto aumento do conteúdo de água para altas atividades de água é devido aos açúcares. Para baixas atividades de água, o estado físico dos açúcares pode ter um importante efeito nas propriedades de sorção (CHINACHOTI e STEINBERG, 1984).

4.4 - Histerese

Para as três temperaturas estudadas (60, 70 e 80°C) as isotermas apresentam formas sigmoidais e mostram considerável histerese entre a adsorção e a dessorção a qual persiste durante todo o limite de atividade de água estudado. A presença do loop da histerese significa que existem dois valores de atividade de água para qualquer valor dado do total de água sorvida.

Várias teorias tem sido propostas para explicar o fenômeno da histerese, mas estas são todas baseadas na condensação de água nos capilares, o que significa que a histerese ocorre somente para valores de atividade de água maiores que 0,5 e 0,6 (LABUZA, 1968).

No caso da isoterma da tâmara a histerese ocorreu para toda a faixa de umidade relativa utilizada na determinação da umidade de equilíbrio. Ainda precisa-se observar que existe uma tendência de aumento da histerese com a temperatura. A histerese cresce, para todas as temperaturas estudadas, a partir da umidade relativa de 0,1 até 0,5 e a partir desta umidade relativa decresce até 0,8.

Resultados obtidos por MANUEL SÁ e SERENO (1993) mostraram que o alto teor de açúcares presentes em alguns alimentos levam a uma inversão da usual dependência da temperatura nas isotermas de sorção de água para valores de atividade de água acima de 0,6.

SARAVACOS et al. (1986) e MARAOULIS et al. (1988) verificaram uma sobreposição das isotermas de uva passa, figos secos, ameixas e damascos para valores de atividade de água de 0,5 a 0,7.

No caso das tâmaras, ocorreu uma total sobreposição nas isotermas, provavelmente devido a uma combinação da condensação capilar e mudanças estruturais ocorrendo durante a adsorção ou dessorção de umidade.

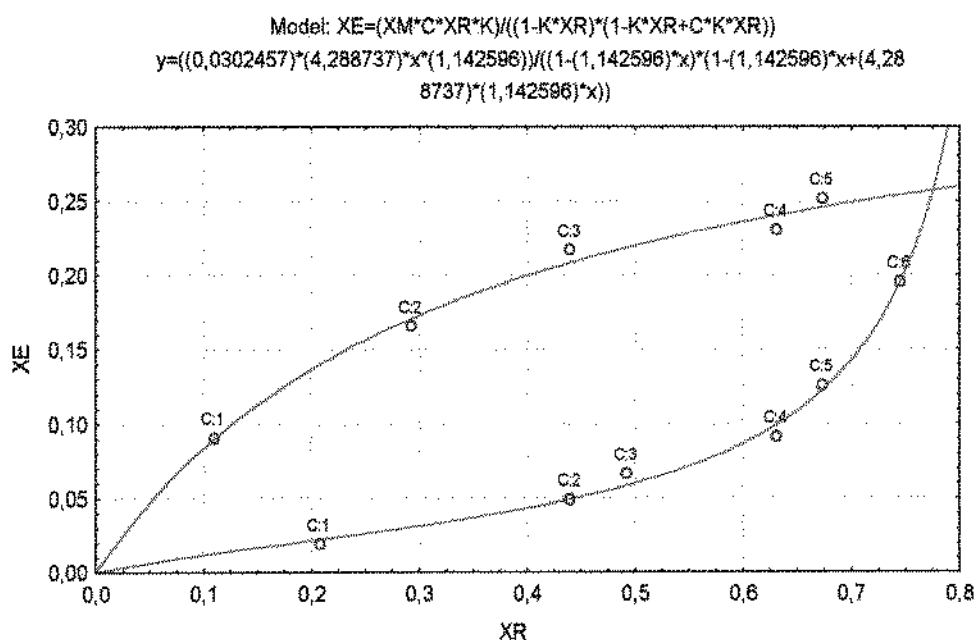


Figura 2.13 - Histerese de tâmara à temperatura de 60°C

Particularmente os açúcares encontrados nas tâmaras, estão no próprio estado higroscópico e qualquer aumento na umidade acima daquele para o qual ela foi desidratada resulta na sua cristalização. A extensão na qual esta cristalização prossegue é dependente da umidade do produto e durante a determinação da umidade de equilíbrio é dependente da atividade de água. De modo que a forma da isoterma de adsorção da tâmara para quaisquer valores de atividade de água pode ser diretamente dependente da quantidade de açúcares na forma cristalina. Este tipo de comportamento foi encontrado também por MAZZA e LE MAGUER (1978) nas isotermas de cebola.

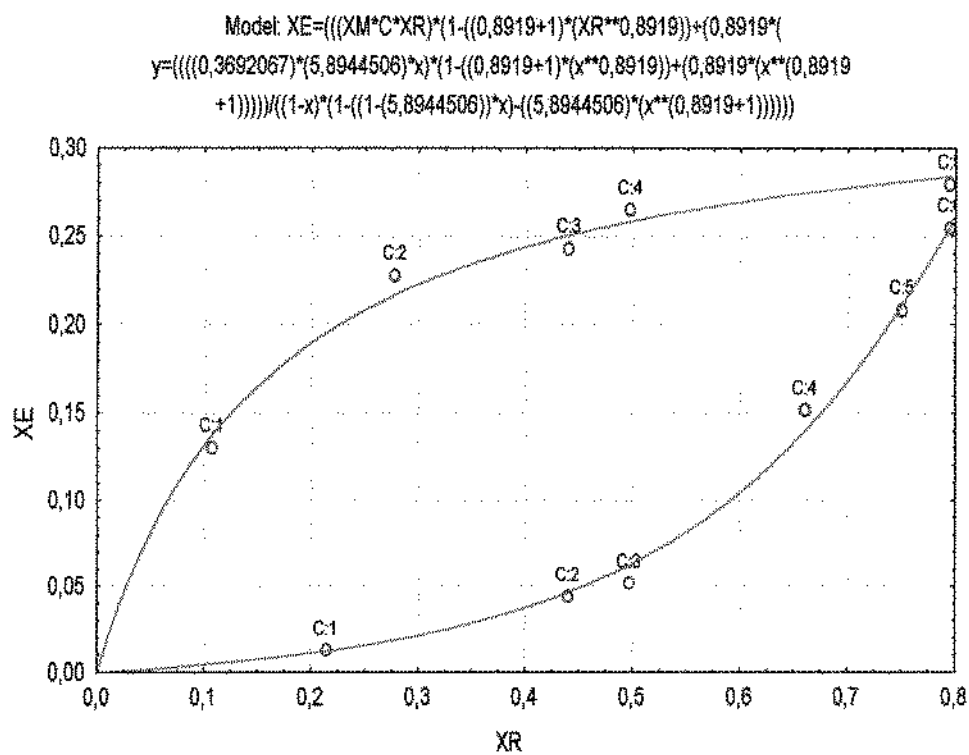


Figura 2.14 - Histerese de tâmara à temperatura de 70°C

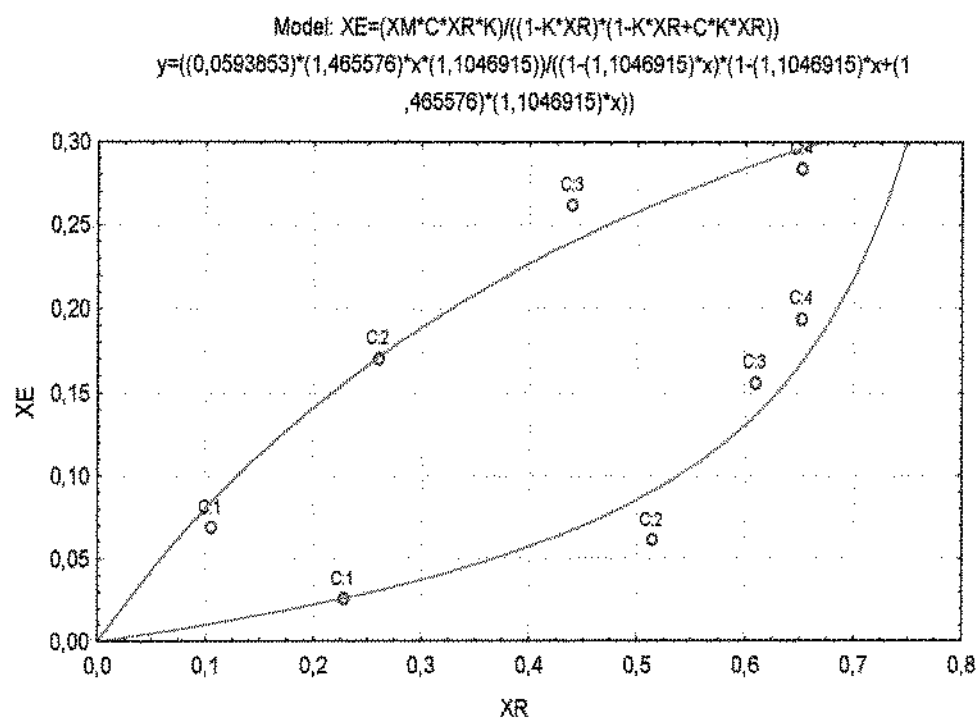


Figura 2. 15 - Histerese de tâmara à temperatura de 80°C

5.CONCLUSÕES

As isotermas de sorção de tâmaras, para as temperaturas de 60, 70 e 80°C se ajustaram melhor aos modelos de BET e GAB.

O conteúdo de umidade de equilíbrio diminui com o aumento da temperatura para valores constantes de atividade de água.

Nos ajustes obtidos para dessorção de umidade pela equação de BET, verifica-se que o conteúdo de umidade da monocamada (X_m) diminui com o aumento da temperatura, sendo o mesmo verificado na adsorção quando se utilizou as equações de BET e GAB para os ajustes, as quais, como já foi mencionado anteriormente, apresentaram um menor desvio relativo médio entre os valores experimentais e os preditos, além de apresentarem um maior coeficiente de determinação (r^2), resultando em melhores ajustes.

As taxas de dessorção foram mais altas no início do processo, diminuindo continuamente a medida que se aproxima da condição de equilíbrio. Estas taxas aumentaram com a diminuição da umidade relativa e da temperatura ambiente, exceto na faixa de umidade relativa compreendida entre os valores de 49 a 63% onde um comportamento oposto relacionado com a temperatura foi observado, mostrando que deve existir um valor crítico de umidade relativa nesta faixa. O modelo utilizado para o cálculo da constante R (taxa característica de dessorção), ajustou-se bem aos valores experimentais, sendo no entanto observado que o processo de dessorção apresentou duas fases distintas que foram caracterizadas por dois valores de R (R_1 e R_2) calculados das curvas de sorção de umidade.

A histerese ocorreu durante toda a faixa de umidade relativa analisada, acontecendo uma sobreposição total das isotermas de adsorção e dessorção, causada pela combinação da condensação capilar e mudanças estruturais, devido à alta quantidade de açúcares presentes nas tâmaras.

CAPÍTULO 3

ENCOLHIMENTO

1 - INTRODUÇÃO

A secagem de produtos agrícolas com alta umidade inicial (frutas e vegetais) é acompanhada de um encolhimento bastante significativo, pelo qual o material sofre alterações em suas dimensões e sua forma original. As células vivas, de origem animal ou vegetal exibem um comportamento, denominado "turgor", onde o líquido contido distende a parede celular e esta por sua vez comprime o líquido contido nela. Durante a secagem, ao se retirar a água diminui-se a tensão que o líquido exerce contra a parede celular. Esta diminuição da tensão, provocará o encolhimento do material (VAN ARSDEL, 1947).

A quantificação deste fenômeno é importante pelo fato de tornar-nos possível a análise da cinética de secagem e conseqüentemente a totalidade do fenômeno de secagem. Do ponto de vista matemático, o efeito do encolhimento causa mudanças nas condições de contorno, para a resolução da segunda lei de Fick (PARK, 1987).

Considerações de encolhimento em modelos de secagem são dificultadas porque não há nenhuma informação pertinente sobre coeficientes de encolhimento nem relação funcional entre encolhimento e difusividade de massa disponíveis na literatura. Um estudo do fenômeno de encolhimento é essencial para melhor entendimento do fenômeno de secagem e para o desenvolvimento de recomendações adequadas de condições de secagem para uma ótima eficiência de energia e condições, para prevenir que ocorram quebras e deformações durante a secagem (MISRA e YOUNG, 1980).

Embora seja visto que existe uma forte relação entre a umidade e propriedades de encolhimento, a literatura é ainda pobre em dados experimentais e uma metodologia padrão para predição destas propriedades não tem sido realizada.

Desta forma, o nosso objetivo foi estudar o encolhimento utilizando três metodologias para determinação do encolhimento (utilização da fotografia e paquímetro nas determinações lineares e picnometria nas determinações do volume). Foram testados os modelos propostos por SUZUKI et al. (1976).

2 - REVISÃO DE LITERATURA

Alguns autores consideram o encolhimento dos materiais submetidos à secagem como sendo proporcional ao volume de água removida durante o processo (KECHAOU e ROQUES, 1989; VAGENAS e MARINOS KOURIS, 1991a ; BALABAN, 1989).

VAGENAS e MARINOS KOURIS (1991a) estudando a secagem de damasco, propuseram encolhimento linear proporcional a variação do conteúdo de umidade do fruto. Supondo material isotrópico, consideraram variações nas três dimensões, sendo o mesmo coeficiente de encolhimento linear nas três direções.

Um modelo de encolhimento que relaciona a razão de variação do volume em função da umidade, foi descrito por LOZANO et al. (1983).

SERENO e MEDEIROS (1990) apresentaram um modelo que simplificava bastante após a análise do comportamento da densidade aparente do material em função da umidade. Verificaram que a densidade aparente aumenta, conforme a umidade do material diminui. Incluíram a esta conclusão, o comportamento da difusividade efetiva que, segundo outros autores decresce consideravelmente com a diminuição do conteúdo de umidade do material. Propuseram então que o produto da densidade do material pela difusividade efetiva fosse considerado constante. O modelo apresentou uma diferença entre os resultados previstos e experimentais de 1,1% para a umidade e de 2% para a taxa de secagem, quando testado em secagem de fatias de cenoura e de maçã.

MULLET et al. (1989) estudaram o processo de secagem de cenoura através de modelos de diferentes complexidades, considerando fronteira móvel ou fixa e difusividade constante ou dependente da umidade e temperatura locais, o encolhimento foi representado por uma correlação linear entre o volume da amostra e a sua umidade média. O problema de fronteira foi resolvido explicitamente por um método de diferenças finitas, sendo a discretização das equações desenvolvidas com base no conteúdo de matéria seca de cada subvolume.

SUAREZ e VIOLLAZ (1991) estudando a secagem de fatias de batata, incorporaram o fenômeno do encolhimento ao modelo de secagem, desenvolvendo a equação da difusão para corpos que sofrem encolhimento durante a secagem. Esta equação da difusão apresentava um fator multiplicativo da derivada parcial do teor de umidade no espaço, que era função da densidade mássica do sólido totalmente seco, da densidade mássica da água e do teor de umidade. Este termo teve origem na consideração da soma do volume de sólidos secos e da água, supondo encolhimento unidirecional. Além disso, consideraram que existe uma relação linear entre a umidade e a metade da espessura da fatia, devido ao encolhimento.

Uma análise do encolhimento nos modelos difusionais considerando diferentes geometrias foi realizada por FUSCO et al. (1991). Apresentaram uma boa revisão de literatura sobre estudos de encolhimento representados pelas relações de volume com o conteúdo de umidade e diferentemente dos demais, optaram por uma expressão que correlacionava estas duas propriedades através de uma função de terceiro grau. Obtiveram a solução numérica pelo método de diferenças finitas, adotando uma malha fixa com a interface móvel, localizada no contorno do material. Em todas as geometrias estudadas, os modelos difusionais de migração de água em sólidos descritos pela segunda lei de Fick com encolhimento apresentaram melhores resultados.

CARNEIRO (1995) desenvolveu um modelo simplificado de transferência de umidade durante a secagem de merluza. Neste modelo a velocidade de encolhimento foi calculada através de ajuste polinomial dos dados de espessura em função do tempo com um coeficiente de correlação médio de $99,8 \pm 0,2\%$. A solução da equação numérica resultante do modelo que utiliza o encolhimento expresso como fronteira móvel com uma velocidade linear foi obtida. O perfil de umidade calculado foi comparado com os dados experimentais obtendo-se uma boa concordância entre eles.

A deformação e o encolhimento durante a secagem de um meio poroso foram analisados por MATTEA et al. (1989) através de um modelo computacional. Eles consideraram um meio poroso como um arranjo de células e poros casualmente distribuídos. Isto foi representado pela repartição de um domínio bi-dimensional em polígonos irregulares. As mudanças induzidas pela secagem são descritas e

introduzidas na tesselação por meio de uma aproximação geométrica. Uma série de equações representando o deslocamento dos vértices dos polígonos devido ao processo de secagem são colocadas e resolvidas numericamente.

BALABAN (1989) estudou a influência do encolhimento nos problemas de difusão de calor e massa, desenvolvendo métodos, com e sem a consideração do encolhimento. Para simplificar, assumiu um decréscimo linear da dimensão com o teor de umidade, destacando que quando esta correlação fosse não linear, poderia ser facilmente incorporada ao modelo. Definiu funções que expressavam o grau de encolhimento máximo: 70%, 50% e 30% do original. Para a solução numérica foi utilizado o método de diferenças finitas centrais modificadas para contemplar a distância entre os nós variáveis e desiguais. Após cada espaço de tempo, a distância entre os nós era ajustada de acordo com o teor de umidade médio daquela fatia. Comparando os resultados obtidos dos modelos com e sem encolhimento, concluíram que estes podem apresentar diferenças significativas nos valores estimados médios e locais do teor de umidade e da temperatura.

AREGBA et al. (1990) abordaram o fenômeno de encolhimento, incluindo-o no equacionamento original. Desenvolveram um modelo difusivo de secagem, onde aparece um termo convectivo (função da velocidade de deslocamento da fase sólida), o qual explica a transferência de umidade ligada ao encolhimento. Esse termo convectivo teve origem nas equações de fluxo da fase líquida relativamente à fase sólida (sistema bifásico) e na consideração de fluxo difusivo. Isto resultou em uma expressão para a velocidade de deslocamento da fase sólida em função do encolhimento volumétrico.

Um modelo para materiais que sofrem grandes deformações foi desenvolvido por KECHAOU e ROQUES (1989), secando gel em fatias. A partir de uma curva experimental correlacionando a densidade mássica do material com seu teor de umidade, concluíram que o volume poderia ser representado por uma função linear do teor de umidade médio durante o encolhimento. Considerando o material anisotrópico, optaram por uma equação que relacionava a espessura da fatia em função do conteúdo de umidade médio. Através de uma mudança de coordenadas para um sistema ancorado no sólido, inseriram o coeficiente de encolhimento linear no equacionamento, resolvendo-o por diferenças finitas.

PARK (1998) analisando a secagem de filés de cação correlacionou o encolhimento à uma função linear entre a dimensão linear deste e o seu conteúdo de umidade durante a secagem.

SUZUKI et al. (1976) trabalhando com cenoura, batata, batata-doce e rabanete, analisaram o encolhimento utilizando três modelos:

- Modelo de secagem uniforme: assume-se que o volume de encolhimento é igual ao volume de água que é retirada durante a secagem. Como o volume da água corresponde a fração desidratável, relacionando o encolhimento ao ponto de equilíbrio, a equação obtida depende somente da umidade e densidade na condição de equilíbrio;

- Modelo de secagem central: assume-se que a concentração varia do centro (mais úmido) à superfície (mais seca), relacionando com a isoterma de equilíbrio. Portanto supõe-se que a camada seca é separada do centro úmido, considerando ainda que a densidade do centro seja igual a densidade do material no ponto de equilíbrio;

- Modelo de secagem semi-central: assume-se que a densidade da camada seca não é sempre igual a densidade do material seco, uma vez que a umidade na fase gasosa contribui menos que a umidade na fase líquida. Neste caso, a densidade da camada seca é um valor intermediário entre a densidade inicial e a densidade do material seco.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Material

- paquímetro digital;
- provetas de 100ml;
- tolueno
- balança semi-analítica METTLER PC400;
- máquina fotográfica.

3.2 - Métodos

Buscando um método para verificar a variação em volume e área no decorrer da secagem, experimentaram-se técnicas utilizadas em outros materiais. Uma delas consistia na imersão da amostra em um recipiente com o volume e a densidade do material conhecido. No caso, o material utilizado foi o tolueno (o qual não interferiu nas medidas de umidade das amostras durante a secagem) onde, pelo deslocamento do volume e variação da massa, obteve-se a densidade da amostra (Apêndice 3).

A técnica de medição direta das dimensões da amostra, através do paquímetro foi também usada.

As amostras também foram fotografadas em conjunto com um padrão referencial. A distância focal foi mantida fixa, visando evitar erros na medição das dimensões das amostras com relação ao padrão referencial. Pela análise das fotos (Apêndice 3) obteve-se as dimensões características das amostras.

Através destes métodos foram obtidas três dimensões características, além dos valores da densidade do material durante a secagem. Pode-se desta forma calcular a variação da área e do volume das amostras, considerando quatro formas geométricas: cilindro sem tampa, cilindro com tampa, elipse oblata e elipse prolata.

Todas estas avaliações do encolhimento foram realizadas durante todo o processo de secagem em intervalos regulares de tempo (3 em 3 horas).

Após a secagem até peso constante, as amostras foram levadas à estufa à vácuo a 65°C durante 48 horas (AOAC ,1984), onde foram obtidos os valores da massa seca, os quais foram utilizados para cálculo do encolhimento.

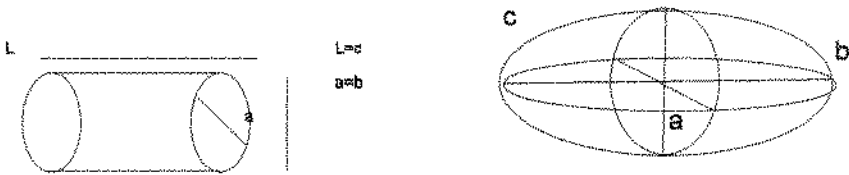
Foram testados os três modelos de encolhimento de Suzuki et al. (1976): o modelo uniforme 1, o modelo uniforme 2 e o modelo central, os quais levam em consideração os parâmetros físicos de umidade e densidade durante o processo de secagem:

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados experimentais das dimensões características a, b e c obtidas por fotografia e do conteúdo de umidade das amostras durante a secagem são encontrados nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 para as diferentes condições de secagem (T = 60, 70 e 80°C e v = 0,5, 1,0 e 1,5 m/s)

Tabela 3.1 - Valores experimentais das dimensões características (fotos) em 10⁻³ m, durante todo o processo de secagem para a temperatura de 60°C e três velocidades do ar de secagem (0,5, 1,0 e 1,5m/s)

Ubs	v = 0,5 m/s			Ubs	v = 1,0m/s			Ubs	v =1,5m/s		
(%)	a	c	b	(%)	a	c	b	(%)	a	c	b
89,0	23,0	39,0	22,5	70,1	24,0	41,0	24,0	86,2	26,0	41,5	24,2
79,2	21,0	38,5	21,2	60,7	23,5	39,5	23,5	74,5	26,0	40,0	24,0
69,4	19,0	38,0	20,5	51,4	23,0	39,2	22,5	64,0	24,0	39,5	23,5
59,5	18,5	37,6	18,8	43,4	22,5	37,3	21,0	53,4	23,0	38,0	23,0
25,8	17,0	34,0	17,8	36,4	21,5	36,0	20,0	44,7	22,0	37,0	22,0



r = (a+b)/4

- a, b= diâmetros transversais das tâmaras
- c= comprimento da tâmara ou, diâmetro longitudinal
- r= raio da tâmara

Tabela 3.2 - Valores experimentais das dimensões características (fotos) em 10⁻³ m durante todo o processo de secagem para a temperatura de 70°C e três velocidades do ar de secagem (0,5, 1,0 e 1,5m/s)

Ubs	v = 0,5 m/s			Ubs	v = 1,0m/s			Ubs	v =1,5m/s		
(%)	a	c	b	(%)	a	c	b	(%)	a	c	b
138	23,0	38,0	23,0	137	24,5	41,5	24,5	104	24,0	40,0	23,6
104	23,0	37,0	23,0	110	24,0	41,0	24,2	77,0	23,0	38,5	22,3
70,9	22,0	36,0	22,0	83,5	23,0	40,0	22,0	54,2	21,0	38,5	19,5
45,9	21,0	36,0	22,0	57,8	22,5	39,0	22,0	36,9	20,0	38,0	19,5
6,4	18,5	33,5	19,5	39,2	21,0	38,5	20,0	24,7	18,0	37,0	19,5

Tabela 3.3 - Valores experimentais das dimensões características (fotos) em 10⁻³ m durante todo o processo de secagem para a temperatura de 80°C e três velocidades do ar de secagem (0,5, 1,0 e 1,5m/s)

Ubs	v = 0,5 m/s			Ubs	v = 1,0m/s			Ubs	v =1,5m/s		
(%)	a	c	b	(%)	a	c	b	(%)	a	c	b
146	23,5	38,0	22,0	160	21,9	39,5	22,3	138	25,0	42,0	24,0
81,4	21,5	35,0	21,0	79,3	20,0	36,4	21,0	67,8	23,2	39,5	24,0
39,9	19,8	34,0	19,0	35,5	18,5	35,3	19,7	28,5	22,0	38,0	21,0
20,4	18,8	34,0	18,5	18,1	17,4	34,5	18,0	13,8	20,5	37,5	21,0
12,1	18,8	34,0	18,5	11,7	17,1	34,3	17,6	9,7	20,0	37,5	18,5

Outro método utilizado para verificar o encolhimento foi a medição direta das dimensões das amostras fazendo o uso de um paquímetro digital. São apresentados nas Tabelas 3.4, 3.5 e 3. 6 os valores destas dimensões sendo que os valores dos diâmetros a e b são aqui representados por um valor médio (b) para as temperaturas de 60, 70 e 80°C, respectivamente.

Tabela 3.4 - Valores experimentais das dimensões características (paquímetro) em 10⁻³ m durante todo o processo de secagem obtidos por medição direta, para a temperatura de 60°C e três velocidades do ar de secagem (0,5, 1,0 e 1,5m/s)

Ubs	v = 0,5 m/s		Ubs	v = 1,0m/s		Ubs	v =1,5m/s	
(%)	c	b	(%)	c	b	(%)	c	b
89,0	39,7	22,8	70,1	41,7	24,0	86,2	38,8	22,8
79,2	39,0	21,5	60,7	40,6	23,1	74,5	38,5	21,1
69,4	38,3	21,1	51,4	39,9	22,8	64,0	37,9	20,0
59,5	37,6	19,7	43,4	39,7	21,5	53,4	37,8	18,8
25,8	37,1	18,9	36,4	39,0	20,7	44,7	37,3	17,8

Tabela 3.5 - Valores experimentais das dimensões características (paquímetro) em 10⁻³ m durante todo o processo de secagem obtidos por medição direta, para a temperatura de 70°C e três velocidades do ar de secagem (0,5, 1,0 e 1,5m/s)

Ubs	v = 0,5 m/s		Ubs	v = 1,0m/s		Ubs	v =1,5m/s	
(%)	c	b	(%)	c	b	(%)	c	b
138	38,0	23,1	137	40,4	23,2	104	39,4	22,4
104	36,8	22,7	110	39,4	22,3	77,0	38,6	20,6
70,9	36,2	20,3	83,5	38,3	21,5	54,2	38,5	20,1
45,9	34,9	18,7	57,8	37,9	20,1	36,9	37,6	19,6
6,4	34,3	17,4	39,2	36,9	19,9	24,7	37,3	18,5

Tabela 3.6 - Valores experimentais das dimensões características (paquímetro) em 10⁻³ m durante todo o processo de secagem obtidos por medição direta, para a temperatura de 80°C e três velocidades do ar de secagem (0,5, 1,0 e 1,5m/s)

Ubs	v = 0,5 m/s		Ubs	v = 1,0m/s		Ubs	v =1,5m/s	
(%)	c	b	(%)	c	b	(%)	c	b
146	38,6	23,3	160	39,7	21,8	138	37,6	23,4
81,4	37,4	21,0	79,3	36,6	20,3	67,8	36,2	20,5
39,9	36,1	19,8	35,5	35,6	18,4	28,5	35,4	17,8
20,4	35,9	19,7	18,1	34,9	17,7	13,8	34,8	16,4
12,1	35,5	18,9	11,7	34,0	17,0	9,7	34,5	16,1

Todas as grandezas físicas, resultados de medições, estão afetadas de uma incerteza que se convencionou chamar de erro, desvio, imprecisão ou incerteza da medida.

Erros aleatórios, também chamados de erros casuais, erros estatísticos ou erros acidentais, são erros que variam de uma medida para seguinte, realizada em condições idênticas; e que se distribuem para mais ou para menos em torno do valor médio da grandeza. Estes erros são devidos a flutuações casuais de condições ambientais, a erros de estimativa (pequenos erros de paralaxe de leitura; pequenas não linearidades ou distorções na impressão da escala, etc.), a interferência de elementos estranhos e as deficiências dos próprios instrumentos de leitura.

O que é essencial, é que estes erros podem ser reduzidos pela reiteração das medidas, decrescendo em geral de forma proporcional a $1/n^{1/2}$ onde n é o número de medidas experimentais.

A fim de se determinar a precisão dos dois métodos aqui utilizados para avaliação do encolhimento (fotografia e paquímetro), foi calculado o erro estatístico (variancia de uma série de medidas). Utilizando o mesmo objeto de medição, o paquímetro, mediu-se as dimensões reais de uma tâmara e as dimensões desta tâmara na foto, em uma série de dez repetições. Calculou-se o erro estatístico como:

$$\varepsilon = \sigma / n^{1/2} \quad (3.9)$$

Onde:

σ =desvio padrão

n = número de repetições

Tabela 3.7. Erro relativo da média calculado para paquímetro e fotografia

repetição	paquímetro (10 ⁻³ m)			foto (10 ⁻³ m)		
n	a	b	c	a	b	c
1	15,06	17,20	32,97	16,15	23,05	35,63
2	16,09	17,14	32,99	17,30	23,33	36,72
3	16,17	17,41	33,04	17,37	23,44	36,90
4	15,09	16,92	32,43	17,81	23,18	36,72
5	16,81	17,22	32,77	16,57	23,07	37,06
6	16,58	17,66	31,91	17,32	23,07	37,01
7	17,08	17,84	31,16	17,52	23,20	36,17
8	16,59	17,86	31,65	17,69	23,10	37,04
9	17,08	18,47	31,11	17,74	23,39	36,88
10	17,02	17,64	31,52	17,95	23,31	37,27
média	16,36	17,64	32,16	17,34	23,21	36,74
desvio σ	0,759	0,588	0,784	0,5696	0,1443	0,4887
erro $e=\sigma/\sqrt{n}$	0,2401	0,1860	0,2479	0,1801	0,0456	0,1545

Com o valor calculado do erro, conforme pode ser visto na Tabela 3.7, tornou-se possível determinar qual método foi mais preciso. Os valores encontrados para fotografia e paquímetro foram, respectivamente 0,0456 e 0,186 para a dimensão b; 0,1545 e 0,2479 para c; 0,1801 e 0,2401 para a. Desta forma concluiu-se que o método da fotografia neste caso foi mais preciso, já que apresentou menor valor do desvio padrão e consequentemente um menor erro da média.

Com os valores das dimensões características foi possível calcular a variação da área das amostras durante a secagem, considerando quatro formas geométricas distintas: um cilindro com tampa, um cilindro sem tampa, uma elipse prolata e uma elipse oblata. Assim foi obtida a relação entre a área no instante da secagem e a área inicial, que definem o fenômeno do encolhimento.

No Apêndice 3 as Tabelas 1 a 18 mostram os valores desta relação para o caso da medição direta com paquímetro e das amostras fotografadas. Foram calculados os erros relativos para as diferentes áreas consideradas tomando em

relação a área de um cilindro sem tampa, a fim de se verificar se poderia haver uma aproximação da forma da tâmara para uma geometria mais simples. O volume das amostras de tâmaras foi determinado para as formas de cilindro e elipse com os valores das dimensões características obtidos por fotografias, já que este método mostrou ser mais preciso, através do cálculo do erro relativo.

Uma outra maneira de se calcular o volume foi fazendo uso dos dados experimentais de densidade e massa (picnometria) obtidos durante o processo de secagem (Apêndice 3).

No método de medição direta com o paquímetro foi verificado um menor erro relativo nas áreas que consideraram uma elipse prolata sendo que a média entre esses erros para a elipse prolata e para a elipse oblata variaram muito pouco, conforme pode ser visto no Apêndice 3.

Nas medidas obtidas por fotografia a forma com menor erro relativo médio calculado foi a da elipse prolata. Podemos então concluir que o formato elipsoidal da tâmara pode ser muito bem aproximada à forma de um cilindro.

Obtidos estes valores de encolhimento consegue-se através dos modelos de SUZUKI et al. (1976), correlacionar estes valores utilizando os métodos de regressão linear e regressão não linear, de forma a se obter o valor do coeficiente n do Modelo Uniforme (1 e 2) e do Modelo Central :

Modelo Uniforme 1

$$\frac{A}{A_0} = \left[\frac{(X + a)}{(X_0 + a)} \right]^n \quad (3.11)$$

Onde:

$$a = X_e(1/\rho_e - 1) + 1/\rho_e \quad (3.12)$$

Modelo Uniforme 2

$$\frac{A}{A_0} = (bX + c)^n \quad (3.13)$$

Onde:

$$\begin{aligned} b &= \rho_0 / (X_0 + 1) \\ c &= 1 + b - \rho_0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Modelo Central

$$\frac{A}{A_0} = (kX + 1)^n \quad (3.15)$$

Onde:

$$l = (\phi X_0 - X_e)(X_0 - X_e) \quad (3.16)$$

$$\phi = (X_e + 1)\rho_0 / (X_0 - X_e) \quad (3.17)$$

$$k = (1 - \phi) / (X_0 - X_e) \quad (3.18)$$

Os valores dos coeficientes (n) dos modelos testados e os erros relativos médios calculados entre os valores experimentais e os valores estimados são apresentados nas Tabelas 19 a 30 do Apêndice 3. Pode-se verificar pelo cálculo do erro médio, que os modelos se ajustaram melhor aos resultados experimentais através de regressão não linear, considerando a geometria cilíndrica da tâmara e o método de fotografia para avaliação do encolhimento.

Para comparação de cada equação, ou seja dos valores teóricos com os valores experimentais, foram construídos gráficos para cada curva de secagem, considerando a geometria cilíndrica do material e os valores do coeficiente n das equações obtidos por regressão não linear (Figuras 3.1 a 3.9).

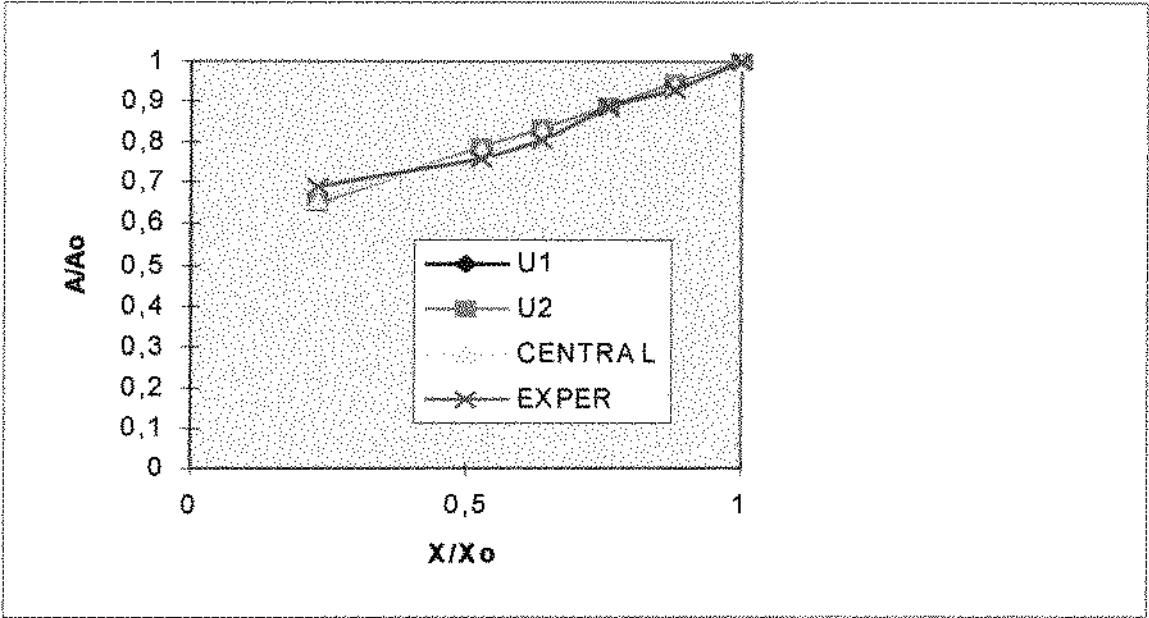


Figura 3.1.Comparação dos Modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 60 ° C e velocidade do ar de secagem de 0,5 m/s.

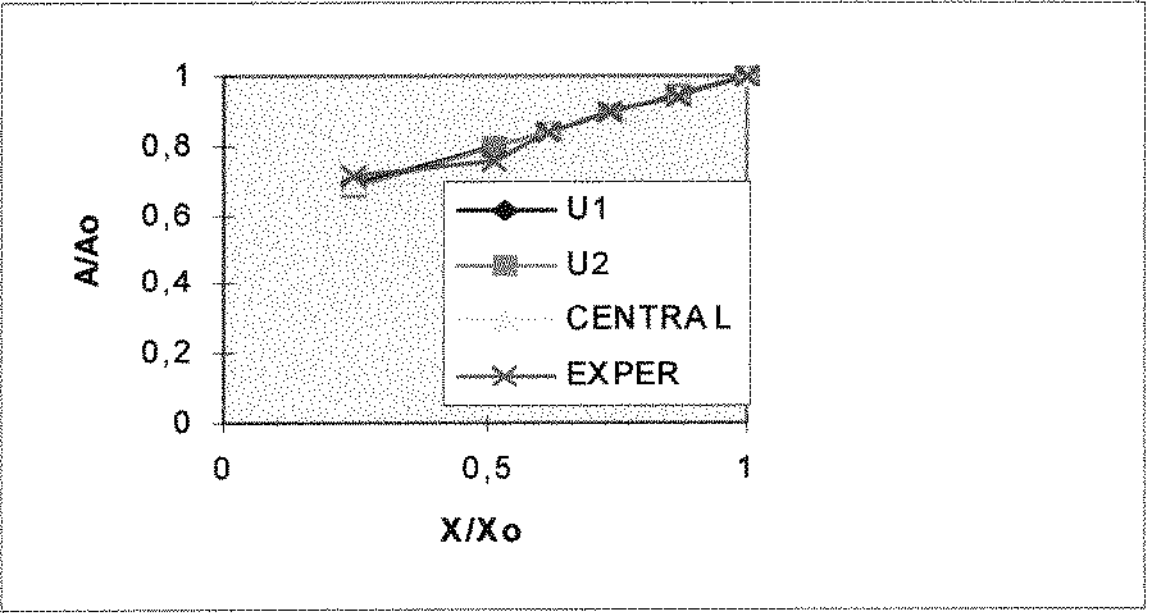


Figura 3.2.Comparação dos modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 60 ° C e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.

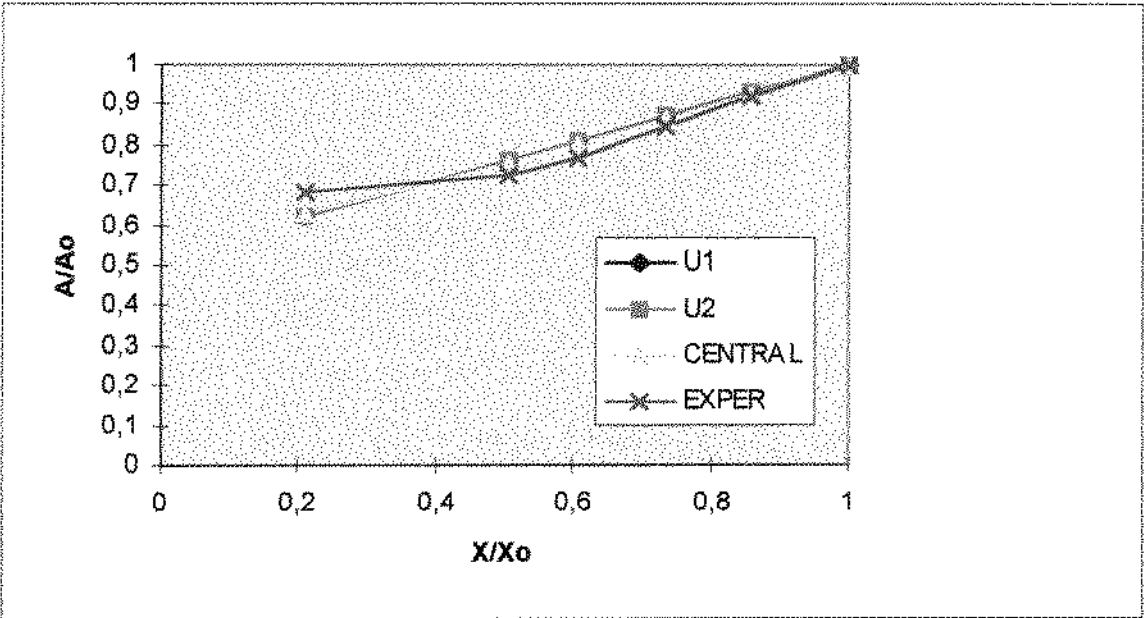


Figura 3.3.- Comparação dos Modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 60°C e velocidade do fluxo do ar de secagem de 1,5 m/s.

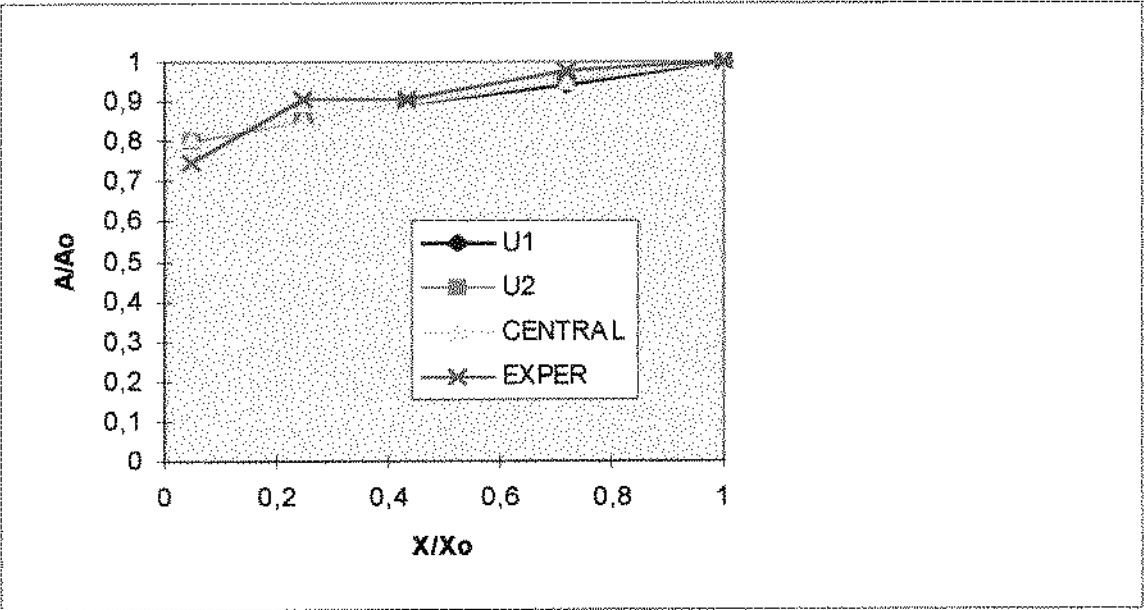


Figura 3.4. Comparação dos Modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 70°C e velocidade do fluxo do ar de secagem de 0,5 m/s.

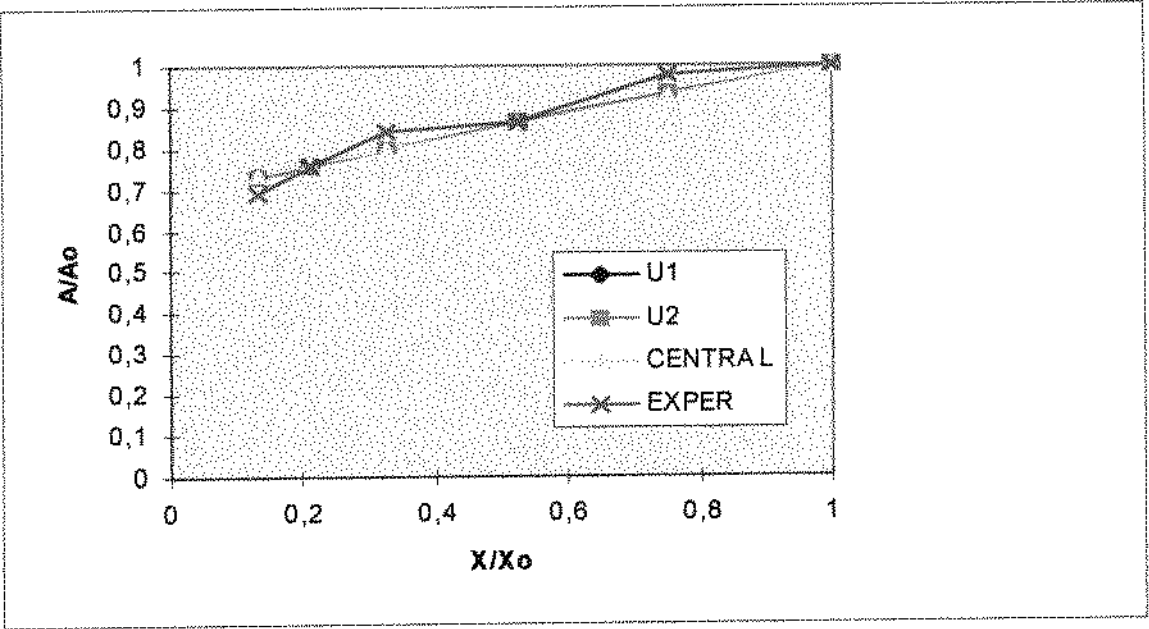


Figura 3.5.- Comparação dos Modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 70°C e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.

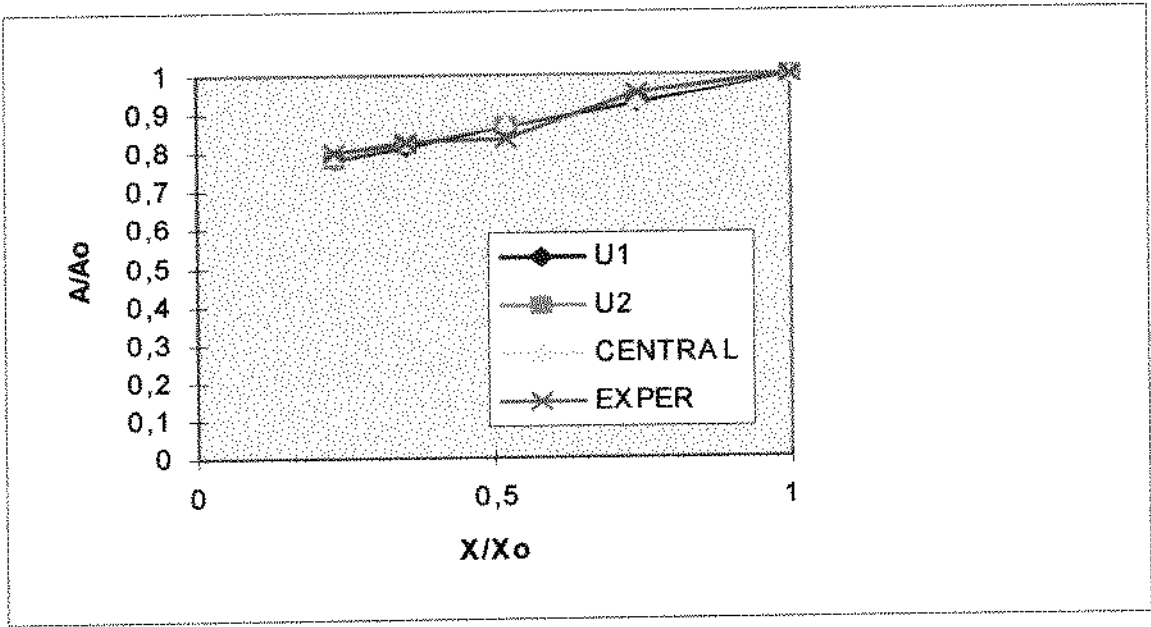


Figura 3.6.- Comparação dos Modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 70°C e velocidade do ar de secagem de 1,5 m/s.

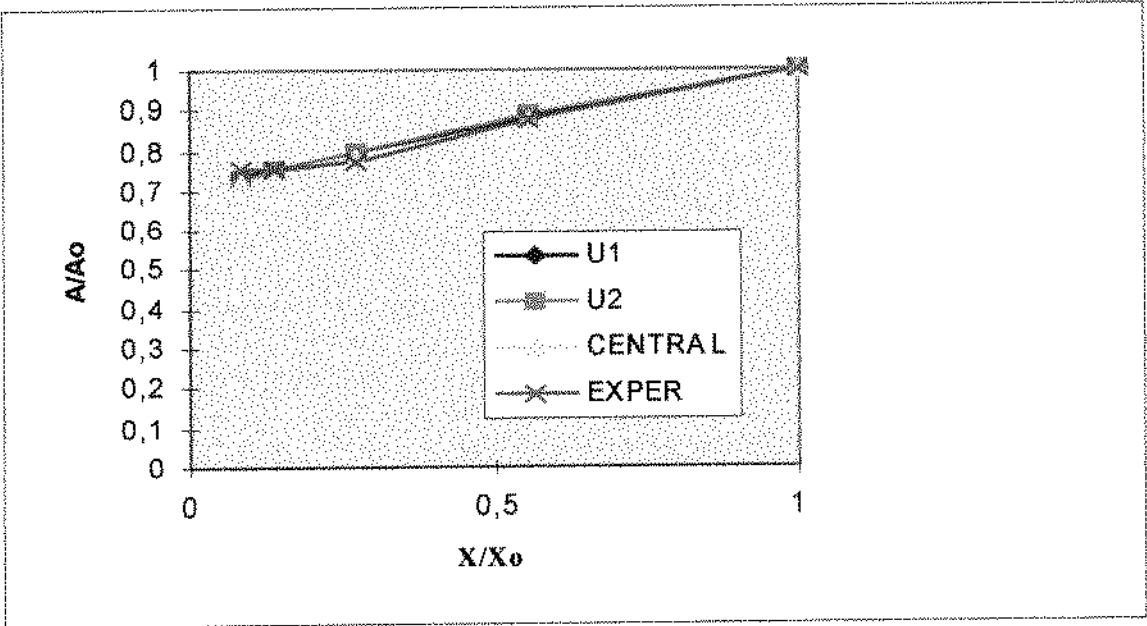


Figura 3.7.- Comparação dos Modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 80°C e velocidade do ar de secagem de 0,5 m/s.

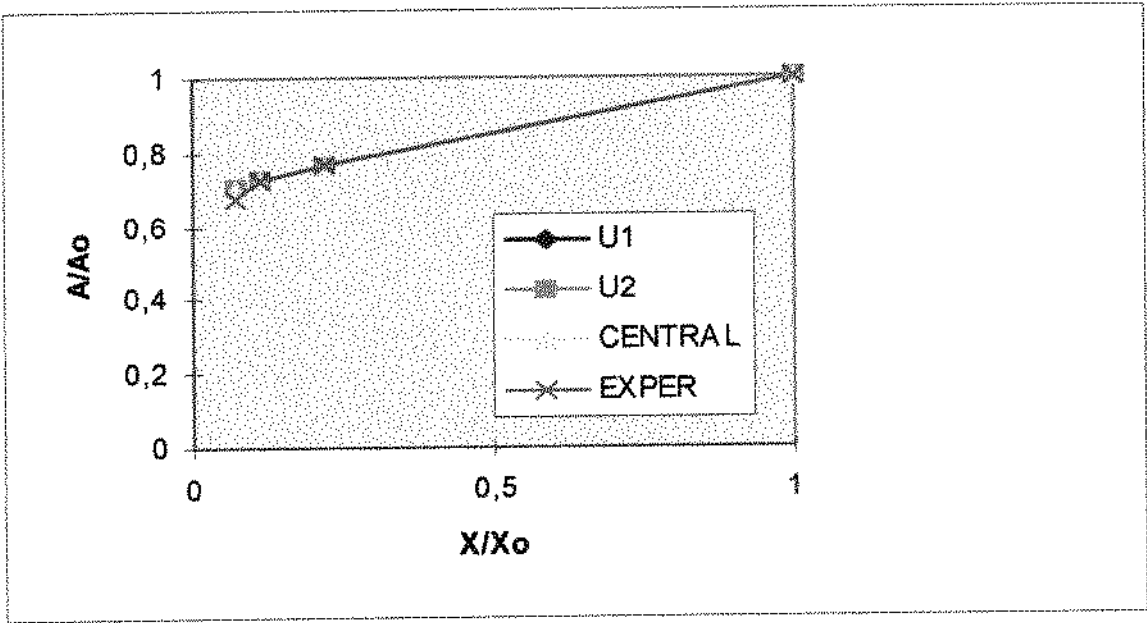


Figura 3.8.- Comparação dos Modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 80°C e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.

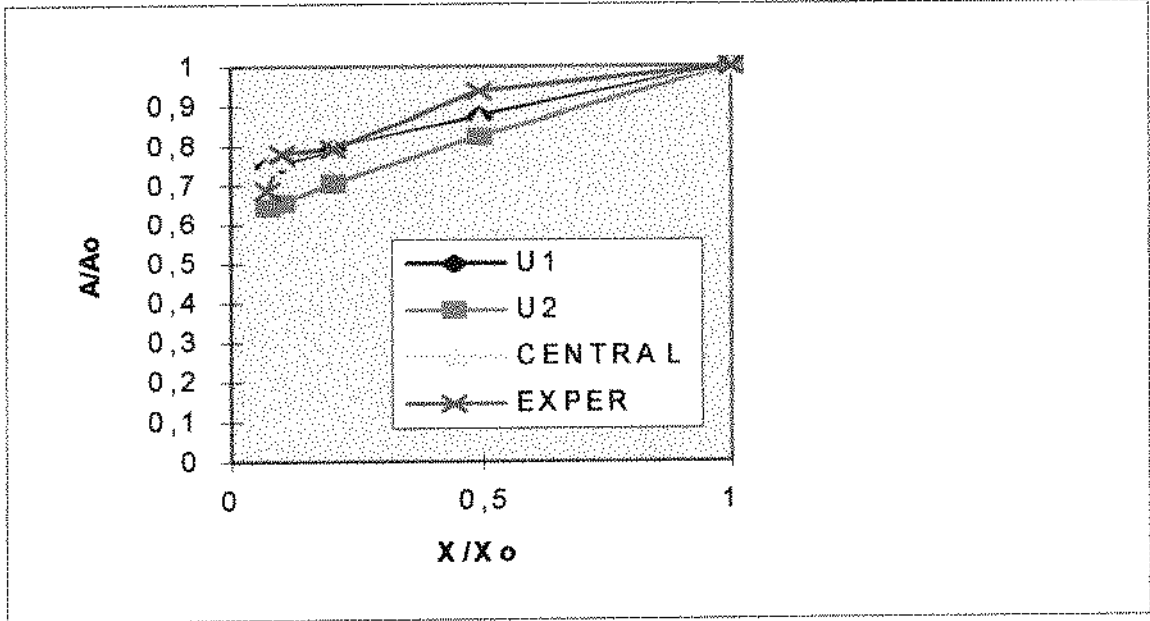


Figura 3.9 -.Comparação dos Modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e Central, com os valores experimentais para a temperatura de 80°C e velocidade do ar de secagem de 1,5 m/s.

Pelas Figuras 3.1 a 3.9 pode-se observar que os valores calculados pelos Modelos Uniforme 1 e 2 e pelo Modelo Central, se aproximam bastante dos valores experimentais, verificando uma maior conformidade destes valores para a temperatura de 80 °C e velocidade do ar de 1,0 m/s. A pior situação foi à 80 ° C e velocidade de 1,5 m/s. Cabe ressaltar, que os valores calculados pelo Modelo Central foram ainda mais próximos dos valores experimentais para todas as curvas de secagem, já que este modelo assume que a concentração de umidade varia do centro (mais úmido) à superfície (mais seca) do material, supondo que a camada seca seja separada do centro úmido. Este resultado concorda com aquele obtido por SUZUKI et al. (1976) no estudo da secagem de raízes vegetais cortadas em cubos.

O valor do expoente n dos modelos utilizados, variou conforme as condições de secagem a que o material foi submetido (temperatura e fluxo do ar de secagem). Para cada curva de secagem obteve-se um valor para o coeficiente de encolhimento. Desta forma apresentamos na Tabela 3.8 os resultados do coeficiente de encolhimento (n) para as diferentes condições de secagem da tâmara considerando a forma de um cilindro

Tabela 3.8- Valores do coeficiente de encolhimento (n) dos Modelos Uniforme 1 e 2, e do Modelo Central para diferentes temperaturas e diferentes velocidades do ar de secagem.

T = (°C)	v (m/s)	Uniforme 1	Uniforme 2	Central
60	0,5	1,06	0,92	1,47
60	1,0	1,04	0,93	1,41
60	1,5	1,17	1,04	1,52
70	0,5	0,38	0,34	0,44
70	1,0	0,59	0,51	0,74
70	1,5	0,56	0,48	0,68
80	0,5	0,46	0,37	0,62
80	1,0	0,44	0,39	0,49
80	1,5	0,43	0,50	0,57

Verificaram-se maiores valores do coeficiente de encolhimento para temperaturas menores, no caso 60°C em todos os modelos. Menores valores deste coeficiente foram encontrados para a temperatura de 80°C. O Modelo Uniforme (1 e 2) apresentou menores valores deste coeficiente para todas as condições de secagem, em relação ao Modelo Central.

Quanto à velocidade do ar de secagem, os valores do coeficiente das equações foram bem diferenciados uns dos outros, algumas vezes aumentando com o aumento da velocidade do ar, outras diminuindo. Somente para temperatura de 70°C o valor do coeficiente aumentou a medida que se aumentava a velocidade do ar de secagem.

Também em relação à velocidade do ar, pode-se dizer que nas curvas de secagem com velocidade de 1,0 m/s, o valor do coeficiente calculado para o encolhimento não se afastou muito dos valores calculados para as condições limites de fluxo de ar, (0,5 e 1,5 m/s) ,umas vezes se apresentando mais próximo do valor encontrado para 0,5 m/s ,outras vezes mais próximo do valor encontrado para 1,5 m/s. Pode-se dessa forma dizer que a velocidade do ar de secagem não apresenta uma influência marcante sobre o fenômeno de encolhimento.

5.CONCLUSÕES

Na análise do encolhimento durante todo o processo de secagem de tâmaras, o método de medição das dimensões características, que utilizou a fotografia foi mais preciso do que o método de medição direta com paquímetro, uma vez que este apresentou um menor erro estatístico da média.

Quanto a geometria utilizada para o calculo da variação da área durante a secagem, a forma elipsoidal da tâmara pode ser muito bem representada por um cilindro.

Dos três modelos testados para encolhimento, o Modelo Uniforme1 que leva em consideração os valores de umidade inicial e os valores da umidade e densidade no ponto de equilíbrio; o Modelo Uniforme 2, que considera somente os valores iniciais de umidade e densidade do material; diferenciaram muito pouco um do outro, apresentando valores calculados bem próximos dos valores experimentais.

O Modelo Central mostrou um melhor ajuste, em relação aos outros dois modelos anteriores, por ser um modelo que leva em consideração a separação da camada seca e do centro úmido.

CAPÍTULO 4

SECAGEM

1. INTRODUÇÃO

A secagem de frutas é uma forma de conservação praticada desde a antiguidade. A secagem visa a redução da atividade de água de um dado alimento a qual está relacionada intimamente com a sua estabilidade física, química e microbiológica. Outro objetivo da secagem é a significativa redução em volume e peso do produto, o que promove uma maior facilidade no transporte e armazenamento do produto alimentício.

A uva e a ameixa são, sem dúvida, as frutas mais consumidas mundialmente na forma seca. No entanto o consumo nacional destas passas só é viabilizado pela importação, devido principalmente à inexistência de cultivares adequadas à secagem (CANTO et al., 1987). Algumas tentativas foram feitas no sentido de se desenvolver a produção destas passas no Brasil, porém com resultados apenas satisfatórios.

Revela-se portanto, a importância de se incentivar a produção de passas a partir de frutas tropicais, como alternativa para os problemas de perdas em épocas de excesso de produção sazonal e possivelmente, como contribuição para se reduzir o volume de importação destes produtos.

As curvas de secagem variam com a espécie, variedade, condições ambientais, localidade, fertilidade dos campos de cultivo, práticas agrícolas e tipos de pré-processamento. Por isso devem ser constantemente investigadas até que se forme um banco de dados que possa estabelecer o comportamento de um produto nas diversas regiões produtoras. Analogamente podem-se desenvolver programas para simulação com base em modelos matemáticos, dispensando-se a parte experimental.

Com relação a influência da velocidade do ar e da umidade relativa sobre a taxa de secagem existem trabalhos mostrando esta influência para produtos a serem secos no período de taxa de secagem decrescente. No entanto, existem outros

trabalhos mostrando que dentro de determinado intervalo estudado esta influência não se evidencia e desta forma, estes dois parâmetros são constantemente negligenciados no estudo do comportamento da taxa de secagem.

Os objetivos deste capítulo são:

- Determinar as curvas de secagem de tâmaras da variedade Zahidi, para as temperaturas de 60, 70 e 80° C e velocidades do ar de secagem de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s.
- Determinar o coeficiente de difusão líquida para as condições de secagem estabelecidas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processo de secagem

A secagem é a operação na qual a atividade de água (a_w) de um alimento é diminuída pela remoção da água, através de sua vaporização ou sublimação (KAREL, 1975).

O tipo de secagem a ser utilizado depende, dentre outros fatores, do produto desidratado, da sua constituição química e das características físicas do produto final desejado (CUNNINGHAN, 1982).

A secagem de produtos sólidos com ar quente é uma operação unitária muito utilizada nas indústrias de alimentos e agrícolas. Uma vez que o produto é colocado em contato com o ar quente, ocorre uma transferência de calor do ar ao produto sob o efeito da diferença de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de massa para o ar, na forma de vapor de água (PERRY, 1984). Uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água. A evolução destas transferências simultâneas de calor e de massa no curso da operação faz com que esta seja dividida esquematicamente em três períodos:

- Período 0 ou período de se entrar em regime operacional. No começo, o produto é geralmente mais frio que o ar e a pressão parcial de vapor da água na superfície do produto é débil e por consequência a transferência de massa e a velocidade de secagem também o são. O calor chegando em excesso acarreta uma elevação da temperatura do produto ocorrendo um aumento de pressão e da velocidade de secagem. Este fenômeno continua até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa. Se a temperatura do ar for inferior à do produto, esta última diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio.
- Período 1 ou período de secagem a taxa constante. Durante este período como no anterior, a quantidade de água disponível dentro do produto é bem

grande. A água evapora como água livre: a pressão de vapor da água pura na superfície é constante e é igual a pressão de vapor da água pura a temperatura do produto. Esta última é também constante e é igual a temperatura de bulbo úmido, característica pelo fato de que as transferências de calor e de massa se compensam exatamente. A velocidade de secagem é, por conseguinte, constante. Este período continua, enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para compensar a perda por evaporação de água na superfície.

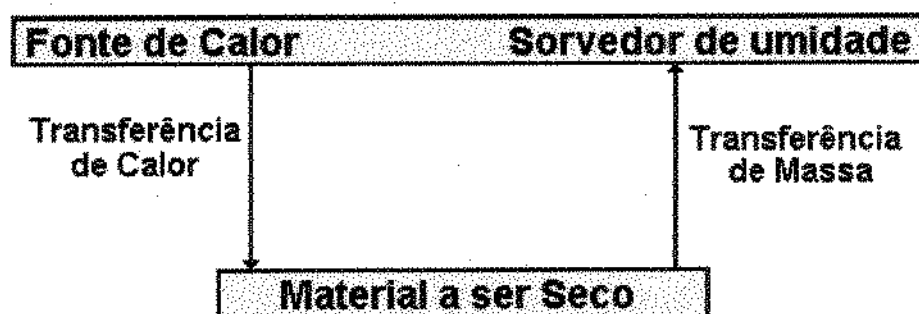
- Período 2 ou período de secagem a taxa decrescente. Desde o momento em que a água começa a ser deficiente na superfície, a velocidade de secagem diminui. O valor do teor de água do produto no ponto de transição entre os dois períodos é chamado de teor de água crítica. A troca de calor não é mais compensada, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Durante todo esse período o fator limitante é a migração interna de água. Esta redução da taxa de secagem é às vezes interpretada como uma diminuição da superfície molhada no começo do período 2, mas mais frequentemente pelo abaixamento da pressão parcial de vapor da água na superfície. No final deste período o produto está em equilíbrio com o ar e a velocidade de secagem é nula.

De acordo com STRUMILLO e KUDRA (1986) o período de taxa decrescente pode ser dividido em duas fases:

- primeira fase: a água livre (fase líquida) presente no interior do produto é contínua, sem a presença de ar, e ocupa todos os poros do produto. O movimento de água do interior para a superfície ocorre por capilaridade e este mecanismo controla a velocidade de secagem.
- segunda fase: a remoção de água da superfície de evaporação provoca a entrada de ar no interior do produto o que dá origem a bolsas de ar que ficam dispersas na fase líquida dentro dos poros. Nesta fase o escoamento capilar ocorre apenas em alguns pontos localizados.

Embora a secagem seja um dos métodos mais antigos para preservação de alimentos a utilização de secagem artificial é empregada somente nos dois últimos séculos. Entende-se por secagem artificial, aqueles métodos que empregam a energia diferente da obtida pela exposição ao sol (ALI ASBI, 1982).

Representando o modelo físico de secagem em um diagrama, tem-se:



Isto é, durante a secagem, é necessário fornecer o calor para que haja evaporação de umidade no material devendo ao mesmo tempo existir um sorvedor de umidade que atue na remoção do vapor de água, formado a partir da superfície de secagem.

2.1.1. Período de secagem a taxa constante

Neste período são as transferências de calor e de massa na interface ar-produto, que governam a secagem e fixam a velocidade de secagem. As equações definindo as transferências de calor e de massa na interface ar-produto são estabelecidas fazendo referência a uma noção de condutância de superfície interpretada por um fenômeno de camada limite: se forma uma fina camada de ar em escoamento laminar ao redor da partícula e há um equilíbrio de temperatura e umidade entre o ar e a superfície desta partícula.

A taxa de secagem pode ser calculada através da equação de transferência de massa ou da equação de transferência de calor:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{hA(T_d - T_w)}{\Delta H_{vap}} = K_g A(P_w - P_{wa}) \quad (4.1)$$

Na prática a equação de transferência de calor fornece uma estimativa mais segura da taxa de secagem. Embora correlações para calcular os coeficientes de transferência de calor e massa tenham sido propostos na literatura, poucos dados são disponíveis para permitir que as constantes destas correlações sejam

fixadas com segurança. Estes coeficientes são função da espessura do filme de ar que envolve o produto na secagem e desta forma são afetados pela velocidade do ar de secagem e o seu ângulo de incidência sobre a superfície seca (RIZVI, 1986).

Suzuki et al. (1977) citado por RIZVI (1986) durante a secagem de batata doce, cenoura e gel ágar, relacionaram o coeficiente de transferência de calor no período de taxa constante através de uma equação de Nusselt da seguinte forma:

$$Nu = b (Re)^{1,2} (Pr)^{1,3} + 2,0 \quad (4.2)$$

No processo de secagem de alimentos fica difícil determinar exatamente a umidade crítica, devido ao encolhimento, entretanto alguns valores desta umidade crítica no final do período de secagem a taxa constante tem sido encontrados variando entre valores de 3,5 a 5,0 (kg de água/kg matéria seca) para vegetais e de 5,5 a 7,7 (kg de água/kg matéria seca) para frutas (SARAVACOS e CHARM, 1962).

PARK (1987) relata que o ponto de inflexão do período de taxa constante e decrescente de secagem não representa uma propriedade, dependendo inclusive dos parâmetros operacionais. Portanto, este ponto não deve receber a denominação de "ponto crítico". A denominação mais correta seria o "ponto de transição" do período de taxa constante ao período de taxa decrescente ou o "ponto de inflexão" das taxas. O ponto crítico na taxa de secagem estaria situado no período de taxa decrescente, representando a transição do estado pendular e funicular.

2.1.2. Período de secagem a taxa decrescente

Este período é quase sempre o único observado para secagem de produtos agrícolas e alimentícios. No momento em que a quantidade de água na superfície diminui ocasionando o decréscimo da velocidade de secagem, inicia-se o período de taxa decrescente.

HSU (1983) propôs uma solução numérica para a equação de difusão de Fick considerando a difusividade efetiva dependente da umidade. Este modelo foi aplicado a absorção de água durante a reidratação de soja. Assumindo que o grão tenha geometria esférica, que a difusão ocorra apenas na direção radial e que a mudança de volume causada pela absorção de água seja desprezível, a equação de difusão de Fick fica na forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D(X) \frac{\partial X}{\partial r} \right) \right] \quad (4.6)$$

Onde $D(X)$ pode ser escrita como uma função exponencial do teor de umidade

$$D(X) = D_0 \exp(K_1 X) \quad (4.7)$$

Para situações nas quais o coeficiente de difusão é dependente da concentração, Schober e Thijssen citados por RIZVI (1986), desenvolveram um método de regime regular para cálculo da taxa de secagem. O período de regime regular foi definido como o tempo durante o processo de difusão transiente, no qual as mudanças de concentração com o tempo são tomadas em conta e o efeito da condição inicial sobre o processo é desprezado. Para aplicação deste método torna-se necessário o conhecimento da curva de regime regular para concentração da superfície constante e para a temperatura desejada.

Segundo RIZVI (1986), Bruin e Luyben utilizando este método calcularam com razoável precisão as curvas de secagem de diversos alimentos líquidos e sólidos.

Este método é baseado na suposição de que a transferência de calor possa ser desprezada e a secagem possa ser tratada como uma difusão puramente controlada pelo fenômeno de transferência de massa. Isto foi baseado em vários estudos experimentais que indicaram a existência de pequenos gradientes de temperaturas dentro dos alimentos durante o processo de secagem (CHIRIFE, 1981; SARAVACOS e CHARM, 1962; VACCAREZZA et al 1974).

2.2. Teoria de secagem

ALVARENGA et al. (1980) citam como sendo seis os mecanismos de transporte de água em sólidos:

- a- Difusão líquida, devido ao gradiente de concentração;
- b- Difusão de vapor, devido ao gradiente de pressão parcial de vapor, causado pelo gradiente de temperatura;
- c- Fluxo de líquido e de vapor, devido a diferenças de pressão externa, concentração, alta temperatura e capilaridade;
- d- Escoamento por efusão, escoamento de Knudsen, os mesmos ocorrem quando o caminho livre das moléculas de vapor, for da mesma ordem do diâmetro dos poros. Esse mecanismo só é importante para condições de alto vácuo.
- e- Movimento do líquido, devido à força gravitacional, o que não influi significativamente na secagem de alimentos;
- f- Difusão superficial, que não é levada em consideração na maioria das teorias existentes, pelo fato de ser praticamente desprezível.

Uma extensa revisão bibliográfica para a secagem de materiais biológicos foi efetuada por DAUDIN (1983), envolvendo 162 referências, apresentando doze tipos de curvas de secagem, explanando cinéticas de secagem e trazendo equações empíricas existentes para as curvas de secagem de materiais biológicos.

As mais importantes teorias de secagem são aquelas que tentam explicitar os fenômenos físicos internos que governam o período de taxa decrescente da secagem. Dentre muitas teorias existentes, o problema reside em encontrar a teoria aplicável aos materiais biológicos dentro da validade de hipóteses pertinentes a mesma.

2.2.1. Teoria da difusão líquida

A maioria dos pesquisadores de produtos agrícolas tem utilizado a teoria da difusão líquida, entre estes KEEY (1972) e NEVES (1982).

Na teoria da difusão líquida, LEWIS (1921), analisa a secagem com a equação da segunda lei de Fick, assumindo o perfil linear de concentração de umidade no material expressando a razão de umidade livre removível inicial, e umidade removível momentânea em função exponencial do tempo de secagem, onde a umidade livre é a umidade do material menos a umidade de equilíbrio. Por outro lado, durante a secagem, o estabelecimento do perfil de concentração da superfície ao centro do material, não é instantâneo, existindo um limite de separação da zona úmida (central) e zona seca (superficial). Esta interface move-se para o centro do material durante a secagem, conseqüentemente o perfil estabelecido é da superfície até esta interface. A espessura do material, onde existe este perfil estabelecido, controla a secagem através da difusão. O autor denomina esta camada de efeito pelicular. devido à existência dessa camada há necessidade da utilização de um fator de correção. SHERWOOD (1929a) classifica como sendo quatro os tipos de mecanismos de secagem em termos de resistência interna versus resistência externa, isto é, resistências em termos de movimento líquido, de difusão de vapor, de difusão na camada limite do ar externo e de difusão no ar externo. Utilizando a equação de Fick para sua análise, demonstra que a equação com fator de correção por LEWIS coincide com a solução em série de Fourier durante os primeiros períodos até a remoção de 60% da umidade livre, nas condições de resistência externa desprezível.

Em outro artigo SHERWOOD (1929b) mostra a existência de duas zonas distintas do período de taxa decrescente e recomenda a utilização da palavra difusional em secagem como referência somente a migração interna de umidade no sólido.

Estes dois autores (LEWIS, 1921, e SHERWOOD, 1929a) foram os que iniciaram o tratamento de secagem com a teoria difusional, isto é, expressando o fluxo de transferência de massa na secagem como sendo função do gradiente de concentração de água.

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

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{C}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (4.8)$$

Onde:

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

r = coordenada radial em cilindros e esferas e coordenada na direção perpendicular ao plano, em corpos em forma de placa plana;

t = tempo, s.

2.2.2. Teoria capilar

Esta teoria baseia-se no conceito de potencial, que pode ser definido como a diferença de pressão entre a água e o ar na interface água-ar presente no capilar. A equação de fluxo capilar líquido é dada por:

$$\bar{J}_l = -K_h \nabla \Psi \quad (4.9)$$

Onde:

$\bar{J}_l$ = fluxo de líquido, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;

Ψ = potencial hidráulico capilar, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;

K_h = condutividade hidráulica, s^{-1} .

Para condições de temperatura constantes, considera-se que o potencial capilar seja proporcional ao gradiente de concentração da água. de forma que a equação seja escrita da seguinte forma (PHILIP e De VRIES, 1957):

$$\bar{J}_l = -K_h \rho_s \nabla X \quad (4.10)$$

Onde:

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

A teoria capilar afirma que na secagem de sólidos o fluxo de água é inteiramente comandado pelas forças capilares, sendo independente da concentração de água.

2.2.3. Teoria de vaporização-condensação

A teoria de vaporização-condensação assume a migração de umidade nos poros como uma ocorrência na fase gasosa. De VRIES (1975) assume os pesquisadores KRISCHER e ROHNALTER (1940) como sendo os primeiros a sugerir a influência do movimento de vapor na transferência de calor no meio poroso, onde o fluxo de vapor é função da difusividade de vapor de água, pressão parcial e total. HARMATHY (1969), em seu trabalho demonstra que a transferência de massa no período da taxa decrescente de secagem, ocorre unicamente na forma de vapor. Estes estudos em meios capilares-porosos, provenientes das ciências dos solos, trazem como decorrência uma importante teoria “transferência simultânea de calor e massa”, ou seja, afirmações de que a transferência de calor não depende somente da condução térmica, mas depende também da redistribuição da massa, e a transferência de massa é determinada não só pela diferença de potencial químico, mas depende também da difusão térmica.

2.2.4. Teoria de Luikov

Foram LUIKOV e MIKHAYLOV (1965) e LUIKOV (1966) que introduziram a aplicação da termodinâmica irreversível para tratar as transferências simultâneas de calor e massa.

LUIKOV (1966) para quantificar esta transferência de energia cria o potencial de transferência como sendo a derivada parcial da função característica desta energia com respeito as coordenadas utilizadas na análise. Ou seja, na transferência de calor o potencial de transferência é a temperatura na coordenada de entropia, e analogamente, na transferência de massa teríamos o potencial de transferência de umidade apropriado para cada análise. A escolha apropriada do potencial para transferência de massa dependerá do conhecimento do fenômeno, obedecendo a analogia com a transferência de calor, inclusive em termos de capacidade térmica (calor específico) definido em termos de capacidade de umidade (KEEY, 1972) para transferência de massa.

2.2.5. Teoria de Philip e De Vries

Baseia-se no conceito de escoamento viscoso de água líquida, sob a influência das forças: de gravidade, capilar e adsorção, e no conceito de escoamento de vapor difusional. PHILIP e De VRIES (1957), formulam as equações de transferências de calor e massa separadamente e estudam os efeitos dessas transferências simultaneamente ajustando os coeficientes de transferências.

2.2.6. Teoria de Fortes e Okos

FORTES e OKOS (1981) utilizam a teoria de LUIKOV (1966) de termodinâmica de processos irreversíveis com a introdução da unidade de equilíbrio para os materiais biológicos.

2.3. Modelos de secagem

Uma análise global dos trabalhos publicados referentes à modelagem do processo de secagem permite a distinção de duas formas de abordagens do tema: uma que se baseia principalmente nas condições externas, como a temperatura, umidade e velocidade do ar, correlacionando-as com a velocidade de secagem dos sólidos, e outra que considera não apenas as condições externas, mas também os mecanismos de migração interna de umidade e suas possíveis consequências sobre as alterações físicas, químicas e biológicas do produto. No último caso, a modelagem deve ainda estabelecer entre os diferentes mecanismos de movimento de umidade no interior do produto, aquele que será considerado como determinante. Cabe ressaltar que, de forma geral, os modelos de difusão líquida tem apresentado bons resultados em aplicações de secagem de grãos, frutas e cereais, provavelmente, devido ao fato destes produtos não apresentarem um período de taxa constante nas curvas características de secagem, o que permite concluir que o processo é totalmente controlado pelas condições internas do material.

Tratando-se da secagem de materiais biológicos, pode-se observar que os autores apresentam preferências pelos modelos de difusão líquida (STEFFE e SING, 1980; KUMAR et al., 1986; RAMASWANY e LO, 1983; TOLABA e SUAREZ, 1995). Estes trabalhos são baseados na equação da difusão líquida, a qual postula que o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração dentro do sólido.

CRANK (1975) apresentou diversas soluções analíticas para a equação da difusão, considerando diferentes condições inicial e de contorno. Tratou também de casos onde a difusividade varia linearmente ou exponencialmente com a concentração. No entanto, estas soluções somente se aplicam a sólidos com formas geométricas simples e regulares. Em geral o coeficiente de difusão é obtido por ajustes das curvas teóricas aos dados experimentais de secagem e é denominado difusividade efetiva, por englobar efeitos de diferentes fenômenos durante a migração de umidade.

Para produtos com elevado teor de água inicial como frutas e vegetais, os modelos de secagem, baseados na equação de difusão líquida aparecem com bastante frequência, apresentando bons resultados,. Os modelos mais simples consideram difusividade constante e desprezam o fenômeno de encolhimento como nos trabalhos desenvolvidos por LOMAURO et al., 1985 e NOGUEIRA, 1991.

Outros autores ao utilizar a equação difusional tem avaliado a dependência da difusividade efetiva com a temperatura (MULLET et al, 1983; BERNA et al., 1990); ou com a umidade (SILVA e NEBRA, 1988); com a temperatura e a umidade (IGBEKA, 1982); ou com a temperatura, a umidade relativa e a velocidade (YUSHENG e POULSEN, 1988).

Alguns autores enfatizam a importância de se considerar o encolhimento do produto durante o processo de secagem, mesmo com a hipótese de difusividade constante (VAGENAS e MARINOS KOURIS b; 1991; SUAREZ e VIOLLAZ, 1991; QUEIROZ, 1994). Há ainda, aqueles autores que contemplam em seus modelos a variação da difusividade e o fenômeno de encolhimento em diferentes níveis de complexidade (MISRA e YOUNG, 1980; MULLET et al., 1989; VAGENAS e MARINOS KOURIS c, 1991).

SERENO e MEDEIROS (1990) desenvolveram um modelo simplificado para secagem de alimentos. Esse modelo foi baseado nas difusividades térmica e mássica, levando em consideração o efeito da interação umidade-sólido para superfícies de secagem e o encolhimento. Eles afirmaram que o coeficiente de difusão diminui consideravelmente com a diminuição da umidade.

KING (1968) forneceu uma interessante análise da teoria de transferência de calor e massa. O autor através do uso combinado da primeira lei de Fick, para difusão gasosa binária, a lei de Fourier de condução de calor em um sólido e a forma modificada da equação de Clausius-Clapeyron, chega a uma equação de difusividade variável, onde a difusividade efetiva é uma função da temperatura e do conteúdo de umidade.

ZOGZAS e MARAOULIS (1996) examinaram os mesmos dados de secagem utilizando diferentes métodos de análises para estimar o coeficiente de difusividade. Modelos matemáticos detalhados e simplificados, incorporando a difusividade de umidade com o parâmetro destes modelos foram aplicados. Foi provado que existem diferenças significativas dos valores calculados da difusividade quando se usa diferentes modelos. Desta forma, a adoção de uma metodologia padronizada seria de grande importância na avaliação da difusividade efetiva. Foram aplicados quatro modelos alternativos sobre os dados de secagem de batata, cenoura e maçã. Ficou provada a dependência do coeficiente de difusão sobre o conteúdo de umidade no último período de secagem, enquanto a dependência da temperatura seguiu a relação de Arrhenius. Os efeitos da transferência de massa externa e do encolhimento durante a secagem, foram também analisados.

Uma simplificação nas condições de contorno da equação de transferência de massa durante a secagem de alimentos foi obtida por CÓRDOVA-QUEIROZ et al. (1996). Os autores introduziram uma distribuição constante média entre o alimento e a umidade do ar. Com esta simplificação uma solução analítica para a equação de transferência de massa com resistência interfacial foi encontrada e um número de Biot modificado foi proposto. A solução analítica para placa infinita foi comparada com a solução numérica sem a simplificação. A solução analítica mostrou uma boa aproximação com a solução numérica. A equação obtida pela solução analítica mostrou que para números de Biot maiores que trinta, a curva de

secagem torna-se independente do mesmo, o que significa não haver resistência ao transporte de massa na superfície. Curvas experimentais da secagem de cenoura foram obtidas para números de Biot entre 10 e 60. As curvas de experimentais não se diferenciaram estatisticamente para números de Biot maiores que 40, as quais aproximaram-se do mesmo limite predito pela solução analítica.

2.3.1. Coeficiente de difusão

O coeficiente de difusão ou difusividade efetiva é obtido mediante o ajuste das curvas calculadas com o modelo às curvas experimentais, baseado em um método de minimização de erros.

Diversos autores propõe para o coeficiente de difusão uma expressão inicial e então determinam as constantes da respectiva equação, sempre minimizando os erros entre os valores teóricos e experimentais da umidade em função do tempo (MISRA e YOUNG, 1980; SILVA e NEBRA, 1988; MULLET et al., 1989; TEIXEIRA, 1995). Esta forma de representação é mais frequente quando se considera uma dependência do coeficiente de difusão com alguma propriedade do produto durante a secagem, com o teor de umidade local, ou o teor de umidade inicial, ou a temperatura do produto. Alguns autores afirmam que a utilização de um coeficiente de difusão constante em vez de um coeficiente de difusão variável, resulta em modelos mais simples e com bom nível de precisão.

Quando correlações são feitas com os parâmetros do ar de secagem, os modelos são desenvolvidos considerando o coeficiente de difusão constante, para uma determinada condição de secagem. De forma que os valores obtidos do coeficiente de difusão são posteriormente correlacionados com os parâmetros referentes a cada condição do fluxo do ar de secagem, sendo muito frequente o uso de funções exponenciais, do tipo Arrhenius, para expressar a dependência do coeficiente de difusão com a temperatura. Este tipo de correlação foi desenvolvido por vários autores entre os quais, SUAREZ et al., 1980; MULLET et al., 1983; BERNA et al., 1990; VAGENAS e MARINOS-KOURIS, 1991c .

AGUERRE et al. (1985) apresentaram uma solução numérica da segunda Lei de Fick para o coeficiente de difusão dependente da concentração.

Para avaliar o efeito da difusão sobre a difusividade média de umidade em cenouras, RUIZ-CABRERA et al. (1997), obtiveram curvas de secagem para diferentes formas (fatias e cilindros) e temperaturas de 50, 60 e 70°C, levando em consideração o uso de um comprimento médio para as amostras de cenoura (espessura da fatia ou raio do cilindro). Os resultados encontrados por estes autores mostraram significativas diferenças entre as difusividades radial e axial médias. Diferenças significativas também foram observadas entre a difusividade central e a anular. As curvas experimentais não apresentaram evidências suficientes sobre o efeito da temperatura de secagem sobre a difusividade média de umidade.

2.3.2. Coeficiente convectivo de transferência de massa

Diversos autores por não concordarem com a consideração de que a superfície do material permanece em equilíbrio com o ar de secagem durante todo o processo, adotam um modelo onde se combina a difusão líquida internamente ao sólido com a evaporação superficial, o que significa a consideração de uma condição de contorno convectiva para a superfície do material em um conjunto de equações diferenciais (MISRA e YOUNG, 1980; KECHAOU e ROQUES, 1989; SERENO e MEDEIROS, 1990; VAGENAS e MARINOS-KOURIS, 1991a e 1991b).

Várias tentativas para a determinação do coeficiente convectivo de transferência de massa para materiais biológicos são relacionadas na literatura. Entre estas está o estudo de BALABAN (1989), que determinou o coeficiente convectivo de transferência de massa para filé de peixe, através de uma expressão para placa plana, com fluxo turbulento paralelo à superfície.

As analogias clássicas entre os fenômenos de transferência de calor e massa são também várias vezes utilizadas para determinação deste coeficiente convectivo.

Uma analogia entre transferência de calor e massa para leitos de esferas foi utilizada por MISRA e YOUNG (1980), onde conseguiram calcular o referido coeficiente, para grãos de soja.

SERENO e MEDEIROS (1990), da mesma forma, calcularam o coeficiente convectivo de transferência de massa durante a secagem de maçãs e cenouras, baseado em uma correlação para o coeficiente de transferência de calor.

Em estudos de secagem de uva, damasco, cenoura e batata, VAGENAS e MARINOS-KOURIS (1991b) também utilizaram uma correlação clássica para o cálculo dos referidos coeficientes convectivos como uma função da velocidade do ar de secagem.

Outra alternativa foi utilizada pelos mesmos autores em outro trabalho sobre a secagem de damascos (VAGENAS e MARINOS-KOURIS, 1991 a), a fim de se obter os valores do coeficiente convectivo de transferência de massa, bem como o coeficiente de difusão, ajustando os resultados obtidos da solução de seu modelo aos dados experimentais, pela minimização da soma do quadrado dos resíduos entre os pontos.

MAROULIS et al. (1991) estimaram os coeficientes de transferência de calor e massa ajustando um modelo matemático aos valores experimentais do teor de umidade e da temperatura do produto.

Outro modelo também baseado no princípio da transferência simultânea de calor e massa em secagem solar de frutas, considerando os efeitos da velocidade do ar, umidade relativa, espessura do produto e condução de calor, foi desenvolvido por SODHA et al. (1985).

3.MATERIAL E MÉTODOS

Esta etapa do presente trabalho foi realizada no Laboratório de Secagem da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI / UNICAMP).

Para a realização desta pesquisa foram utilizadas tâmaras 'in natura' da variedade Zahidi, cultivadas no Centro de Pesquisa do Trópico Semi-Árido (CPATSA), EMBRAPA, de Petrolina-PE.

As tâmaras foram colhidas no estádio Kalal e enviadas ao Laboratório de Medidas Físicas da Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA / UNICAMP), onde foram mantidas congeladas, até se dar início ao processo de secagem. Após descongeladas, as tâmaras atingiam um estádio intermediário entre o Kalal e o Rutab. A partir daí deu-se início a secagem das tâmaras.

3.1. Curvas de Secagem

O conjunto utilizado no experimento consistiu de:

- secador vertical convectivo;
- balança analítica Mettler modelo PC400;
- psicromômetro;
- anemômetro;
- controlador de temperatura;
- estufa à vácuo;
- registrador de temperatura;
- sílica gel

O experimento consistiu basicamente em se medir a evolução do teor de água das tâmaras submetidas a secagem, em um secador vertical convectivo com condições controladas para três níveis de temperatura, 60, 70 e 80 °C , e três níveis de velocidade do ar, 0,5, 1,0 e 1,5 m/s.

O secador utilizado era munido de gavetas com portas de acrílico para melhor visualização do processo. A temperatura no interior do secador foi controlada pelo conjunto termopar-disjuntor termo-magnético-controlador de temperatura. Os níveis de velocidade do ar foram mantidos pelo seletor do condicionador de ar. Na última gaveta do secador foi colocado um leito de sílica-gel, a fim de manter o ar desumidificado. Utilizando um anemômetro foram feitas medidas da velocidade do ar em três pontos perpendiculares ao fluxo de ar, obtendo-se a velocidade média do ar de secagem.

As tâmaras foram colocadas inteiras e em duplicata nas gavetas do secador, onde o fluxo passava verticalmente por elas, retornando ao ventilador em um sistema de circuito fechado.

Um psicrômetro foi colocado no interior do secador para se obter as leituras das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ambiente de secagem.

A quantidade de água perdida durante a secagem foi obtido por pesagem das amostras. O esquema de pesagem seguiu intervalos de tempo de 1 hora até o final do processo. Em seguida as amostras eram colocadas em estufa à vácuo na temperatura de $65 \pm 1^\circ \text{C}$ e pressão atmosférica inferior a 60 mm Hg por 48 horas, segundo metodologia fornecida pela AOAC (1984), para determinação da massa seca.

3.2. Tratamento matemático

3.2.1. Modelo Difusional

Pela segunda Lei de Fick supõe-se que a migração de água do material ocorre por difusão.

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

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (4.11)$$

ARPACI (1966) apresenta uma solução analítica para a equação (4.11) no caso em que ocorre secagem apenas pela superfície externa do material com geometria cilíndrica. Neste caso, o perfil de umidade resulta em:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = 2Bi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\lambda_n^2 t} J_0(\lambda_n r)}{(\lambda_n R) J_1(\lambda_n R)} \quad (4.12)$$

com as seguintes condições iniciais e de contorno:

C.I. : $X(r, 0) = X_o$

C.C.1 : $X(0, t) = \text{finito}$

C.C.2 : $X(R, t) = X_e$

Na equação (4.12) admite-se que:

- o produto é homogêneo, tem forma simples e simétrica;
- as dimensões do produto permanecem inalteradas ao longo do tempo;
- a superfície do produto entra imediatamente em equilíbrio com o ar de secagem;
- a existência de um gradiente de teor de água dentro da partícula resulta no movimento de água;
- a umidade de equilíbrio é obtida 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 massa.

A solução da equação baseada na teoria de difusão líquida (eq. 4.12) com 5 termos da função de Bessel foi ajustada aos valores experimentais. A determinação dos coeficientes da equação foi feita por regressão não linear utilizando o programa STATISTICA 5.0.

Para o cálculo da umidade de equilíbrio das tâmaras foram utilizadas curvas de sorção de umidade conforme apresentado no capítulo 2, onde os

melhores ajustes conseguidos para tais curvas foram pelas equações de BET e GAB, com maiores coeficientes de determinação e menores erros relativos calculados.

Da mesma forma, a solução analítica da equação de difusão para materiais com geometria esférica, apresentada por ARPACI (1966), foi também utilizada no presente estudo com o intuito de se verificar a influência das simplificações da geometria na obtenção das difusividades efetivas.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (4.13)$$

com as seguintes condições iniciais e de contorno:

$$\text{C.C.I. : } X(r,0) = X_0$$

$$\text{C.C.1 : } X(0,t) = \text{finito}$$

$$\text{C.C.2: } X(R,t) = X_e$$

Para esfera o perfil de umidade é dado por:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = 2Bi \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin \lambda_n R - \lambda_n R \cos \lambda_n R}{\lambda_n R - \sin \lambda_n R \cos \lambda_n R} \right) e^{-a \lambda_n^2 t} \frac{\sin \lambda_n r}{\lambda_n r} \quad (4.14)$$

3.2.2. Modelo Difusional com encolhimento

Conforme sugerido por PARK (1987) a determinação do coeficiente de difusão considerando a existência do encolhimento do material, foi feita substituindo o termo do adimensional do conteúdo de umidade pelo adimensional de concentração de umidade.

-para geometria cilíndrica:

$$\frac{C - C_e}{C_0 - C_e} = 2Bi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-a \lambda_n^2 t} J_0(\lambda_n r)}{(\lambda_n R) J_1(\lambda_n R)} \quad (4.15)$$

-para geometria esférica:

$$\frac{C - C_e}{C_o - C_e} = 2Bi \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin \lambda_n R - \lambda_n R \cos \lambda_n R}{\lambda_n R - \sin \lambda_n R \cos \lambda_n R} \right) e^{-a \lambda_n^2 t} \frac{\sin \lambda_n r}{\lambda_n r} \quad (4.16)$$

Onde:

C= umidade em base seca por volume (g de água/g sólidos secos .m³)

Ce= umidade de equilíbrio em base seca por volume (g de água/g sólidos secos. m³)

Co= umidade inicial em base seca por volume (g de água/g sólidos secos. m³)

Segundo PARK (1987) os melhores resultados são obtidos quando se utiliza a dimensão característica média, no caso, o raio médio das tâmaras. Desta forma foi determinado o volume das tâmaras pelos valores de massa e densidade obtidos no decorrer de cada secagem (Apêndice 3). Este volume foi correlacionado com o teor de umidade, tornando possível calcular o primeiro termo das equações (4.15) e (4.16). Utilizando o raio médio das amostras, foi feito o ajuste dos dados experimentais às equações. A determinação dos coeficientes destas foi feita por regressão não linear (STATISTICA 5.0).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de cada etapa desta pesquisa com a cinética de secagem são descritos a seguir.

4.1. Curvas de Secagem

Os dados de secagem de tâmaras obtidos experimentalmente e as razões de umidade correspondentes são apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

Várias pesquisas em secagem de alimentos consideram a temperatura do ar de secagem como o parâmetro de maior influência na cinética e na qualidade do produto final. Nas Figuras 4.1 a 4.6, tem-se as curvas de secagem obtidas à três níveis de velocidade do ar (0,5, 1,0 e 1,5 m/s), para diferentes temperaturas (60, 70 e 80 °C), aonde tem-se na abscissa o tempo de secagem expresso em horas e na ordenada a umidade adimensional. Estas curvas de secagem mostram, que para um mesmo tempo de processo, quanto maior for a temperatura do ar, maior é a perda de umidade do produto.

Fixando-se a temperatura e variando a velocidade do ar (0,5, 1,0, 1,5 m/s), pode-se analisar a influência destas velocidades nas curvas de secagem de tâmaras, conforme é visto nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3. Observa-se um pequeno aumento na perda de água das tâmaras, quando se trabalha com valores de velocidade maiores (1,5 m/s). Desta forma, pode-se considerar que a velocidade do ar de secagem tem um pequeno efeito sobre as curvas de secagem, de modo a se poder dizer que esta variável tem menor importância, à medida que o controle da velocidade de secagem cresce pela difusão de calor e massa. O mesmo comportamento foi observado durante o estudo da secagem de milho super doce (YOSHIDA, 1997).

Tabela 4.1. Dados das curvas de secagem de tâmaras na temperatura de 60 °C e velocidades do ar de 0,5, 1.0 e 1.5 m/s

t (h)	velocidade 0,5 m/s		velocidade 1,0 m/s		velocidade 1,5 m/s	
	X	(X-Xe)/(Xo-Xe)	X	(X-Xe)/(Xo-Xe)	X	(X-Xe)/(Xo-Xe)
0	89,00	1,0000	70,07	1,0000	86,24	1,0000
1	86,08	0,9620	66,97	0,9456	82,01	0,9424
2	82,01	0,9089	63,87	0,8915	78,02	0,8907
3	79,21	0,8725	60,68	0,8356	74,48	0,8403
4	75,90	0,8294	57,50	0,7800	71,02	0,7933
5	72,50	0,7850	54,32	0,7243	67,67	0,7477
6	69,38	0,7443	51,45	0,6741	63,96	0,6974
7	65,88	0,6988	48,43	0,6212	60,24	0,6469
8	62,73	0,6577	45,87	0,5765	56,88	0,6012
9	59,50	0,6157	43,40	0,5331	53,35	0,5533
10	56,35	0,5746	40,83	0,4883	49,80	0,5051
11	53,60	0,5388	38,44	0,4463	47,23	0,4702
12	50,85	0,5029	36,35	0,4099	44,67	0,4354

Tabela 4.2. Dados das curvas de secagem de tâmaras na temperatura de 70 °C e velocidades do ar de 0,5, 1.0 e 1.5 m/s

t (h)	velocidade 0,5 m/s		velocidade 1,0 m/s		velocidade 1,5 m/s	
	X	(X-Xe)/(Xo-Xe)	X	(X-Xe)/(Xo-Xe)	X	(X-Xe)/(Xo-Xe)
0	193,85	1,0000	137,32	1,0000	104,04	1,0000
1	182,12	0,8520	129,48	0,9426	94,29	0,9056
2	167,88	0,6930	119,26	0,8678	85,25	0,8181
3	153,91	0,558	110,17	0,8013	77,05	0,7387
4	140,50	0,443	102,78	0,7471	-	-
5	128,49	0,348	92,95	0,6749	61,19	0,5853
6	114,80	0,271	83,54	0,6063	54,15	0,5173
7	102,23	0,209	74,24	0,5382	47,48	0,4525
8	87,71	0,166	64,87	0,4696	41,71	0,3967
9	74,58	0,137	57,77	0,4176	36,90	0,3501
10	64,53	0,108	50,97	0,3678	32,09	0,3035
11	53,07	0,092	43,97	0,3166	28,25	0,2664
12	36,21	0,080	39,16	0,2814	24,68	0,2318
13	-	-	31,57	0,2258	19,98	0,1863
14	-	-	27,56	0,1964	17,20	0,1595
15	-	-	24,34	0,1729	15,23	0,1403

Tabela 4.3. Dados das curvas de secagem de tâmaras na temperatura de 80 °C e velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s

t (h)	velocidade 0,5 m/s		velocidade 1,0 m/s		velocidade 1,5 m/s	
	X	(X-Xe)/(Xo-Xe)	X	(X-Xe)/(Xo-Xe)	X	(X-Xe)/(Xo-Xe)
0	145,55	1,0000	160,51	1,0000	137,50	1,0000
1	124,09	0,8519	128,81	0,8017	111,17	0,8076
2	101,00	0,6926	103,74	0,6448	87,09	0,6317
3	81,43	0,5576	79,29	0,4919	67,79	0,4906
4	64,74	0,4425	61,02	0,3775	51,14	0,3690
5	50,97	0,3475	45,98	0,2834	38,35	0,2755
6	39,86	0,2709	35,48	0,2177	28,48	0,2034
7	30,91	0,2091	27,17	0,1657	21,81	0,1547
8	24,67	0,1661	21,80	0,1321	17,24	0,1213
9	20,38	0,1365	18,06	0,1087	13,78	0,0960
10	16,20	0,1076	13,37	0,0794	11,14	0,0767
11	13,93	0,0919	11,69	0,0689	9,69	0,0661
12	12,13	0,0795	8,21	0,0471	7,32	0,0488

A umidade relativa é um parâmetro importante no estudo de processos de secagem. Para uma mesma temperatura o valor da umidade relativa não varia com a velocidade do ar. A tabela seguinte mostra os valores médios de umidade relativa dentro do secador, obtidos através de leitura dos termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido.

Tabela 4.4. Valores de UR no interior do secador em função da temperatura e velocidade do ar de secagem.

temperatura (°C)	velocidade (m/s)	UR (%)
60	0,5	11,59
60	1,0	11,59
60	1,5	11,59
70	0,5	8,55
70	1,0	8,55
70	1,5	8,55
80	0,5	6,66
80	1,0	6,66
80	1,5	6,66

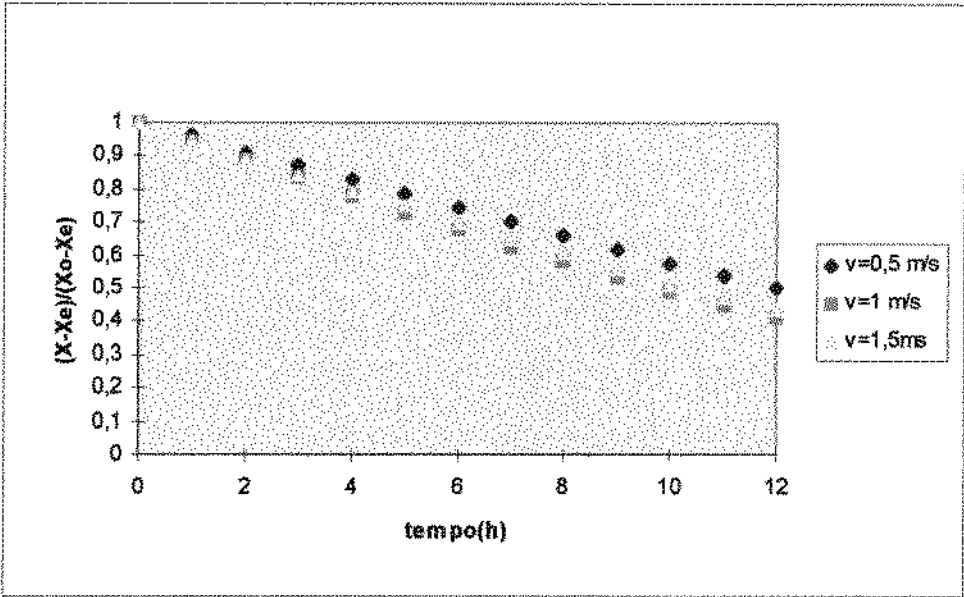


Figura 4.1. Efeito da velocidade do ar de secagem sobre a umidade das tâmaras na temperatura de 60 °C

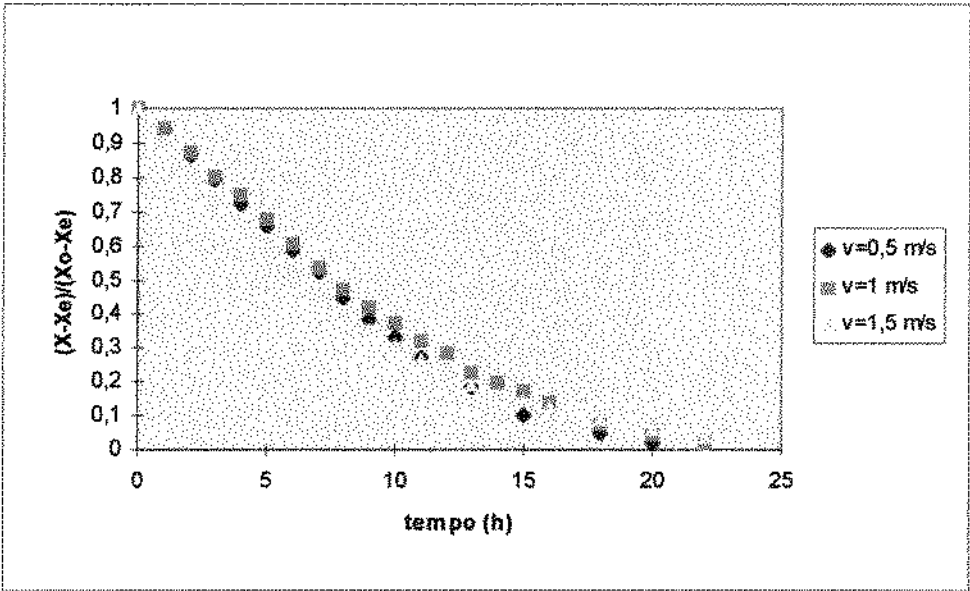


Figura 4.2. Efeito da velocidade do ar de secagem sobre a umidade das tâmaras na temperatura de 70 °C

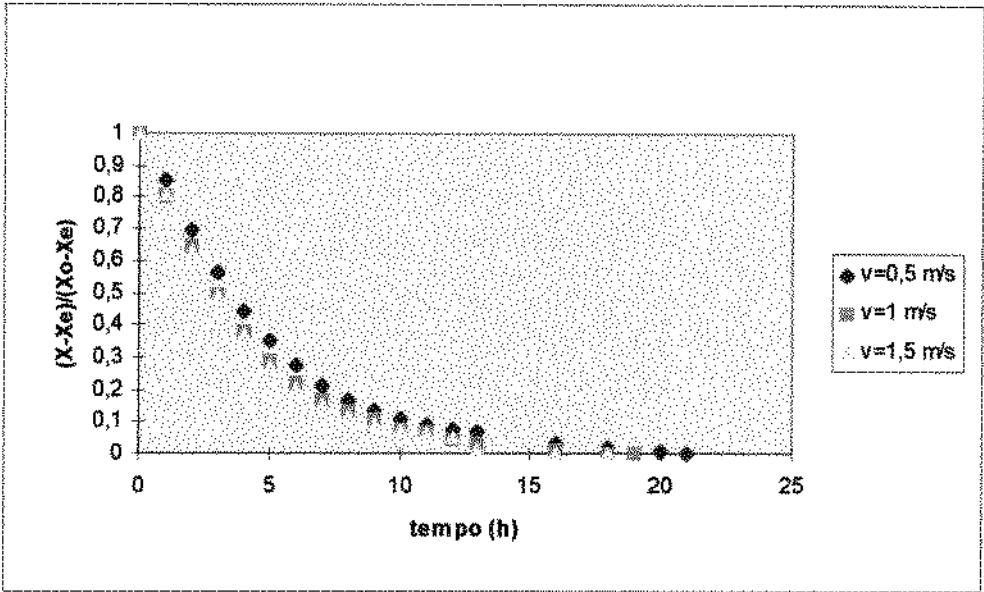


Figura 4.3. Efeito da velocidade do ar de secagem sobre a umidade das tâmaras na temperatura de 80 °C

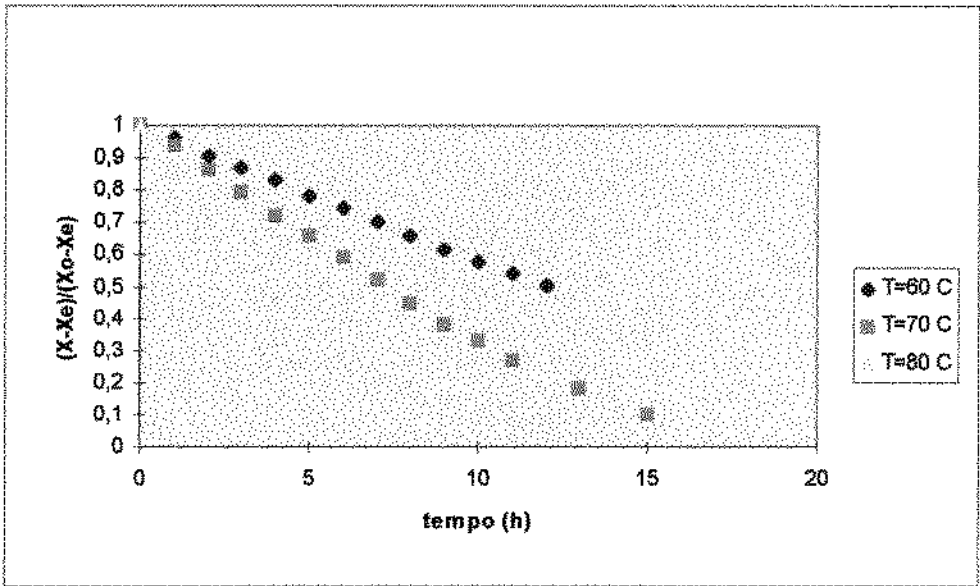


Figura 4.4. Efeito da temperatura sobre a umidade das tâmaras com velocidade do ar de secagem de 0,5 m/s nas temperaturas de 60, 70 e 80°C

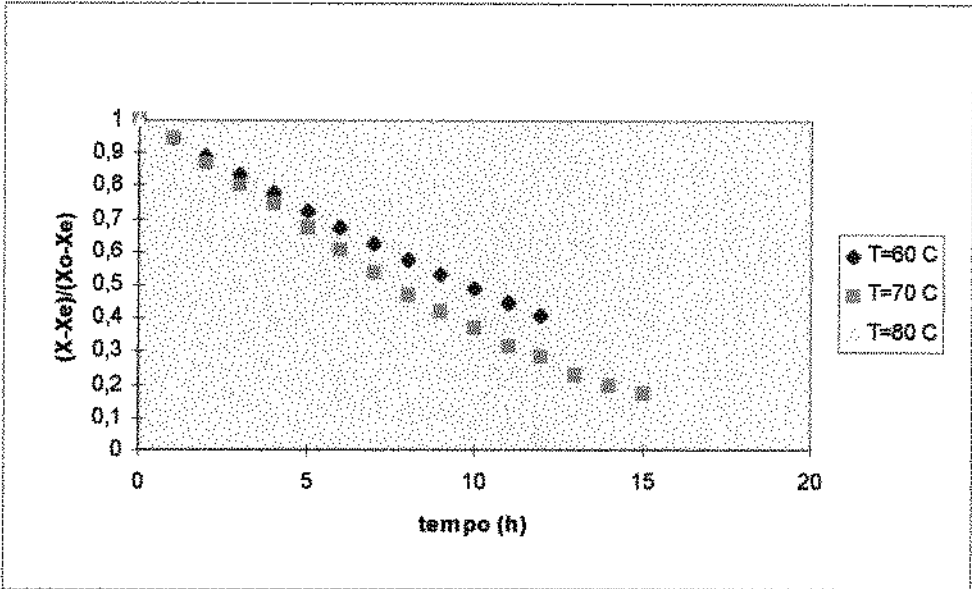


Figura 4.5. Efeito da temperatura sobre a umidade das tâmaras com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s nas temperaturas de 60, 70 e 80°C

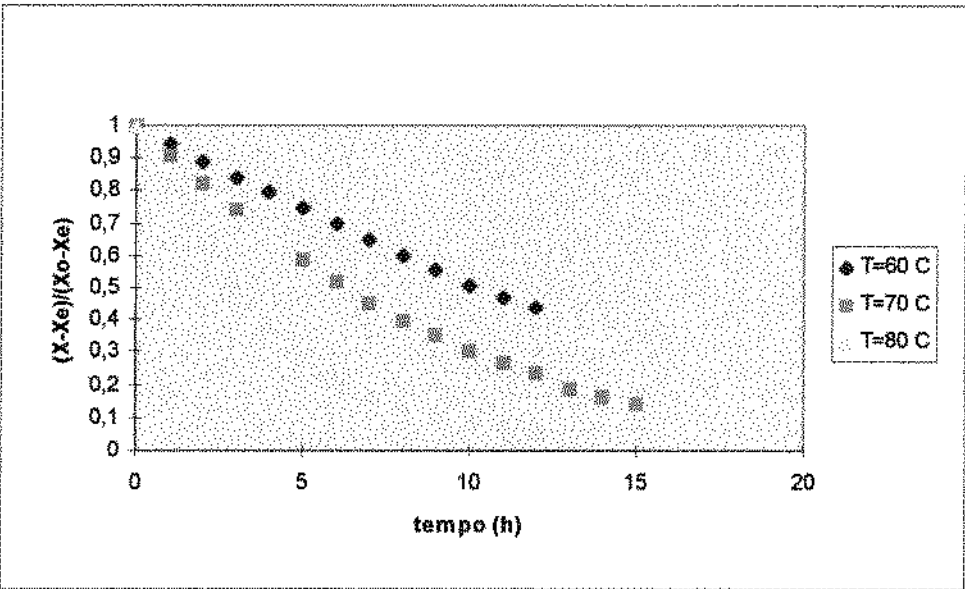


Figura 4.6. Efeito da temperatura sobre a umidade das tâmaras com velocidade do ar de secagem de 1,5 m/s nas temperaturas de 60, 70 e 80°C

4.2. Modelo Difusional

A difusividade efetiva foi calculada através de ajuste não linear dos resultados obtidos, a solução analítica das equações de transferência de massa no interior de uma esfera e no interior de um cilindro.

4.2.1. Modelo Difusional para geometria esférica

Os valores de difusividade de tâmaras, da variedade Zahidi, obtidos por ajuste das curvas de secagem a equação difusional para materiais de superfície esférica, são apresentados nas Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7, relativas as temperaturas de 60, 70 e 80 °C. As Figuras relacionadas a tais ajustes encontram-se no Apêndice 4, sendo destacadas no texto os ajustes feitos entres as curvas experimentais e o modelo difusional para a velocidade do ar de secagem de 1,5 m/s (Figuras 4.7, 4.8, 4.9).

Tabela 4.5. Valores de difusividade efetiva (T=60 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria esférica

velocidade do ar (m/s)	difusividade efetiva (m ² /s)	r	erro relativo (%)
0,5	1,24 . 10 ⁻⁷	0,97	3,87
1,0	1,61 . 10 ⁻⁷	0,97	4,89
1,5	1,51 . 10 ⁻⁷	0,97	4,64

Tabela 4.6. Valores de difusividade efetiva (T=70 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria esférica

velocidade do ar (m/s)	difusividade efetiva (m ² /s)	r	erro relativo (%)
0,5	4,25 . 10 ⁻⁷	0,94	19,76
1,0	2,91 . 10 ⁻⁷	0,97	11,56
1,5	2,71 . 10 ⁻⁶	0,98	11,62

Tabela 4.7. Valores de difusividade efetiva (T=80 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria esférica

velocidade do ar (m/s)	difusividade efetiva (m ² /s)	r	erro relativo (%)
0,5	4,63 . 10 ⁻⁷	0,96	22,15
1,0	5,28 . 10 ⁻⁷	0,96	24,46
1,5	5,39 . 10 ⁻⁷	0,96	26,85

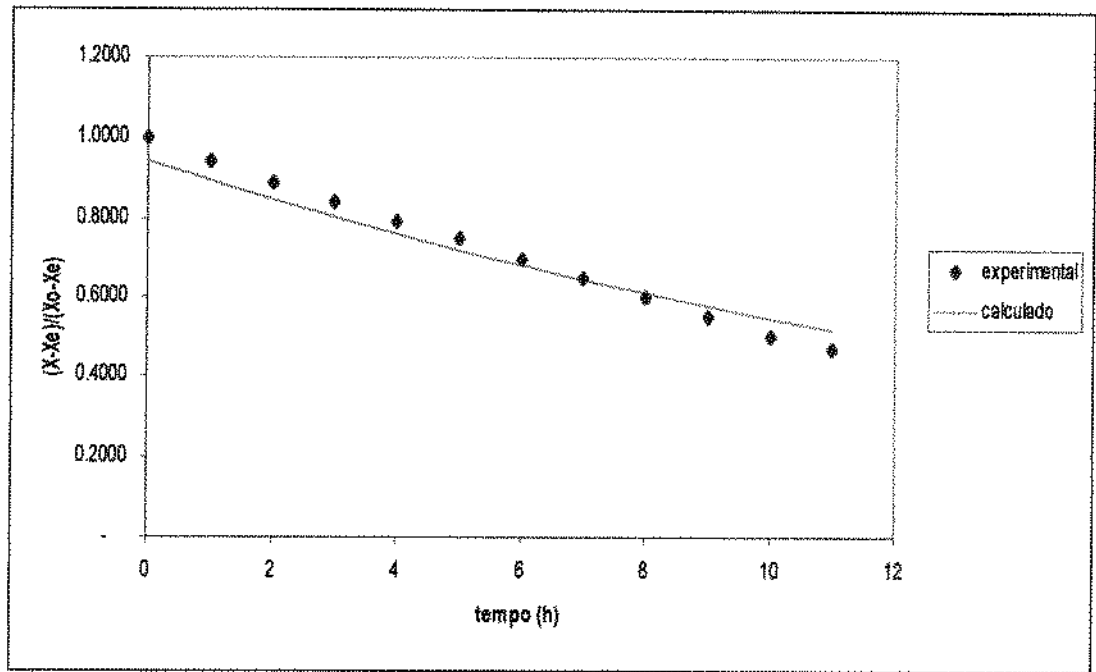


Figura 4.7. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica (T=60 °C v=1,5 m/s)

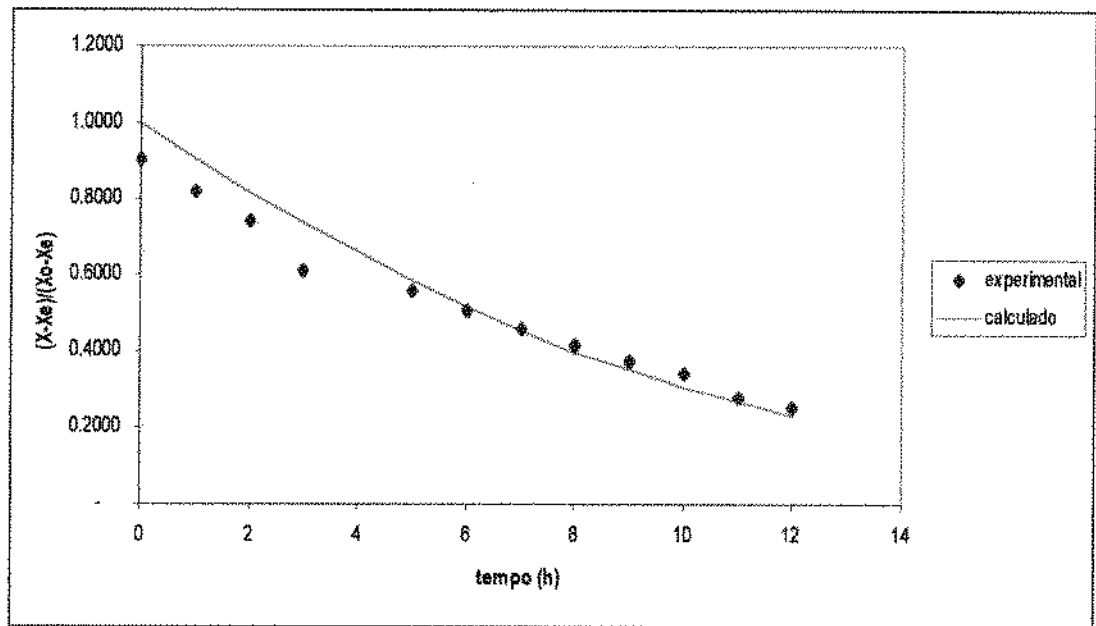


Figura 4.8. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica (T=70 °C v=1,5 m/s)

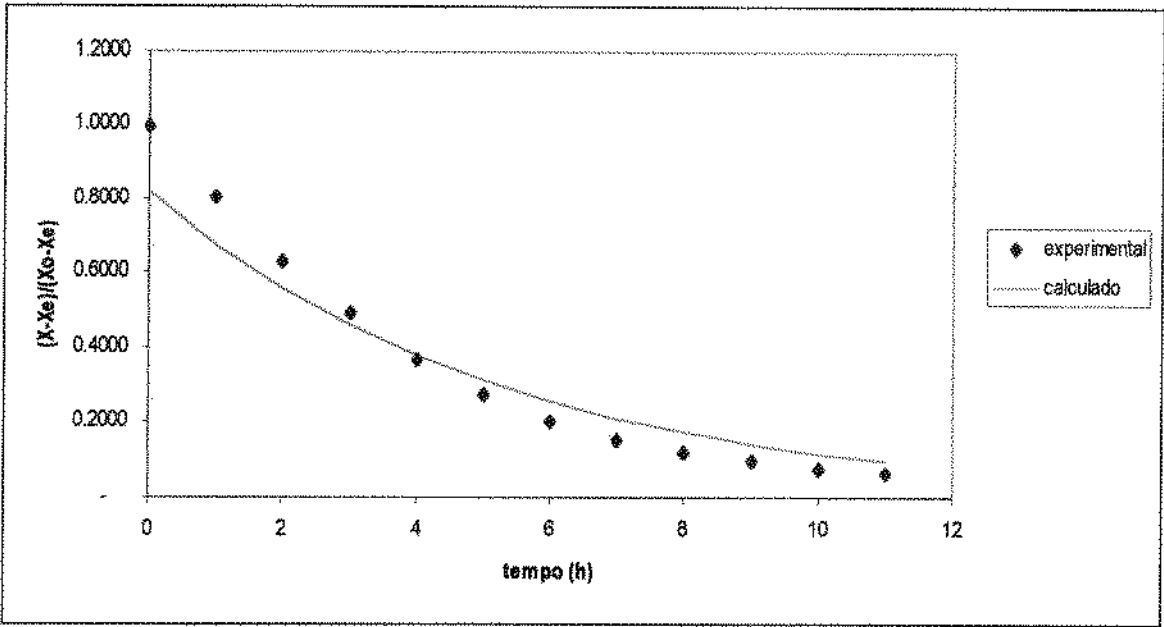


Figura 4.9. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica (T=80 °C v=1,5 m/s)

4.2.2. Modelo Difusional para geometria cilíndrica

As Tabelas 4.8, 4.9, 4.10 relacionam os valores encontrados para a difusividade de umidade interna de tâmaras, obtidas por ajuste não linear das curvas de secagem a equação de difusão para cilindro infinito (eq. 4.12).

Tabela 4.8. Valores de difusividade efetiva (T=60 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria cilíndrica

velocidade do ar (m/s)	difusividade efetiva (m²/s)	r	erro relativo (%)
0,5	1,02 . 10 ⁻⁷	0,99	0,64
1,0	1,23 . 10 ⁻⁷	0,99	0,61
1,5	1,04 . 10 ⁻⁷	0,99	0,94

Tabela 4.9. Valores de difusividade efetiva (T=70 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria cilíndrica

velocidade do ar (m/s)	difusividade efetiva (m ² /s)	r	erro relativo (%)
0,5	3,48 . 10 ⁻⁷	0,99	3,22
1,0	1,73 . 10 ⁻⁷	0,99	7,39
1,5	1,46 . 10 ⁻⁷	0,99	3,56

Tabela 4.10. Valores de difusividade efetiva (T=80 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria cilíndrica

velocidade do ar (m/s)	difusividade efetiva (m ² /s)	r	erro relativo (%)
0,5	3,18 . 10 ⁻⁷	0,99	3,20
1,0	3,32 . 10 ⁻⁷	0,99	2,63
1,5	4,52 . 10 ⁻⁷	0,99	4,57

Analisando os valores encontrados nos ajustes da esfera e do cilindro, para o coeficiente de correlação e erro relativo, verifica-se que as curvas do adimensional de umidade ajustaram-se melhor ao modelo difusional do cilindro, demonstrando que simplificações da forma geométrica causam erros maiores na avaliação da cinética de secagem das tâmaras. Este fato pode ser melhor visualizado através das Figuras 4.7 a 4.9 (ajuste da esfera) e 4.10 a 4.18 (ajuste do cilindro).

O número de Biot foi outra variável a se considerar em relação a estes ajustes. Para esfera o valor de Biot encontrado foi muito baixo (Bi=0,001), já no caso do cilindro (Bi=2,0), sendo este valor bem mais confiável em estudos de transferência de massa.

Verificando os valores de difusividade efetiva nas Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10, pode-se destacar que a temperatura de 80 ° C e velocidade de 1,5 m/s apresentou o maior valor de difusividade efetiva.

Analisando os valores de difusividade para cada temperatura, verificou-se que esta algumas vezes aumenta ou diminui com o aumento da velocidade do ar. Portanto iniciou-se uma análise das difusividades efetivas com relação a variação de temperatura e variação de velocidade.

As variações nas difusividades em função da velocidade do ar para cada temperatura, são mostrados na Tabela 4.11, e foram calculados segundo a equação:

$$Dv= ((Dv_2 - Dv_1)/Dv_1) .100$$

(4.17)

onde

Dv= variação na difusividade em função da velocidade do ar

Dv₁ = valor da difusividade correspondente à velocidade menor

Dv₂ = valor da difusividade correspondente à velocidade maior

Tabela 4.11. Porcentagem de variação da difusividade efetiva devido à variação de velocidade

Temperatura (°C)	variação da D _{ef} em v 0,5 a 1,0 m/s	variação da D _{ef} em v 1,0 a 1,5 m/s	variação da D _{ef} em v 0,5 a 1,5 m/s
60	20,94	-15,48	2,21
70	-50,14	-15,63	-57,94
80	4,55	36,19	42,14

As variações nas difusividades em função da temperatura para cada velocidade são mostrados na Tabela 4.21, e foram calculados segundo a equação:

$$D_T= ((D_{T2} - D_{T1})/ D_{T1}) .100$$

(4.18)

Onde

D_T= variação na difusividade em função da temperatura

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

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

Tabela 4.12. Porcentagem de variação da difusividade efetiva devido à variação de temperatura

velocidade (m/s)	variação da D_{ef} em T 60 a 70 °C	variação da D_{ef} em T 70 a 80 °C	variação da D_{ef} em T 60 a 80 °C
0,5	241,18	-8,54	212,01
1,0	40,63	91,85	169,73
1,5	40,38	209,07	333,90

Pela Tabela 4.11 nota-se que a mudança na velocidade do ar de 0,5 m/s para 1,0 m/s, para a temperatura igual a 60 ° C, proporciona um aumento na difusividade efetiva. Entretanto para 70 ° C o inverso ocorreu nesta mesma faixa de velocidade. A 80 ° C, passando-se a velocidade de 0,5 m/s para 1,0 m/s , aumenta-se a difusividade efetiva. Estas variações podem estar relacionadas aos efeitos colaterais do fenômeno de secagem.

Quando a velocidade passa de 1,0 para 1,5 m/s as variações nas temperaturas de 60 e 70 ° C são negativos e praticamente não diferem, mostrando um decréscimo na difusividade efetiva. Para 80 ° C há um significativo aumento de difusividade com a mudança da velocidade de secagem de 1,0 para 1,5 m/s.

Analisando o processo quando a velocidade passa de 0,5 m/s para 1,5m/s, verifica-se que a maior variação na difusividade efetiva foi para a temperatura de 80° C. Na situação de 70 ° C houve um decréscimo da difusividade ao passar a velocidade de 0,5 para 1,5 m/s.

De acordo com PARK (1998) o aumento da velocidade do ar de secagem deveria causar um aumento na taxa de secagem . Este efeito não foi observado quando se analisou os valores de difusividade efetiva obtidos sem encolhimento.

Pela Tabela 4.12 analisando a variação da difusividade em função do aumento da temperatura para uma dada velocidade, nota-se um decréscimo para a velocidade de 0,5 m/s quando a temperatura muda de 70°C para 80 ° C. A maior variação aconteceu para 1,5 m/s quando a temperatura passa de 60° C para 80° C,

que são os pontos extremos das condições de secagem. Quando a velocidade passa de 1,0 para 1,5 m/s, as variações da difusividade nas temperaturas de 60 ° C e 70 °C, são negativas ou praticamente não variam. Quando a temperatura passa de 70 para 80 ° C ocorre um aumento nas difusividades relacionadas às velocidades de 1,0 e 1,5 m/s, sendo porém este aumento bem mais significativo para a velocidade de 1,5 m/s. Na faixa de temperatura de 60 a 80 ° C, a difusividade efetiva aumenta para os três níveis de velocidade do ar de secagem analisados.

Analisando simultaneamente as Tabelas 4.11 e 4.12 observou-se que a temperatura do ar de secagem quase sempre proporciona um incremento na difisividade, exceto para a faixa de temperatura que varia de 70 para 80 ° C na velocidade de 0,5 m/s. Esta aparente diminuição na difusividade poderia ser provocada pelo encolhimento e ser explicada pelo endurecimento da superfície do produto que está sendo seco.

Quando se analisa o efeito da velocidade do ar, o comportamento de diminuição da difusividade efetiva se acentua com o aumento da velocidade do ar.

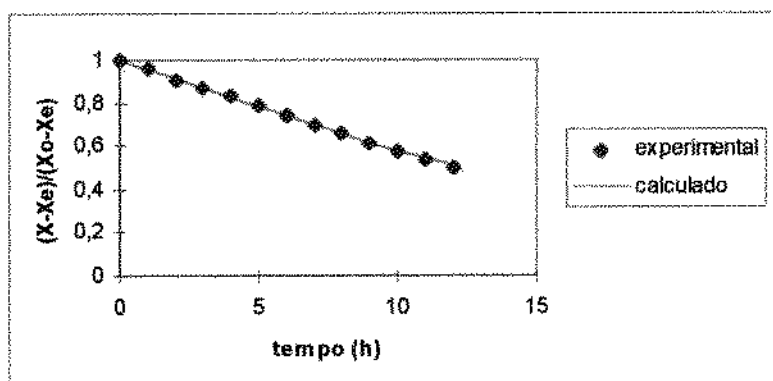


Figura 4.10. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T=60 °C v=0,5 m/s)

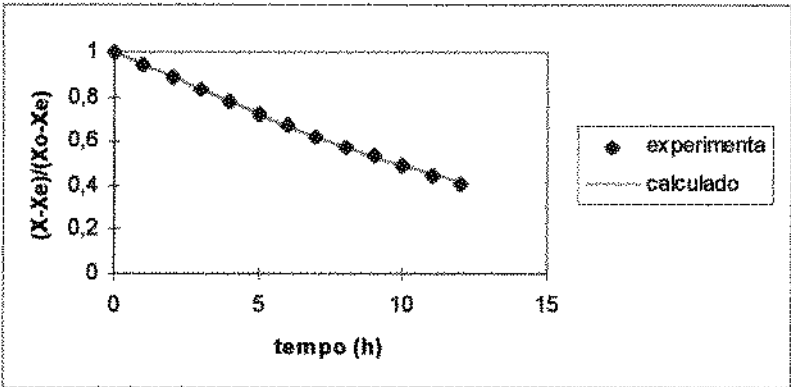


Figura 4.11. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T=60 °C v=1,0 m/s)

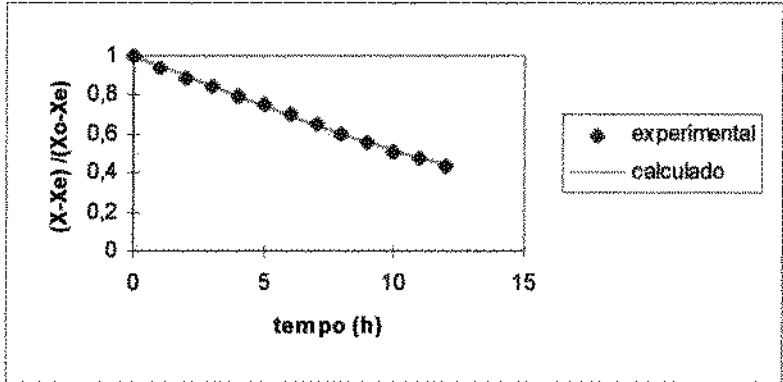


Figura 4.12. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T=60 °C v=1,5 m/s)

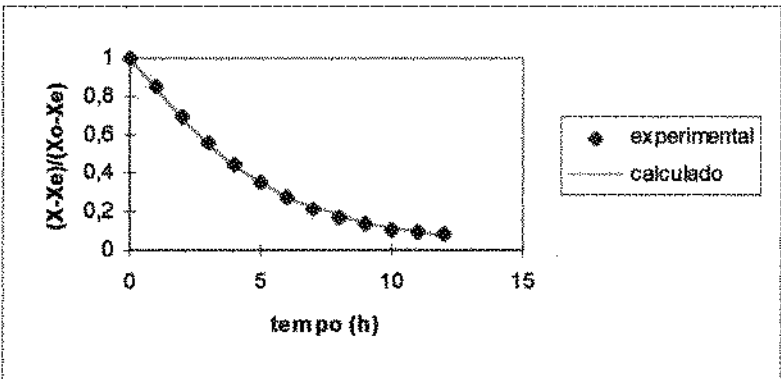


Figura 4.13. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T=70 °C v=0,5 m/s)

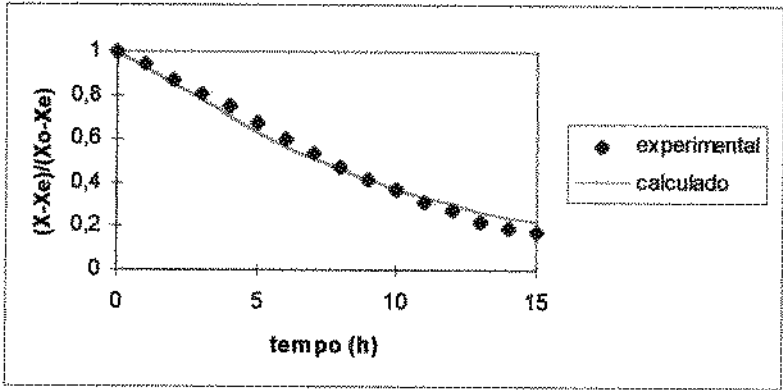


Figura 4.14. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T=70 °C v=1,0 m/s)

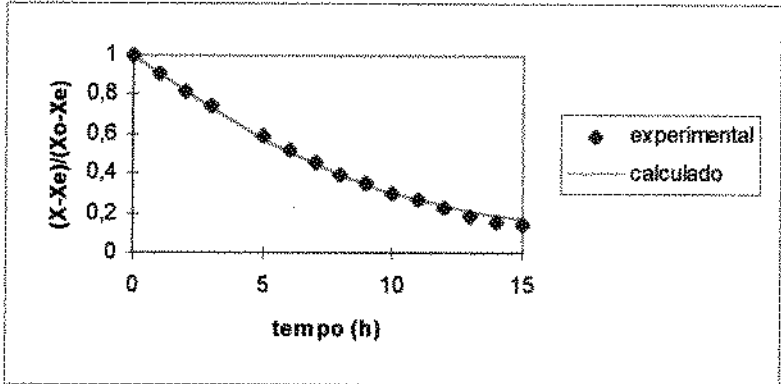


Figura 4.15. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T=70 °C v=1,5 m/s)

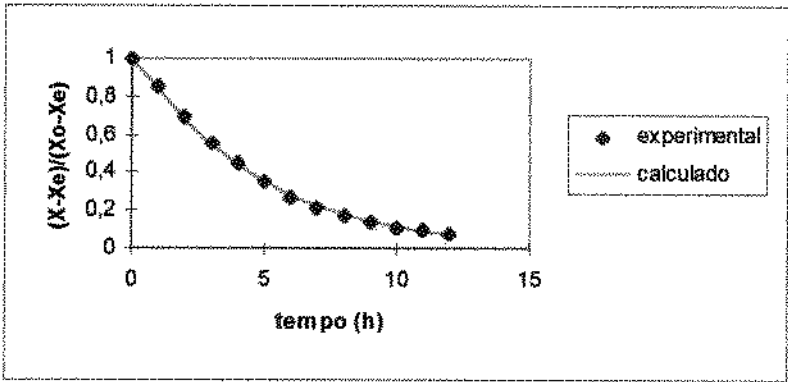


Figura 4.16. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T=80 °C v=0,5 m/s)

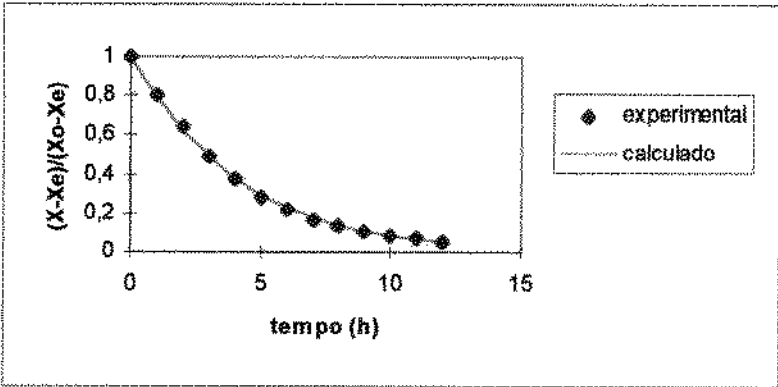


Figura 4.17. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T=80 °C v=1,0 m/s)

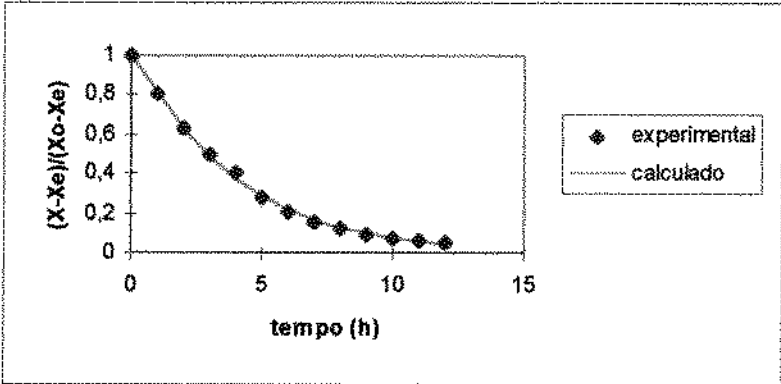


Figura 4.18. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria cilíndrica (T=80 °C v=1,5 m/s)

4.3. Modelo Difusional com encolhimento

Na tentativa de encontrar valores da difusividade efetiva que pudessem expressar melhor o processo real, com encolhimento, foi aplicado o método de regressão não linear, conforme já mencionado, ao modelo difusional utilizando raio médio das amostras, e aos dados de concentração de umidade os quais são apresentados nas Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15.

Tabela 4.13. Dados de concentração de umidade de tâmaras na temperatura de 60 °C e velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s

t (h)	velocidade 0,5 m/s		velocidade 1,0 m/s		velocidade 1,5 m/s	
	C	(C-Ce)/(Co-Ce)	C	(C-Ce)/(Co-Ce)	C	(C-Ce)/(Co-Ce)
0	0,0784	1,0000	0,0604	1,0000	0,0804	1,0000
1	0,0800	0,9742	0,0581	0,9738	0,0777	0,9699
2	0,0796	0,9374	0,0558	0,9467	0,0753	0,9417
3	0,0795	0,9113	0,0535	0,9177	0,0728	0,9132
4	0,0781	0,8795	0,0514	0,8876	0,0704	0,8858
5	0,0758	0,8459	0,0493	0,8662	0,0682	0,8583
6	0,0733	0,8141	0,0475	0,8267	0,0654	0,8267
7	0,0700	0,7774	0,0456	0,7943	0,0627	0,7939
8	0,6692	0,7434	0,0442	0,7659	0,0603	0,7630
9	0,0637	0,7074	0,0429	0,7374	0,0577	0,7294
10	0,0606	0,6213	0,0415	0,7068	0,0552	0,6943
11	0,0582	0,6387	0,0404	0,6771	0,0537	0,6681
12	0,0560	0,6054	0,0396	0,6505	0,0523	0,6411

Tabela 4.14. Dados de concentração de umidade de tâmaras na temperatura de 70 °C e velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s

t (h)	velocidade 0,5 m/s		velocidade 1,0 m/s		velocidade 1,5 m/s	
	C	(C-Ce)/(Co-Ce)	C	(C-Ce)/(Co-Ce)	C	(C-Ce)/(Co-Ce)
0	0,1660	1,0000	0,1266	1,0000	0,1041	1,0000
1	0,1661	0,9794	0,1201	0,9731	0,0948	0,9355
2	0,1542	0,9519	0,1124	0,9352	0,0867	0,8718
3	0,1481	0,9218	0,1064	0,8986	0,0798	0,8105
4	0,1424	0,8896	0,1024	0,8666	-	-
5	0,1379	0,8573	0,0962	0,8204	0,0666	0,6810
6	0,1311	0,8161	0,0903	0,7721	0,0608	0,6183
7	0,1244	0,7731	0,0841	0,7194	0,0552	0,5556
8	0,1139	0,7159	0,0769	0,6608	0,0501	0,4987
9	0,1030	0,6556	0,0718	0,6121	0,0458	0,4491
10	0,0943	0,6027	0,0661	0,5615	0,0411	0,3975
11	0,0814	0,5335	0,0591	0,5049	0,0372	0,3547
12	0,0583	0,4986	0,0539	0,4630	0,0332	0,3137
13	-	-	0,0441	0,3912	0,0273	0,2576
14	-	-	0,0382	0,3502	0,0236	0,2233
15	-	-	0,0329	0,3155	0,0207	0,1984

Tabela 4.15. Dados de concentração de umidade de tâmaras na temperatura de 80 °C e velocidades do ar de 0.5, 1.0 e 1.5 m/s

t (h)	velocidade 0,5 m/s		velocidade 1,0 m/s		velocidade 1,5 m/s	
	C	(C-Ce)/(Co-Ce)	C	(C-Ce)/(Co-Ce)	C	(C-Ce)/(Co-Ce)
0	0,1407	1,0000	0,1750	1,0000	0,1732	1,0000
1	0,1277	0,9064	0,1475	0,8567	0,515	0,8535
2	0,1102	0,7915	0,1248	0,7289	0,1268	0,7045
3	0,0936	0,6801	0,1000	0,5895	0,1039	0,5731
4	0,0781	0,5729	0,0806	0,4743	0,0815	0,4497
5	0,0642	0,4743	0,0634	0,3713	0,0627	0,3480
6	0,0522	0,3870	0,0508	0,2945	0,0473	0,2650
7	0,0419	0,3110	0,0402	0,2306	0,0365	0,2065
8	0,0345	0,2547	0,0330	0,1878	0,0289	0,1652
9	0,0294	0,2142	0,0278	0,1572	0,0231	0,1332
10	0,0241	0,1733	0,0207	0,1179	0,0187	0,1085
11	0,0214	0,1505	0,0180	0,1036	0,0163	0,0947
12	0,0192	0,1321	0,0124	0,07348	0,0125	0,0720

4.3.1.Modelo Difusional para geometria esférica englobando encolhimento

Analizando as difusividades efetivas calculadas para esfera pode-se verificar pelos menores erros relativos calculados e maiores coeficientes de correlação encontrados, que nos casos onde foi englobado o encolhimento ao modelo difusional de umidade, ou seja, nas Tabelas 4.16, 4.17, 4.18, os ajustes obtidos foram melhores em relação àqueles que não consideraram o encolhimento. Este fato foi também observado por diversos autores dentre eles ZOGZAS e MAROULIS (1996), VAGENAS e MARINOS-KOURIS (1990), SERENO e MEDEIROS (1990).

Tabela 4.16. Valores de difusividade efetiva (T=60 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria esférica e o encolhimento

velocidade do ar (m/s)	difusividade efetiva (m²/s)	r	erro relativo (%)
0,5	1,05 . 10 ⁻⁷	0,99	1,70
1,0	0,93 . 10 ⁻⁷	0,99	1,09
1,5	0,95 . 10 ⁻⁷	0,99	1,34

Tabela 4.17. Valores de difusividade efetiva (T=70 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria esférica e o encolhimento

velocidade do ar (m/s)	difusividade efetiva (m ² /s)	r	erro relativo (%)
0,5	1,11 . 10 ⁻⁷	0,96	2,97
1,0	1,32 . 10 ⁻⁷	0,97	3,16
1,5	2,52 . 10 ⁻⁷	0,99	8,43

Tabela 4.18. Valores de difusividade efetiva (T=80 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria esférica e o encolhimento

velocidade do ar (m/s)	difusividade efetiva (m ² /s)	r	erro relativo (%)
0,5	4,35 . 10 ⁻⁷	0,99	8,73
1,0	5,45 . 10 ⁻⁷	0,99	7,14
1,5	5,78 . 10 ⁻⁷	0,99	7,94

Tais ajustes são melhor visualizados nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 que incluem o encolhimento ao equacionamento da secagem . Estas Figuras são referentes a velocidade de 1,5 m/s, os demais ajustes referentes as outras velocidades do ar (0,5 e 1,0 m/s) se encontram no Apêndice 4 (Figuras 10 a 18).

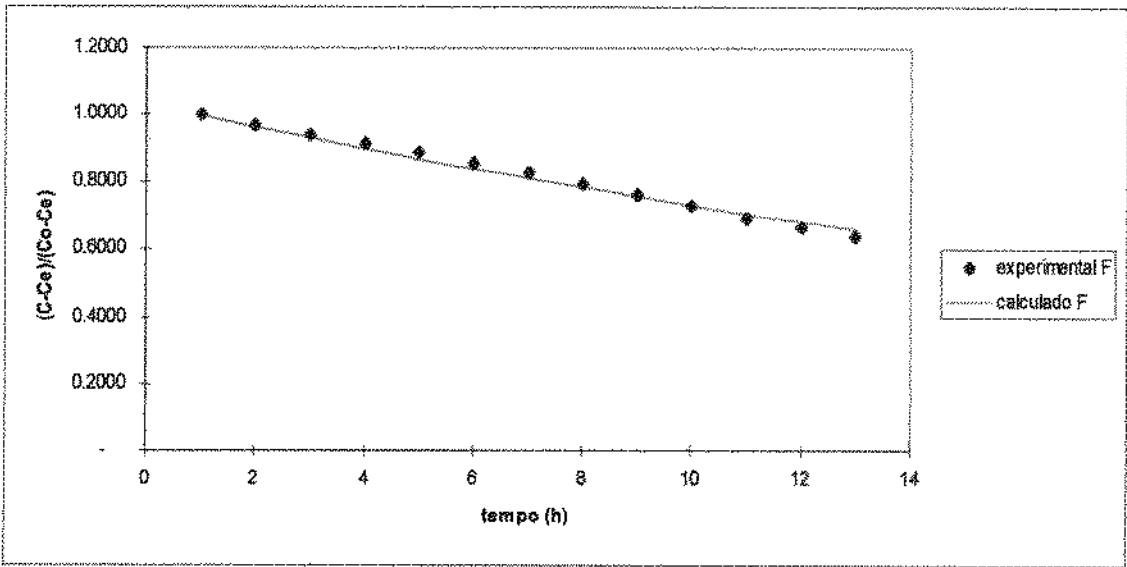


Figura 4.19. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional , com encolhimento para geometria esférica (T=60 °C v=1,5 m/s)

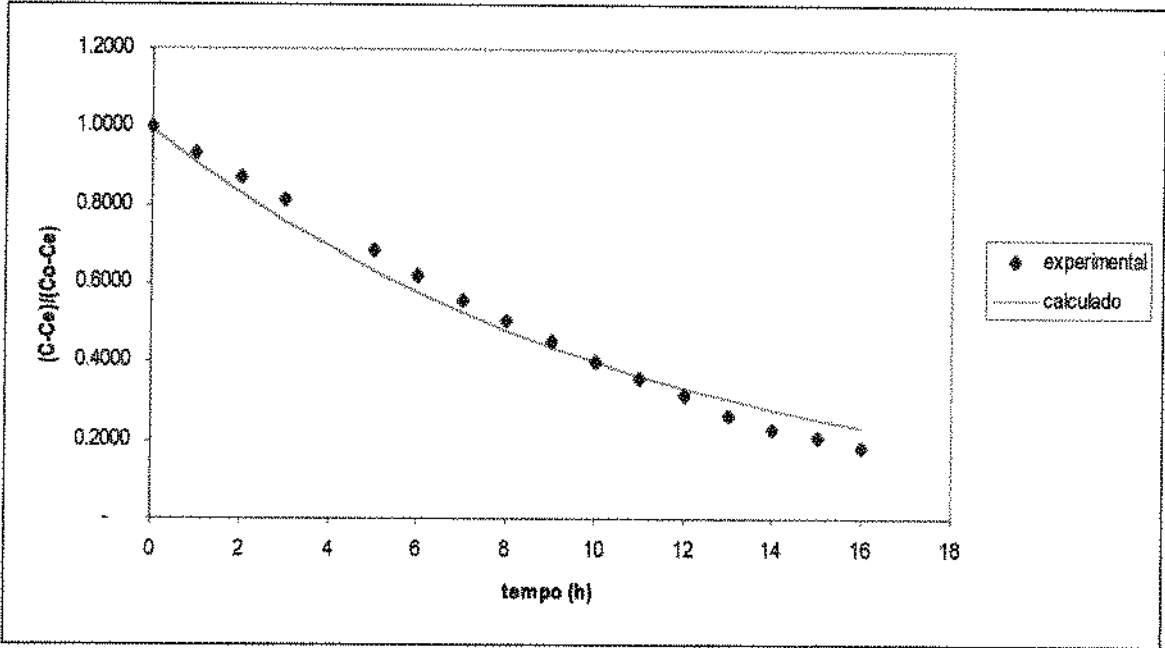


Figura 4.20. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional , com encolhimento para geometria esférica (T=70 °C v=1,5 m/s)

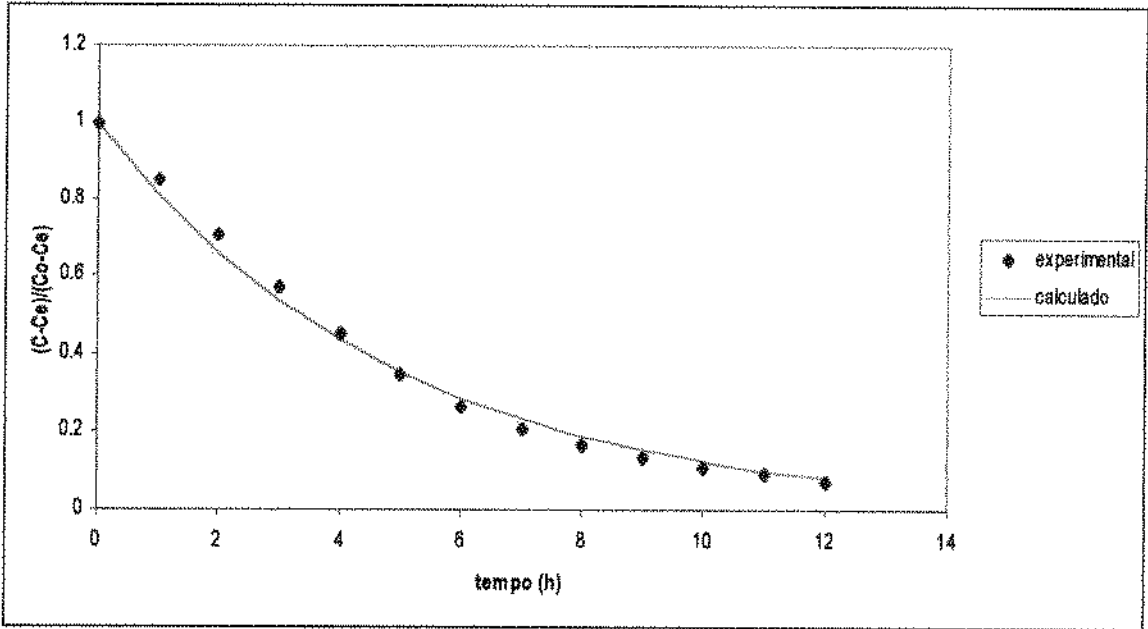


Figura 4.21. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional , com encolhimento para geometria esférica (T=80 °C v=1,5 m/s)

Foram obtidos os valores de número de Biot relativamente baixos (Bi=0,001) indicando que na secagem de tâmaras o que prevalece é a resistência externa, contrariando a situação real. Embora a equação para a esfera não seja adequada para os experimentos com tâmaras as quais apresentam um formato

cilindro-elíptico, o ajuste obtido com os dados de concentração foi muito superior em relação aquele que não considerou o encolhimento.

4.3.2. Modelo Difusional para geometria cilíndrica englobando encolhimento

O modelo de difusão de umidade, considerando a superfície cilíndrica e o encolhimento do material, foi ajustado aos dados experimentais (eq. 4.12).

As difusividades calculadas são apresentadas nas Tabelas 4.19, 4.20 e 4.21, de acordo com cada temperatura (60, 70 e 80 °C) e velocidade do ar de secagem (0.5, 1.0 e 1.5 m/s).

Tabela 4.19. Valores de difusividade efetiva (T=60 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria cilíndrica e o encolhimento

velocidade do ar (m/s)	difusividade efetiva (m ² /s)	r	erro relativo (%)
0,5	1,00 . 10 ⁻⁷	0,99	0,73
1,0	1,02 . 10 ⁻⁷	0,99	0,11
1,5	0,71 . 10 ⁻⁷	0,99	0,39

Tabela 4.20. Valores de difusividade efetiva (T=70 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria cilíndrica e o encolhimento

velocidade do ar (m/s)	difusividade efetiva (m ² /s)	r	erro relativo (%)
0,5	1,26 . 10 ⁻⁷	0,97	3,91
1,0	1,31 . 10 ⁻⁷	0,97	7,12
1,5	1,16 . 10 ⁻⁷	0,99	5,41

Tabela 4.21. Valores de difusividade efetiva (T=80 °C) das tâmaras calculados pelo modelo difusional, considerando a geometria cilíndrica e o encolhimento

velocidade do ar (m/s)	difusividade efetiva (m²/s)	r	erro relativo (%)
0,5	2,39 . 10 ⁻⁷	0,99	5,65
1,0	2,68 . 10 ⁻⁷	0,99	4,56
1,5	3,81 . 10 ⁻⁷	0,99	3,96

Neste ajuste o melhor número de Biot encontrado foi Bi=2 , indicando a contribuição de resistências interna e externa durante o processo de secagem. O ajuste da equação difusional de Fick para o cilindro apresentou melhor ajuste em relação à equação para a esfera.

As Figuras 4.22 a 4.30 mostram as curvas experimentais de secagem e seus ajustes com o modelo difusional para cilindro com encolhimento.

Observa-se uma tendência dos coeficientes de difusão crescerem tanto com o aumento da temperatura como com o aumento do fluxo do ar de secagem.

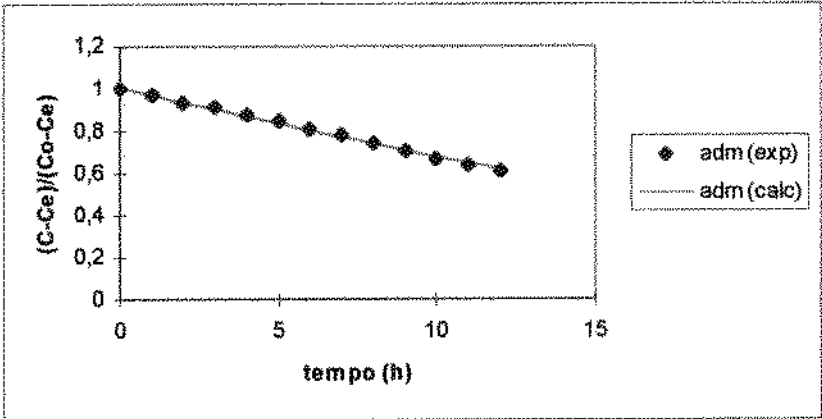


Figura 4.22. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional , com encolhimento para geometria cilíndrica (T=60 °C v=0,5 m/s)

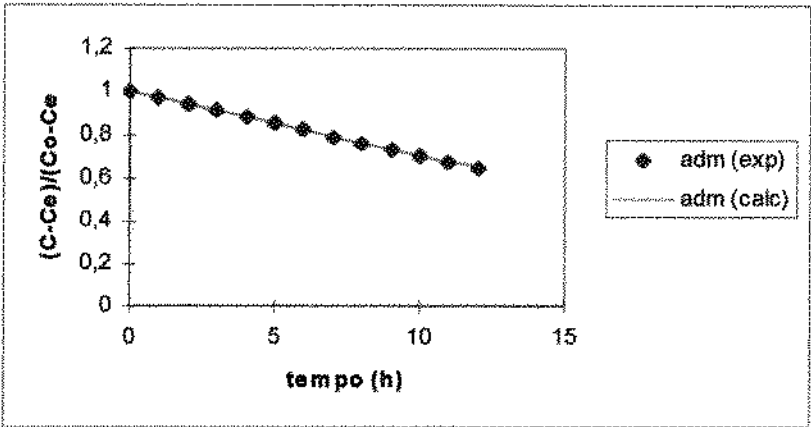


Figura 4.23. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional , com encolhimento para geometria cilíndrica (T=60 °C v=1,0 m/s)

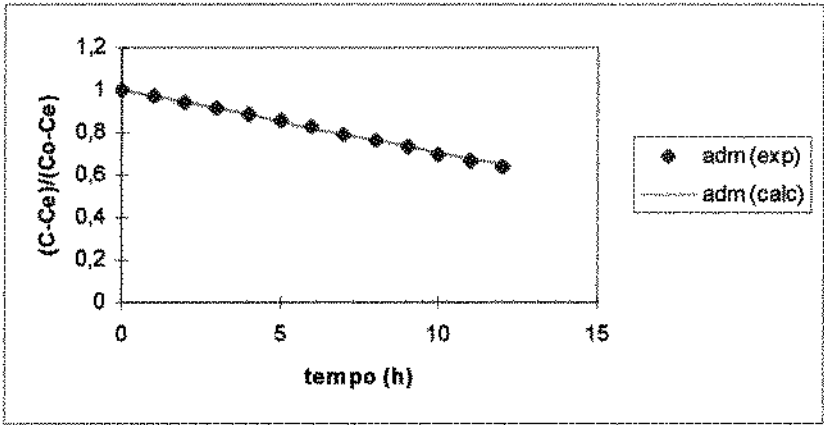


Figura 4.24. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional , com encolhimento para geometria cilíndrica (T=60 °C v=1,5 m/s)

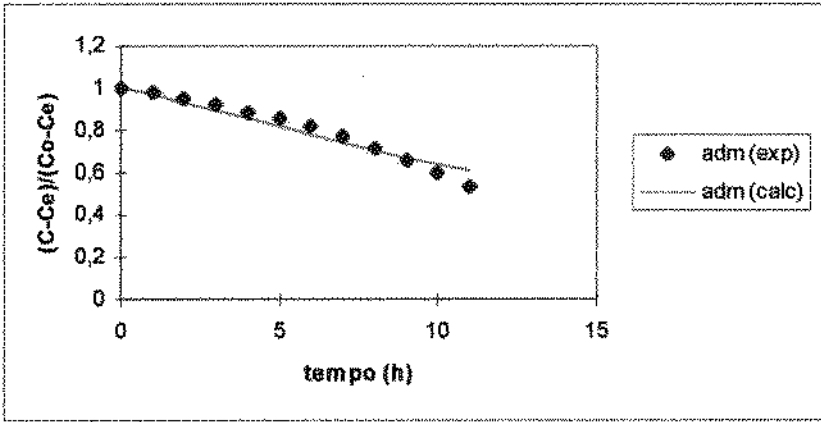


Figura 4.25. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional , com encolhimento para geometria cilíndrica (T=70 °C v=0,5 m/s)

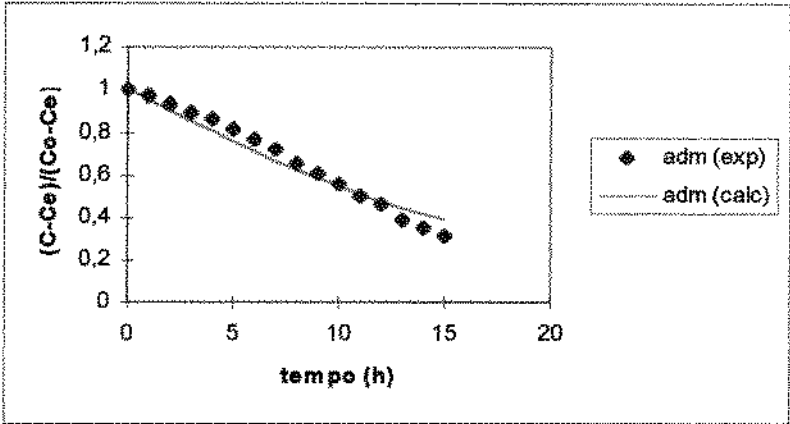


Figura 4.26. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional , com encolhimento para geometria cilíndrica (T=70 °C v=1,0 m/s)

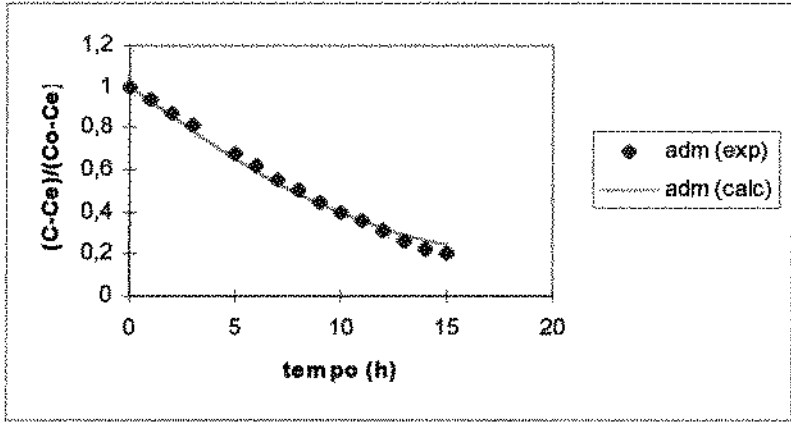


Figura 4.27. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional , com encolhimento para geometria cilíndrica (T=70 °C v=1,5 m/s)

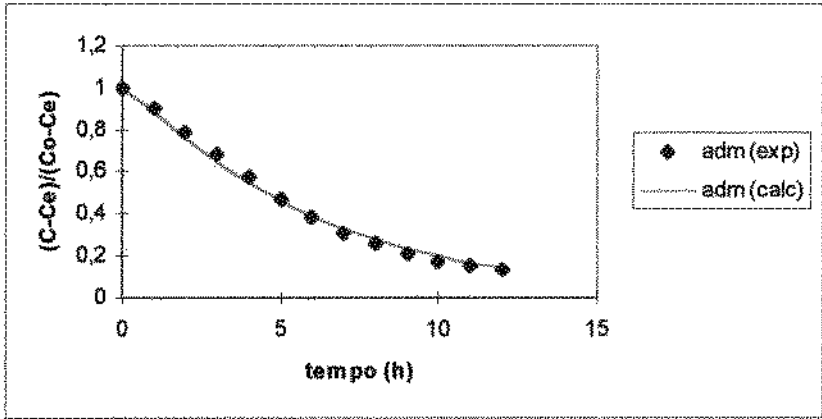


Figura 4.28. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional , com encolhimento para geometria cilíndrica (T=80 °C v=0,5 m/s)

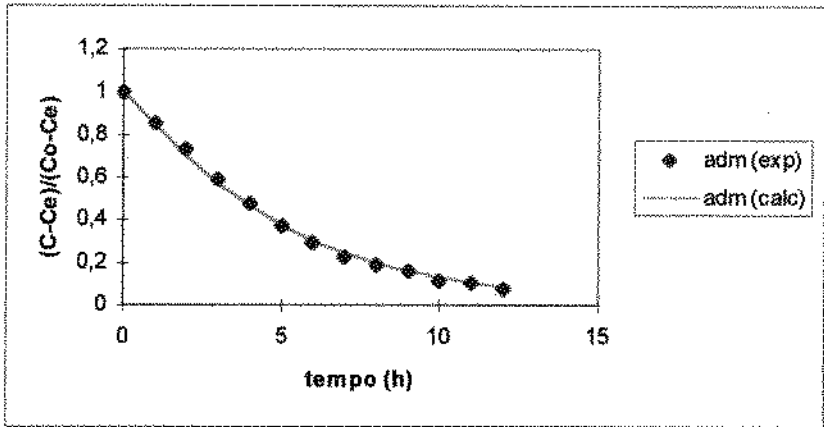


Figura 4.29. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional , com encolhimento para geometria cilíndrica (T=80 °C v=1,0 m/s)

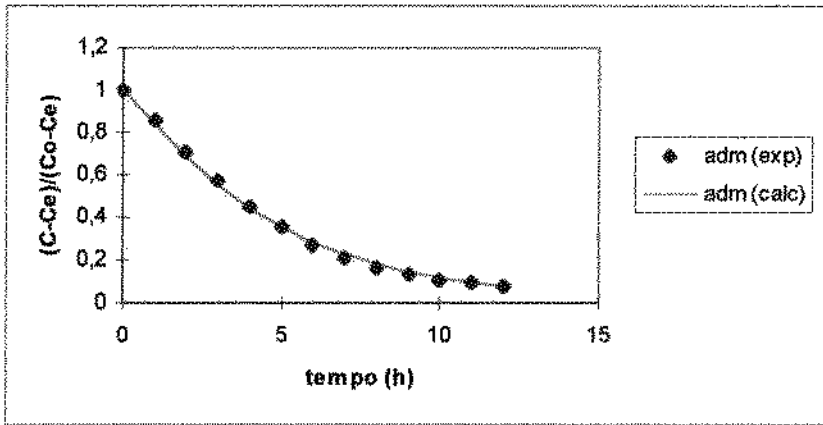


Figura 4.30. Curva de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional , com encolhimento para geometria cilíndrica (T=80 °C v=1,5 m/s)

TOBINAGA (1995) afirma que, se o número de Fourier for maior que 0,2, o primeiro termo da série reproduz com boa precisão os valores experimentais. O número de Fourier calculado para a menor difusividade e maior raio, para o intervalo de tempo de 1 hora foi de 0,44. Concordante com TOBINAGA (1995) utilizando somente os 2 primeiros termos da equação conseguimos ajustes tão bons quanto utilizando os 5 termos da equação.

A análise do processo passou então a ser feita a partir do modelo difusional para geometria cilíndrica, considerando o encolhimento ocorrido na secagem das tâmaras.

Verificando os valores de difusividade, Tabelas 4.19, 4.20 e 4.21, conclui-se que a temperatura de 80 °C e velocidade de 1,5 m/s apresentou o maior valor de difusividade efetiva e consequentemente a melhor condição de secagem.

Analisando os valores de difusividade para cada condição de secagem, verificou-se que esta aumenta com a temperatura e a maioria das vezes com a velocidade. A partir daí iniciou-se uma análise dos valores da difusividade com relação a variação de temperatura e variação da velocidade do ar.

As variações nas difusividades em função da velocidade do ar para cada temperatura são mostrados na Tabela 4.22, e foram calculados segundo a equação (4.17)

Tabela 4.22. Porcentagem de variação da difusividade efetiva devido à variação de velocidade

Temperatura (°C)	variação da D_{ef} em v 0,5 a 1,0 m/s	variação da D_{ef} em v 1,0 a 1,5 m/s	variação da D_{ef} em v 0,5 a 1,5 m/s
60	2,21	-29,95	-28,39
70	3,78	-11,90	-8,57
80	11,91	42,38	59,35

As variações nas difusividades em função da temperatura para cada velocidade são mostrados na Tabela 4.21, e foram calculados segundo a equação (4.18)

Tabela 4.23. Porcentagem de variação da difusividade efetiva devido à variação de temperatura para dados completos

velocidade (m/s)	variação da D_{ef} em T 60 a 70 °C	variação da D_{ef} em T 70 a 80 °C	variação da D_{ef} em T 60 a 80 °C
0,5	26,78	89,18	139,85
1,0	28,72	104,01	162,61
1,5	61,88	229,74	433,81

Pela Tabela 4.22 nota-se que aumentando-se a velocidade de 0,5 para 1,0 m/s para as temperaturas de 60 e 70 °C, aumenta-se a difusividade de umidade no interior das tâmaras. Porém, foi observado uma diminuição nos valores de difusividade nas velocidades de 1,0 e 1,5 m/s. Para 80 °C a variação foi positiva em toda a faixa estudada ou seja, de 0,5 a 1,5 m/s, sendo estes valores de difusividade aumentados com o aumento da velocidade, onde maior variação é observada para a faixa de velocidade de 0,5 a 1,5 m/s.

Mesmo considerando o efeito do encolhimento, as curvas de secagem a 60 °C e 70 °C exibem diminuição de difusividade efetiva com o aumento da velocidade do ar.

No entanto, esta variação é bem menor do que as variações observadas nos resultados obtidos sem considerar o encolhimento.

A possível explicação para este comportamento estaria no endurecimento superficial (PARK, 1998) que prejudica a secagem. O 'ressecamento' da superfície é mais acentuado para baixas temperaturas com velocidades maiores do ar secante.

4.4. Energia de ativação

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

Baseado na equação de Arrhenius, que descreve a relação entre a difusividade e temperatura, foi calculada a energia de ativação, equação (4.19), em função da velocidade do ar.

$$D = D_0 \cdot \exp(-E_a / R.T) \quad (4.19)$$

onde

D_0 = constante da equação de Arrhenius (m^2/s)

E_a = energia de ativação para transferência de massa no interior do material (J/mol)

R = constante universal dos gases (8,314 J/mol K)

T = temperatura absoluta (K)

A equação (4.19) foi adotada neste estudo e os parâmetros D_0 e E_a foram estimados por ajuste do modelo teórico aos dados experimentais. A energia de ativação mostrou aumentar com a velocidade do ar de secagem, para modelos que englobam o encolhimento, conforme pode ser visto nas Tabelas 4.24 e 4.25.

Tabela 4.24. Valores caculados para Energia de Ativação durante a secagem de tâmaras sem encolhimento (cilindro)

velocidade do ar (m/s)	energia de ativação (J/mol K)	coeficiente de correlação r
0,5	47278,91	0,96
1,0	41229,23	0,96
1,5	60980,44	0,91

Tabela 4.25. Valores caculados para Energia de Ativação durante a secagem de tâmaras com encolhimento (cilindro)

velocidade do ar (m/s)	energia de ativação (J/mol K)	coeficiente de correlação r
0,5	36350,43	0,96
1,0	40118,18	0,92
1,5	69591,26	0,94

Estes baixos valores de energia de ativação , calculados considerando o efeito do encolhimento, mostram que os efeitos complementares durante a secagem reduzem a dependência da difusividade efetiva sobre a temperatura.

DAUDIN (1983) em uma compilação bibliográfica apresentou valores de energia de ativação para diferentes alimentos. Segundo ele uma maior energia de ativação pode ser parcialmente devida ao alto conteúdo de açúcar presente em alguns alimentos.

As energias de ativação aqui calculadas , mostraram valores mais altos do que a maioria dos valores relacionados na literatura para produtos alimentícios, provavelmente pelo fato da tâmara possuir altos teores de açúcar.

5. CONCLUSÕES

Observando as curvas de secagem pode-se concluir que as difusividades efetivas aumentam com o aumento da temperatura de secagem, enquanto que a velocidade do ar apresenta outros efeitos colaterais de secagem que prejudicam a transferência de massa.

O modelo difusional aplicado a esfera com os cinco primeiros termos da série de Fourier mostrou um bom ajuste as curvas do adimensional de umidade, melhorando consideravelmente se aplicado para os adimensionais de concentração. Entretanto o modelo difusional para o formato cilíndrico mostrou ser o mais adequado às curvas de secagem tanto para o adimensional da umidade, como para o adimensional da concentração. O número de Biot obtido ($Bi=2$), mostrou ser o processo influenciado pelas resistências internas e externas a difusão de umidade.

Um ajuste com poucos termos da série de Fourier (2 termos), também revelou um bom resultado, confirmando a afirmação de que para números de Fourier maiores que 0,2 a série truncada a partir do primeiro termo pode reproduzir o fenômeno com boa precisão.

Os valores de difusividade efetiva obtidos sem considerar encolhimento se situaram entre $1,01922 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $4,52028 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Os valores de difusividade efetiva com encolhimento ficaram na faixa de $0,71414 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a $3,81217 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Os valores da difusividade efetiva sendo sensíveis ao aumento de temperatura para uma mesma velocidade do ar, resultaram para o modelo difusional do cilindro em energia de ativação de 47,28 kJ/mol para a velocidade de 0,5 m/s e 60,98 kJ/mol para 1,5 m/s. Com o modelo difusional da concentração os

valores encontrados foram de 36,35 kJ/mol para 0,5 m/s e 69,59 kJ/mol para 1,5 m/s. A melhor correlação foi obtida através do modelo difusional aplicado a concentração de umidade, resultando em energia de ativação de 36,35 kJ/mol para velocidade do ar de 0,5 m/s.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUERRE, R. J.; GABITTO, J. F.; CHIRIFE, J. Utilization of Fick's second law for the evaluation of diffusion coefficients in food process controlled by internal diffusion. Journal of Food Technology, 20: 623-629, 1985.
- AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E. The temperature dependence of isosteric heat of sorption of some cereal grains. International Journal of Food Science and Technology, 23 : 141-145, 1988.
- AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E. New BET type multilayer sorption isotherms. Part II. Modelling water sorption in foods. Lebensm. Wiss. u-Technol., 22: 192-195, 1989.
- ALI ASBI, B. Physics of drying. In: The production and storage of dried fish. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, p.194-201.
- ALVARENGA, L. C.; FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J. B.; HARA, T. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, 5 (1): 5-18, 1980.
- ANDERSON, R. B. Modifications of the BET equation. J. Am. Chem. Soc., 68: 686, 1946.
- AREGBA, W.; JOMAA, W. ; PUIGALLI, J. R. Une approche du séchage de matériaux fortement déformables. Revue Phys. Appl., 25(11): 1165-1175, 1990.
- ARPACI, V. S. Conduction heat transfer. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1966. 349 p.
- ASHMAWI, H. Compositional changes in Zegloul dates throughout the different stages of maturity. J. Sci. Food Agric., 7: 625-628, 1956.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). Official Methods of Analysis. 14 ed. Arlington, Virginia, 1984. 1v. (várias paginações).
- AYERST, g. Determination of water activity of some hygroscopic food materials by a dewpoint method. J. Science Food Agricultural, v. 6, p. 71-78, 1965.
- BA ANGGOD, S. A ; AHMED, A. N. Chemical composition of major date cultivar grown in the United Arab Emirates, Date Palm Journal, 3(2): 381-94, 1984.
- BALABAN, M. Effect of volume change in foods on the temperature and moisture content predictions of simultaneous heat and moisture transfer models. J. Food Process Eng., 12(1): 67-88, 1989.
- BALABAN, M. O.; ZURITZ, C. A.; SING, R. P.; HAYAKAWA, K. I. Estimation of heat of moisture sorption isotherm equations for foods. J. of Food Process. Eng., 10: 53-70, 1988.

- BALBACH, A. As Frutas na medicina doméstica. São Paulo, Ed. A edificação do lar, 1981. 379p.
- BALLANTYME, J. A. The growing of dates. Agr. Gaz. N. S. Wals., 58: 589-592, 1947.
- BARGER, W. R. Experiments with California dates in storage. Annu. Rep. Date Grower's Inst., 10: 3-5, 1933.
- BERNA, A.; ROSSELO, C.; CANELLAS, J. ; MULLET, A. Drying kinetics of apricots. In: SPIESS, W. E. L. & SHUBERT, H. ed. Engineering and Food, v. 1, Elsevier Appl. Sci., 1990.
- BLATTER, E. The palms of British India and Ceylon. London, Oxford University Press, 1926, 600 p.
- BOOIJ, I.; PIOMBO, G.; RSTTERUCCI, J. M. Etude de la composition chimique e dattes à différents stades de maturité por la caractérisation variétale de divers cultivars de palmier dattier (Phoenix dactylifera L.) Fruits. 47(6):1992.
- BORGES, S. V. ; CAL-VIDAL, J. Kinetics of water vapour by drum-dried banana. International Journal of Food Science and Technology, 29: 83-90, 1994.
- BRITO GUERRA, P. A tamareira no Nordeste. Boletim Inspetoria de Obras contra as Secas, v. 11, n. 2, Rio de Janeiro, 1939, 65 p.
- BROOKER, D. B.; ARKEMA, F. W. B.; HALL, C. W. Drying cereal grains. Connecticut, The AVI Publishing Company, Inc. 1974, 265 p.
- BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsoption of gases in multimolecular layers. J. Am. Chem. Soc., 60: 309, 1938.
- BUKHAEV, V. T.; ABDUL NOUR, B. A.; NOURI, V. F. Physical and chemical changes in dates during ripening with special reference to pectic substances. Date Palm J., 5(2): 199-207, 1987.
- CANPENITE, J. B. Improvement of traditional date culture. Date Palm Journal, 1(1): 1-16, 1981.
- CANTO, W. L.; SILVEIRA, E. T. F.; LEITE, R. S. S. F.; MAIA, M. L.; GASPARINO, J. F°; YATSUYANAGY, K. Processamento e mercado de frutas secas. Estudos econômicos - Alimentos processados 23, 1987. 208 p.
- CARNEIRO, M. J Modelagem matemática da secagem de pescado. Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos, 1995. 74p. (Dissertação de Mestrado).
- CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: MUJUNDAR, A. S. (ed.) Advances in drying. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1981, p.73-102.
- CHIRIFE, J.; SUAREZ, C.; IGLESIAS, H. A. The calculation of the heat of water sorption in foods on the basis of BET theory. J. of Food Technol., 21: 103-107, 1986.

- CHRISTENSEN, C. M. Storage of cereal grains an their products. Minnesota, American Association of Cereal Chemists, 1974, 549 p.
- CHUNG, D. S. ; PFOST, H. B. Adsorption and desorption o water vapour by cereal grains and their products. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, v. 10, n. 4, p. 149-157, 1967.
- CONSIDINE, P. E. Foods and Food Production Encyclopedia. Van Nostrand Reinhold Company. New York, 1982, p. 543-550.
- COOK, R. F. ; FURR, J. R. Sugars in the fruit of soft, semi-dry and dry commercial date varieties. Date Growers'Inst. Rpt., n. 29, p. 3-4, 1952.
- COOK, R. F. Drying dates under adverse weather conditions. Date Grower's Inst. Report, 29:18-9, 1940.
- CÓRDOVA-QUEIROZ, A. V.; RUIZ-CABRERA, M. A. ; GARCIA-ALVARADO, M. A. Analytical solution of mass transfer equation with interfacial resistance in food drying. Drying Technology, 14 (7/8): 1815-1826, 1996.
- CORREIA, M. P. Tamareira. In: Dicionário das Plantas Úteis do Brasil. Rio de Janeiro. R.J. IBDF, 1975. 6: 182-85.
- CRANK, J. The mathematics of diffusion. 2ed., Clarendon Press Oxford, 1975, 414p.
- CUNNINGHAN, F. E. Practical applications of food dehydration. A review. J. of Food Protection, 45(5): 479-483, 1982.
- DAUDIN, J. D. Calcul des cinétiques du séchage por l'air choud des. Sci. Aliments, 3 (1): 1-36, 1983.
- De BOER, J. H. The dynamical character of adsorption. Clarendon Press, Oxford, 1953.
- De GOIS, V. A.; CAL-VIDAL, J. Kinetics of water vapour sorption by freeze dried papaya. Drying Technology, 4 (1): 89-99, 1986.
- DIAMANTE, L. M.; MURNO, P. A. Water desorption isotherms of two varieties of sweet potato. J. Food Sci. Technol., 25: 140-147, 1990.
- DOWSON, V. H. W.; ATEN, A. Dates handling, processing and packing. FAO/UN. Rome, 1963. 414p.
- DUCKWORTH, R. B. Future needs in water sorption in foodstuffs. In: Physical Properties of Foods. Applied Science Publishers. London and New York, 1972.
- EVREINOFF, V. A. Contribution a l'etude du dattier. Journal D'Agriculture Tropical et Botanique applique, v. 3, p. 329-333, 1956.
- FAO Statistics Series, v.46 ,n.112, Rome, 1993, 281p.
- FORTES, M.; OKOS, M. P. Changes in physical properties of corn during drying. Transactions of ASAE, St. Joseph, Michigan, v. 23, n. 4, p. 1004-1008, 1980.

- FORTES, M.; OKOS, M. P. Heat and mass transfer in higroscopic capillary extruded products. AIChE J., St. Joseph, Michigan, v. 27, n. 2, p. 102-113, 1981.
- FUSCO, A. J.; AVANZA, J. R.; AGUERRE, R. J.; GABITTO, J. F. Difusion model for drying with volume change. Drying Technol., 9(2): 397-417, 1991.
- GAL, S. Recent advances in techniques for determination of sorption isotherms. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM**, Glasgow, 1974. Proceedings of an International Symposium, London, Academic, 1975, p. 139-154.
- GAL, S. Recent advances in techniques for the determination of sorption isotherms. In: DUCKWORTH, R. B. (ed.). Water Relations of Foods. London and New York: Applied Science Publishers, 1972.
- GOMES, P. A tamareira. In: Fruticultura Brasileira. São Paulo, Liv. Nobel, S. A. 1975. p.204-222.
- GREESPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. T. Res. Nat. Bur. Stnds., 81(1): 89-96, 1977.
- GUGGHENHEIM, E. A. Applications of statistical mechanics. Clarendon Press, Oxford, 1966, 86p.
- HALSEY, G. Physical adsorption on uniform surfaces. The Journal of Chem. Physics, 16 (10): 931-937, 1948
- HARMATHY, T. Z. Simultaneous moisture and heat transfer in porous systems with particular reference to drying. J. & E. C. Fundamentals. 8 (1): 92-103, 1969.
- HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. Agricultural Engineering, St. Joseph, Michigan, v. 33, n. 1, p. 29-32, 1952.
- HSU, K. H. A diffusion model concentration dependent diffusion coefficient for describing water movement in legumes during soaking. J. of Food Sci., 48(2): 618-622, 1983.
- HUSSEIN, F.; MOUSTAFA, S. ; ELKAHTANI, M. Studies on physical and chemical characteristics of eighteen date cultivars grown in Saudi Arabia. Kingdom of Saudi Arabia, Ministry of Agriculture, Research Bulletin, n. 4, p. 5-18, 1974.
- IGBEKA, J. C. Simulation of moisture movement during drying a starchy food product-cassava. J. Food Technol., 17 (1): 27-36, 1982.
- IGLESIAS, H.; CHIRIFE, J. ; BOUQUET, R. Prediction of water sorption isotherms of food models from knowledge of components sorption behaviour. J. Food Science, 45: 450-452, 1980.
- IGLESIAS, H.; CHIRIFE, J. BET monolayer in dehydration foods and food components. Lebensm. Wiss. u Technol., 9(2): 107-113, 1976.
- JAWANDA, J. S. The nutritive value of date. Punjab Hort.J., 12(1): 54-57, 1972.

- KALRA, S. K.; JAWANDA, J. S.; MUNSHI, S. K. Studies on the curing of dates by hot water treatments. Indian J. Hort., 33(2): 145-151, 1976.
- KAPSALIS, J. G. Influences of hysteresis and temperature on moisture sorption isotherms. In: ROCKLAND, L. B. (ed.). Water activity: theory and applications to food. New York: Marcel Dekker, 1987, 9: 173-213.
- KAREL, M. Dehydration of foods. In: FENNEMA, O. R. (ed.). Principles of Food Science, Preservation Physical of Foods. New York: Marcel Dekker, 1975, 4(10): 309-357.
- KECHAOU, N.; ROQUES, M. A. A variable diffusivity model for drying of highly deformable materials. In: MUJUNDAR, A. S. (ed.). Drying '89. Elsevier Sci. Publishers B.V., 1989.
- KEEY, R. B. Drying: principles and practice. Oxford, Pergammon Press, 1972, 358 p.
- KING, C. J. Rates of moisture sorption and desorption in porous, dried foodstuffs. Food Technology, 22: 165-171, 1968.
- KOSOSKY, A. R. Dois métodos comparando a obtenção do equilíbrio higroscópico dos grãos. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, MG, v. 2, n. 2, p. 31-43, 1977.
- KRISCHER, O.; KROLL, K. In: Trocknungstechnik. Berlin, Springer-Verlag, 1976, Bd. 1, p. 254.
- KUMAR, K. R.; BALASUBRAMANYAN, N. Moisture sorption and 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(3): 263-272, 1968.
- LABUZA, T. P.; KANANA, A. ; CHEN, J. Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. Journal of Food Science, 50: 385-391, 1985.
- LANGMUIR, I. The adsorption of gases and plane surfaces of glass, mica and platinum. J. Ame. Chem. Soc., 46: 1361-1403, 1918.
- LEWIS, W. K. The rate drying of solid material. J. Ind. Eng. Chem., 13 (5): 427-432, 1921.
- LOMAURO, C. J.; BASKI, A. S.; LABUZA, T. P. Moisture transfer properties of dry and semimoist foods. J. Food Science, 50: 397-400, 1985.
- LONCIN, M. Equations relatives aux transferts de matière, chaleur et quantité de mouvement. In: Génie industries alimentaire: aspects fondamentaux, Paris, Masson, 1976, p. 16-26.
- LOZANO, J. E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M. J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. J. Food Sci., 48: 1497-1502, 1983.

- LUIKOV, A. V. Heat and mass transfer in capillary porous bodies. Pergammon Press, Oxford. 523 p., 1966.
- LUIKOV, A. V.; MIKHAILOV, Y. O. Theory of energy and mass transfer. Oxford, Pergammon, 1965, p. 329.
- MANUEL SÁ, M ; SERENO, A. M. Effect of temperature on sorption isotherms and heats of sorption of quince jam. International Journal of Food Sci. Techn., 28: 241-248, 1993.
- MARLOTH, H. R. Home curing of dates. Farming in South Africa, 30: 283-284, 1955.
- 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.
- MATTEA, M.; URBICAIN, M. J. ; ROTSTEIN, E. Effective thermal conductivity of cellular tissues during drying: prediction by a computer assisted model. J. Food Sci., 54(1): 194-197, 204, 1989.
- MAZZA, G. ; Le MAGUER, M. Water sorption properties of yellow globe onion. (*Allium cepa*). Can. Inst. Food Sci. Techn. J., 11(4): 189-193, 1978.
- MAZZA, G.; Le MAGUER, M. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. J. Food Technol., 15: 181-194, 1980.
- MISRA, R. N.; YOUNG, J. H. Numerical solution of simultaneous diffusion and shrinkage during soybean drying. Transactions of the ASAE, 23(5): 1277-1282, 1980.
- MONCIERO, A. Contribution à l'étude do palmier dattier. Bull. Off. Tunis. Stand., 4(38): 74-80, 1950
- MONCIERO, A. Notes sur le palmier dattier. Ann. Inst. Agric. Alger. , 8(4): 3-48, 1954
- MULLET, A.; BERNA, A.; ROSSELO, C. Drying of carrots. I. Drying models. Drying Technol., 7(3): 537-557, 1989.
- MUNIER, P. Le Palmier Dattier, Maisonneuve & Lorose, Paris, 1973, 221p.
- MYHARA, R.; TAYLOR, M.; AL-BULUSHI, I. The moisture sorption isotherms of Omani dates. Drying'96. Proceedings of the 10th International Drying Symposium. (IDS'96). Krakow, Poland, 30 July-2 August 1996, vol B, pp.989-996.
- NEVES, M. J. B. Processo de seca-aeração, Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982, 55 p.(Tese de Mestrado).
- NIELSEN, B. W.; Mc COLLOCH, R. J.; BEAVENS, E. A. Processing and packaging of dates. I. A new method of canning and pasteurizing Deglet Noor dates. Food Technol., 6: 232-237, 1950.
- NIXON, R. W. The date palm - "Tree of live" in the subtropical deserts. Economical Botany, 5: 244-301, 1951.

- 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).
- NUNES, R. F. M.; QUEIROZ, M. A.; SILVA, C. M. M. S. Instruções para a produção de mudas e plantio de tamareira. Circular Técnica nº 21, EMBRAPA, julho 1989.
- OSWIN, C. R. Journal Chem. Ind., 65: 419, 1946.
- PARK, K. J. Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem. Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1987. 54p. (Tese Livre Docência em Fenômenos de Transporte).
- PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; RODRIGUES, R. A.; SCAVRONI, C. M. S. Desorption isotherms of red ginger (sho- ga): experimental determination and evaluation of mathematical models. Drying'96- Proceedings of the International Symposium (IDS'96). Kraków, Poland, vol.B, p.1023-1028.
- PARK, K. J.; NOGUEIRA, R. I. Modelos para ajuste de isotermas de sorção de alimentos. Engenharia Rural, 3(1): 180-86, julho 1992.
- PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; GODOI, L. F. G. Beans (*Phaseolus vulgaris*) characteristic drying curve. Drying '96- Proceedings of the International Drying Symposium (IDS '96). Kraków, Poland, 30 July-2 August 1996, vol. B, pp.1001-1008.
- PARK, K.J. Diffusional model with and without shrinkage during salted fish muscle drying. Drying Technology, 16(3-5): 889-905, 1998.
- PELEG, M. Assesment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoidal moisture sorption isotherms. J. Food Proc. Eng., 16: 21-37, 1992.
- PERRY'S. Chemical Engineers' Handbook. 6. ed. New York. Mc Graw-Hill, 1984.1v. (várias paginações)
- PHILIP, J. R.; De VRIES, D. A. Moisture movement in porous materials under temperature gradient. Trans. Am. Geophys. Union, v. 38, n. 2, p. 222-232, 1957.
- PIMENTEL GOMES, F. A tamareira, Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, 102p., 1978.
- QUEIROZ, M. A.; NUNES, R. F. M. & SILVA, C. M. M. S. Instruções para produção de mudas e plantio da tamareira. Circular Técnica. CPATSA, Petrolina, n. 1, 1989, 36 p.
- RAMASWANY, H. S.; LO, K. V. Simplified mass transfer relationships for diffusion controlled air dehydration of regular solids. Canadian Agricultural Eng., 25 (1): 143-148, 1983.

- RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of food in dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. (ed.). Engineering Properties of Food. New York: Marcel Dekker, 1986, 4:133-124.
- ROA, G.; ROSSI, S. J. Determinação experimental de curvas de teor de umidade equilíbrio mediante a medição da umidade relativa de equilíbrio. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, MG, v. 2, n. 2, p. 17-22, 1977.
- ROMAN, G. N.; URBICAN, M. J.; ROTSTEIN, E. Moisture equilibrium in apples at several temperatures: experimental data and theoretical considerations. J. Food Science, 47(5): 1484 - 1488, 1982.
- ROTSTEIN, E.; CORNISH, A. R. H. Prediction of the sorptional equilibrium relationship for the drying foodstuffs. American Inst. Chem. E. J., 24: 956, 1978.
- RUIZ-CABRERA, M. A.; SALGADO-CERVANTES, M. A.; WALISZEWSKI-KUBIAK, K. N. ; GARCIA-ALVARADO, M. A. The effect of path diffusion on the effective moisture diffusivity in carrot slabs. Drying Technology, 15 (1): 169-181, 1997.
- RYGG, G. L. Investigations on harvesting Deglet Noor dates, including bunch cutting and delayed packing. Annu. Rep Date Grower's Inst., 27: 22-25, 1950
- RYGG, G. L. Relative humidity for storing dates at different temperatures. Amer. Soc. for Hort. Sci, 52: 173-176, 1948.
- SARAVACOS, G. D.; CHARM, S. G. A study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration. Food Technol., 1(16): 78-81, 1962.
- SARAVACOS, G.D.; STINCHFIELD, R. M. Effect of temperature and pressure on the sorption of water vapor by freeze-dried food materials. J. of Food Science, 30: 779-7786, 1965.
- SARAVACOS, G.D.; TSIOURVAS, D.A.; TSAMI, E. Effect of temperature and pressure on the water adsorption isotherms of sultan rainsins. J. of Food Science , 51: 381 -94 , 1986.
- SCHRRADER, O. L. Contribuição ao estudo da tamareira no Brasil. Rio de Janeiro. R. J. Ministério da Agricultura, Serviço de documentação, 1946. 101p.
- SERENO, A.M.; MEDEIROS, G. L. Simplified model for the prediction of drying rates for foods. J. Food Eng. , 12 (1): 1-11, 1990.
- SHERWOOD, T. K. The drying of solids I Ind. Eng. Chem., 21(1): 12-16, 1929a.
- SHERWOOD, T. K. The drying of solids II Ind. Eng. Chem., 21(10): 976-980, 1929b.
- SILVA, J. N. ; PINHEIRO FILHO, J. B. Curvas de equilíbrio higroscópico do cacau. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, MG, v. 4, n. 2, p. 31-38, 1979.
- SILVA, J. S. S. Pré-processamento de produtos agrícolas. Juiz de Fora, MG, Instituto Maria, 1995, 500 p.

- SILVA, M. A. ; NEBRA, S. A. The calculation of moisture distribution in a drying process. Proceedings 6th Intern. Drying Symp. Versailles, France, OP: 145-150, 1988.
- SODHA, M. S.; BANSAL, P. K. DANG, A. & SHARMA, S. B. Drying Technology, 3 (4): 517-527, 1985.
- SOEKARTO, S. T. ; STEINGBERG, M. B. Determination of binding energy for there fractions of bound water. In: ROCKLAND, L. B. ; STEWART, G. F. (ed.). Water activity: influences on food quality. New York: Academic Pres, 1981, p. 265-279
- SPIESS, W. E L.; WOLF, W. F. The results of the Cost 90 project on water activity. In: JOWITT, R. (ed.). Physical Properties of Foods. London and New York: Applied Science Publishers, 1983, p.65-91.
- STEFFE, J. F.; SINGH, R. P. Diffusivity of starch endosperm and bran of fresh and rewetted rice. J. Food Science, 45 (2): 356-361, 1980.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. Drying: principles aplications and design. 1ed., Gordon and Breach Science Publishers, 1986, 448p.
- SUAREZ, C. ; VIOLLAZ, P. E. Shrinkage effect on drying behavior of potato slab. J. Food Eng. 13 (2): 103-114, 1991.
- SUZUKI, K; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T.; HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root, vegetables. J. Food Sci., 41: 1189-1194, 1976.
- TEIXEIRA NETO, R. O.; QUAST, D. G. Isotermas de adsorção de umidade em alimentos. Colet. Inst. Tec. Alim., Campinas, 8: 141-197, 1977.
- TEIXEIRA, M. B. F. Secagem de manta de lula (*Loligo brasiliensis*) (Tese de Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos, 1995, 81 p.
- TOBINAGA, S. Métodos Matemáticos.- Disciplina ministrada na Faculadade de Engenharia de Alimentos. Caderno de notas de aula, 1995.
- TOLABA, M. ; SUAREZ, C. Expresiones analíticas para el calculo de calores de sorcion de cereales. Anais do I Congresso Ibero-Americano de Engenharia de Alimentos, Campinas, 1995.
- TOLABA, M.; SUAREZ, C. Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusion model. Lebensmittel Wissenschaft und Technologie, 21 (2):83-86, 1988.
- TREYBAL, R. B. Drying In: Mass Transfer Operations. New York, Mc Graw-Hill, 1968, p. 569-575.
- UDANI, K. H.; NELSON, A. I. ; STEINBERG, M. P. Rate of moisture adsorption by wheat flour and its relation to physical, chemical an baking characteristics. Food Techn., 22: 1561-1563, 1968.

- VACCAREZZA, L. M.; LOMBARDI, J. L.; CHIRIFE, J. Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. J. Food Technol., 9: 317-327, 1974.
- VAGENAS, G. K. ; MARINOS-KOURIS, D. Design and optimization of an industrial dryer for sultana raisins. Drying Technology, 9 (2):439-461, 1991a.
- VAGENAS, G. K. ; MARINOS-KOURIS, D. Finite element simulation of drying of agricultural products with volumetric changes. Appl. Math. Modelling, 15 (9):475-482, 1991c.
- VAGENAS, G. K.; MARINOS-KOURIS, D. Drying kinetics of apricots. Drying Technol., 9(3): 735-752, 1991b.
- VAN ARSDEL, W. B. Approximate diffusion calculations for the falling rate phase of drying. Trans. American Institute Chemical Engineers, 43 (1): 13-24, 1947.
- WHITE, G. M.; ROSSI, I. J. ; KLAIBER, J. D. J. D. Moisture equilibrium in mixing of shelled corn. Transactions fo the ASAE, St. Joseph, Michigan, v. 15, n. 3, p. 508-509, 1972.
- YOSHIDA, C. M. P. Cinética de secagem do milho super-doce. (Tese de Mestrado). Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1997, 151 p.
- YOUNG, J. H. Sorption and dessorption equilibrium moisture content isotherms of virginia type peanuts. Transactions of the ASAE, Oklahoma State University Atillwatwer, Oklahoma, n.743034, 1974.
- YUSHENG, Z. ; POULSEN, K. P. Diffusion in potato drying. J. Food Eng. 7 (4): 249-262, 1988.
- ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B ; MARINOS-KOURIS, D. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. Drying Technology, 12(7): 1653-1666, 1994.

APÉNDICE 1

APÊNDICE 1

Análises químicas da tâmara (*Phoenix dactylifera* L.) da variedade Zahidi

1.1- Determinação de umidade

Existem diferentes técnicas para determinação do teor de água dos alimentos, porém, basicamente são utilizados processos gravimétricos (com e sem emprego de calor) e processos químicos, sendo porém os gravimétricos mais utilizados.

1.1.1 - Técnica gravimétrica com emprego de calor

Baseia-se na perda de peso do produto submetido ao aquecimento até peso constante.

- Material

Estufa à vácuo regulada para uma temperatura inferior a 70°C e pressão inferior a 60mmHg.

Dessecador.

Balança analítica.

Cápsulas de porcelana 100ml.

Técnica

Em cápsula previamente tarada (sem umidade), pesar ± 10 g da amostra homogeneizada. Levar a estufa para dessecar o material até peso constante, ou seja, quando duas pesagens consecutivas não apresentarem diferença de peso.

Cálculo:

Relacionar a perda de peso para 100g da amostra

$$\%Umidade = \frac{P-p}{p} 100$$

Onde:

P - peso do alimento;

p - peso do alimento seco.

1.2 - Determinação de lipídeos

Os lipídeos geralmente são extraídos dos alimentos com auxílio de solventes orgânicos (éter etílico, éter de petróleo).

O tempo de extração é variável, dependendo da natureza do produto examinado. O ponto final da extração é indicado quando uma gota do solvente recém-destilado não acusar mais presença de gordura.

Método: Extração contínua em aparelho tipo Soxhlet

Fundamento: Processo gravimétrico, baseado na perda de peso do material submetido à extração com éter etílico, ou na quantidade de material dissolvido pelo solvente.

O material dessecado a ser usado na extração, deve estar finamente dividido, para permitir melhor atuação do solvente. Materiais que se aglomeram facilmente formando pastas consistentes devem ser manipulados com areia lavada e seca antes de serem colocados no cartucho. Após ser dessecado o material é então colocado no cartuchos de Soxhlet.

Materiais:

Cartuchos de Soxhlet.

Extrator tipo Soxhlet.

Éter etílico anidro

Algodão desengordurado

Balões de fundo chato de 250ml

Dessecador

Estufa regulada a 105°C

Técnica:

Pesar 2 a 5g de material dessecado, transferir quantitativamente para o cartucho do Soxhlet e cobrir a amostra no cartucho com algodão. Extrair em aparelho de Soxhlet com éter etílico, utilizando balão de fundo chato (250ml) previamente dessecado e tarado. Extrair por aproximadamente 6 horas.

Evapore o solvente e colocar o balão com resíduo em estufa a 105°C. Resfriar em dessecador até a temperatura ambiente e pesar.

Cálculo

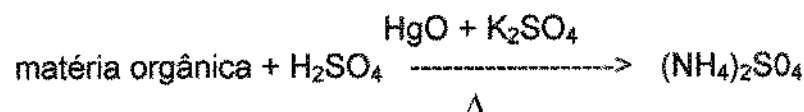
Calcular a quantidade de lipídeos para 100g de produto dessecado e relacionar para 100g de produto integral.

1.3 - Determinação da fração proteica

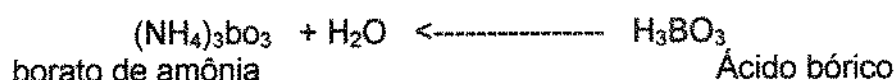
Método: Micro-Kjeldahl

Etapas do processo:

Digestão da matéria-orgânica:



Destilação e titulação do nitrogênio:



-Tomada de ensaio:

Calcula-se a quantidade de proteína contida na amostra, que deve reagir com 10ml de solução do HCl 0,02N

$$\begin{array}{ccccccc} 36,5\text{g HCl} & \text{-----} & 1000\text{ml} & \text{-----} & 1\text{N} & \text{-----} & 14\text{g N} \\ 0,0073 \text{ HCl} & \text{-----} & 1000\text{ml} & \text{-----} & 0,02\text{N} & \text{-----} & 0,0028\text{g N} \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} 100\text{g de Proteína} & \text{-----} & 16\text{g de Nitrogênio} \\ \text{X} & \text{-----} & 0,0028\text{g de Nitrogênio} \end{array}$$

$$\text{X} = 0,0175\text{g de proteína que reage com 10ml de solução de HCl 0,02N}$$

$$\begin{array}{rcl} 100\text{g de amostra} & \text{-----} & \text{Y (\% teórica de proteína na amostra)} \\ \text{Z} & \text{-----} & 0,0175\text{g de proteína} \end{array}$$

$$\text{Z} = (100 \times 0,0175)\text{Y} = \text{tomada de ensaio para análise}$$

-Material:

Balões de Kjeldahl de 50ml

Espátula

Papel manteiga

Erlenmeyer de 150ml

Pissete com H₂O destilada

Pérolas de vidro

Bureta de 25ml

Aparelho de micro-Kjeldahl

Balança analítica

Digestor para proteína

Reagentes:

K₂SO₄ anidro

HgO vermelho

H₂SO₄ d = 1,84 p.a.

Solução NaOH + Na₂S₂O₃

Indicador (verde de bromocresol - vermelho de metila)

Solução saturada de H₃BO₃

Técnica:

Pesar a amostra seca desengordurada (o peso não deve ser superior a 100mg) utilizando papel manteiga.

transferir (amostra + papel) para o balão de Kjeldahl.

Adicionar ao balão 1,9 ± 0,1g de K₂SO₄, 40mg de HgO e 3 a 5ml de H₂SO₄.

Colocar 3 a 4 pedaços de vidro e digerir (em capela) até que a amostra se torne incolor.

Transferir o degerido (sem as pérolas de vidro) para o aparelho destilador, lavando o balão 2 a 3 vezes com porções de 4 a 5ml de água destilada.

Adicionar ao destilador 10ml de solução de NaOH-Na₂S₂O₃.

Receber o destilado em Erlenmeyer contendo 5ml de solução saturada de ácido bórico (H₃BO₃) e mais 3 a 5 gotas do indicador.

Coletar ± 50ml do destilado e titular com solução de HCl 0,02N até o aparecimento da cor violeta ourose.

Cálculos:

Determinar a quantidade de Nitrogênio total na amostra e transformar em proteína com o uso do fator 6,25.

Calcular na amostra seca e integral:

Nitrogênio

Amostra líquida: $N(g) = [(N \text{ HCl } V \text{ 14})/A \text{ 1000}] \text{ 100}$

Amostra sólida: $N(\%) = (V \text{ N } 14 \text{ 100})/A$

Onde:

N = normalidade da solução HCl = 0,02;

V = volume de HCl 0,02N gasto na titulação;

A = mg da amostra (tomada de ensaio).

1.4. Doseamento de amido

O amido nos alimentos geralmente encontra-se acompanhado de outros carboidratos, como celulose, hemicelulose, pentosanas X glicosídeos, além de taninos e produtos da própria hidrólise de amido, como dextrinas e açúcares. Na escolha do método de doseamento, deve-se levar em consideração a interferência dessas substâncias.

Os métodos hidrolíticos (onde o amido é hidrolisado por ácidos ou enzimaticamente) são aplicados para produtos que apresentam pequena proporção de carboidratos insolúveis em água. Os métodos não hidrolíticos são mais indicados para os produtos nos quais o amido encontra-se em maior proporção.

-Método: Químico - Licor de Fehling ou Somogyi-Nelson

-Fundamento:

Determina-se os açúcares redutores totais, antes e após a hidrólise ácida e alcalina do amido. Essa diferença x 0.9 (fator de conversão da glicose em amido), nos dará a quantidade de amido presente em 100 g da amostra.

-Material:

balança analítica
provetas de 10 ml, 25 ml, 100 ml
banho-maria 83-87°C
centrífuga (1500 rpm)
conta-gotas
balão volumétrico de 100 e 200 ml
papel de filtro
pipeta graduada de 5 ml
bureta de 25 ml
bastão de vidro
erlenmeyer de 250 ml e 300 ml
espátulas
becker de 250 ml
cápsula de porcelana de 100ml
condensador de vidro
funis de haste longa

-Reagentes:

éter etílico
solução saturada de acetato de chumbo
soluções de Fehling tituladas
hidróxido de sódio a 10%
álcool etílico a 70 e 90%
carbonato de cálcio
HCl (d=1,19 e 1,125)
carvão ativo

-Técnica:

Pesar 10 g de amostra em cápsula de porcelana.
Tratar sucessivamente com 3 porções de 200 ml de éter etílico.
Decantar e transferir o material desengordurado para um balão de 250 ml,
com o auxílio de 100 ml de álcool etílico 70%
Adicionar 0,5 g de carbonato de cálcio e agitar.

Deixar em banho-maria por uma hora (83-87°C), usando um pequeno funil de gargalo para condensar os vapores. Esfriar e deixar em repouso por 15 horas.

Completar o volume com álcool a 95% e transferir para Erlenmeyer de 500 ml.

Deixar sedimentar (ou centrifugar a 1500 rpm por 15 minutos).

Decantar o sobrenadante, (filtrar para não perder o resíduo), que pode ser usado no doseamento de glícides solúveis, seguindo a seguinte técnica:

Sobrenadante: evaporar o álcool em banho-maria e dissolver o resíduo com o auxílio de 50 ml de água, aquecer por 5 minutos em banho-maria e esfriar. Filtrar a solução para um balão volumétrico de 100 ml (clarificar se necessário); completar o volume e filtrar para becker de 250 ml; transferir para uma bureta. Titular o Fehling, etc.

Resíduos: lavar o resíduo com 50 ml de álcool a 70%. Decantar e adicionar $\pm$ 80 ml de água destilada. Adicionar 4 gotas de NaOH a 10% e levar a autoclave por 1 hora a 1 atm (120° C). Esfriar e adicionar 5 ml de HCl (a solução deve ficar fortemente ácida). Aquecer em autoclave a 120° C por 30 minutos. Neutralizar com NaOH a 10% e transferir (por filtração) para balão volumétrico de 200 ml. Completar o volume. Adicionar 0,5 g de carvão ativo se necessário e filtrar. No filtrado, determinar glícides redutores em glicose.

Cálculos:

redutores em glicose $\times$ 0,9 = amido %

Relacionar a percentagem de amido na solução com o peso da amostra original, para saber a percentagem de amido na mesma.

1.5. Determinação de açúcares totais pelo Método de Antrona

-Fundamento:

É um método específico para hexoses. Fundamenta-se na hidrólise pelo ácido sulfúrico concentrado, que quando aquecido com a hexose sofre reação de condensação, formando um produto de coloração verde, cuja intensidade da cor é lida em espectrofotômetro a 620 nm.

-Antrona: (9,10 Dihydro-9 oxoantraceno) $C_{14}H_{10}O$

A antrona é um produto de redução da antraquinona. Foi primeiramente reconhecida por Dreywood (1946) como reagente específico para muitos carboidratos em solução de ácido sulfúrico concentrado produzindo uma cor azul esverdeada característica. Essa cor é atribuída a reação entre o hidroxi metilfurfural (HMF) procedente da hexose e da antrona.

Os carboidratos e seus derivados que não produzem HMF como produto final apresentam uma grande faixa de diferentes cores. Essa propriedade tem sido utilizada na análise diferencial de misturas. A antrona apresenta melhores resultados quando aplicada a soluções puras de hexoses ou seus polímeros, os quais produzem a cor esverdeada característica.

-Material:

Reagentes: Antrona (9,10 dihidro-9-oxoantraceno)

Ácido sulfúrico concentrado p.a.

Solução padrão de glicose (200 µg/ml)

-Vidraria:

beckers de 250 ml

bastão de vidro

Funil

pipetas de 10,1 e 0,1 ml

tubos de ensaio

-Equipamentos:

banho-maria fervente

banho de gelo

espectrofotômetro

balança analítica

centrífuga

-Técnica:

Amostra sólida (extração de glicose AOAC, 1975)

Pesar cerca de 2 g da amostra em cápsula de porcelana.

Transferir para erlenmeyer de 250 ml com auxílio de $\pm$ 50 ml de álcool a 70% e adicionar cerca de 0.5 g de carbonato de cálcio.

Manter em banho-maria a 80-85° C por uma hora sob refluxo com auxílio de funil de gargalo ou haste de vidro.

Retirar o erlenmeyer do banho e deixar em repouso por 15 horas sob temperatura ambiente.

Completar o volume para 100 ml com álcool a 95%.

Agitar, filtrar em papel de filtro para becker de 250 ml.

Colocar o becker em chapa aquecedora para evaporar até cerca de 10 ml.

Adicionar cerca de 10 ml de água destilada lavando as paredes do becker para retirar o resíduo e deixar aquecer na chapa.

Transferir para balão volumétrico de 100ml.

Extração da sacarose:

Pipetar 20 ml do extrato e transferir para erlenmeyer de 125 ml.

Adicionar 0.5 ml de Hcl, ferver 15 minutos em banho-maria.

Resfriar e neutralizar com solução saturada de Na₂ CO₃.

Completar o volume para 50 ml com água destilada. Dosear.

1.6. Cinzas

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

% cinzas = (peso do material seco / peso da amostra) *100

1.7. Fibras

O método consiste de uma extração com detergente ácido (ácido hexacetyl trimetil brometo de amônia, C₁₉H₄₂BrN). 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 lignina e celulose com alguma matéria inorgânica.

% fibras = (peso do material seco / peso da amostra) *100

APÉNDICE 2

APENDICE2 :Gráficos dos ajustes das isotermas de dessorção e adsorção de tâmaras obtidos pelos modelos de BET linearizado, BET, GAB e Halsey para as temperaturas de 60, 70 e 80 °C

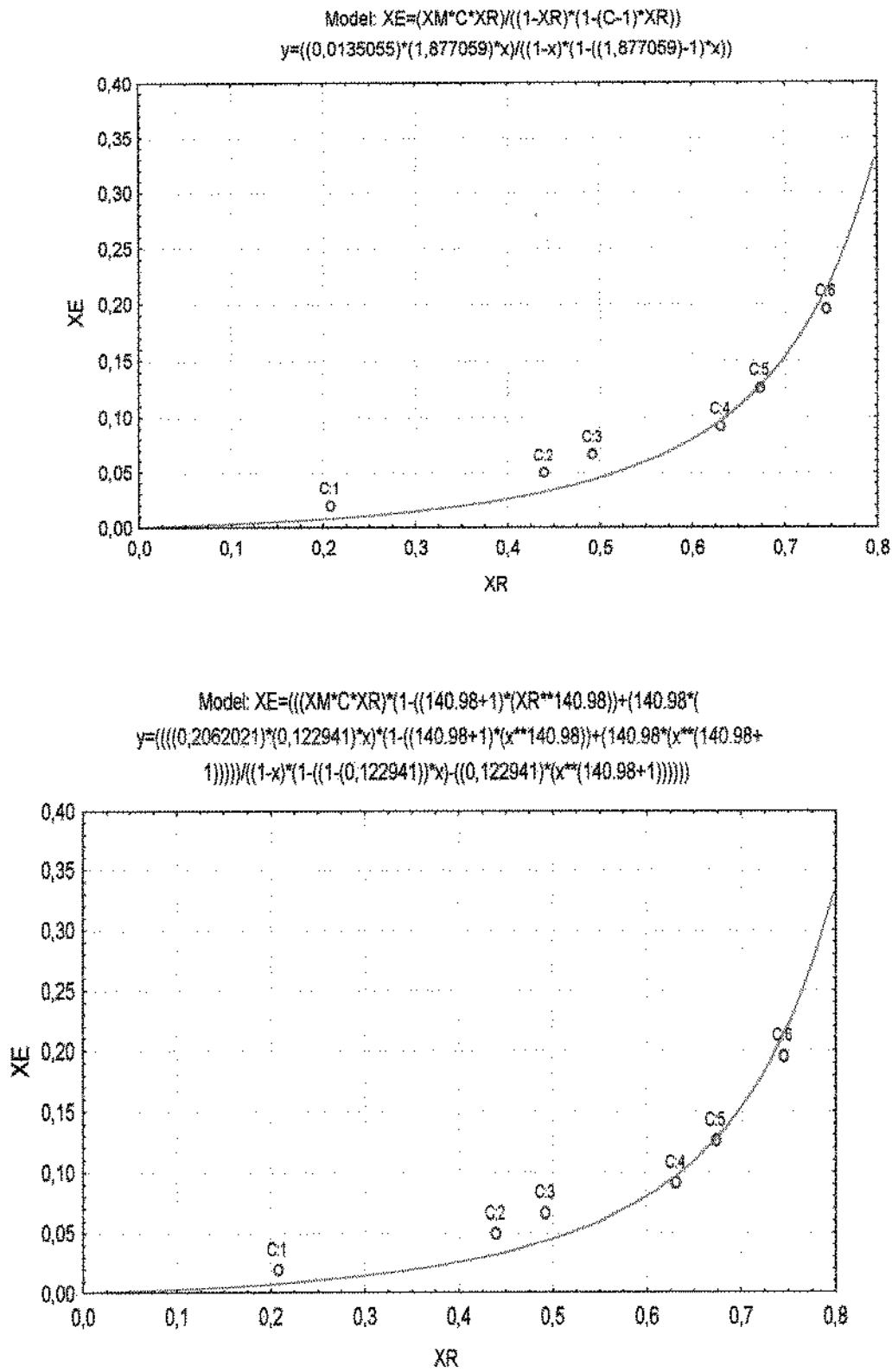


Figura 1 - Isoterma de dessorção na temperatura de 60°C ajustada pelos modelos de BET linearizado e BET

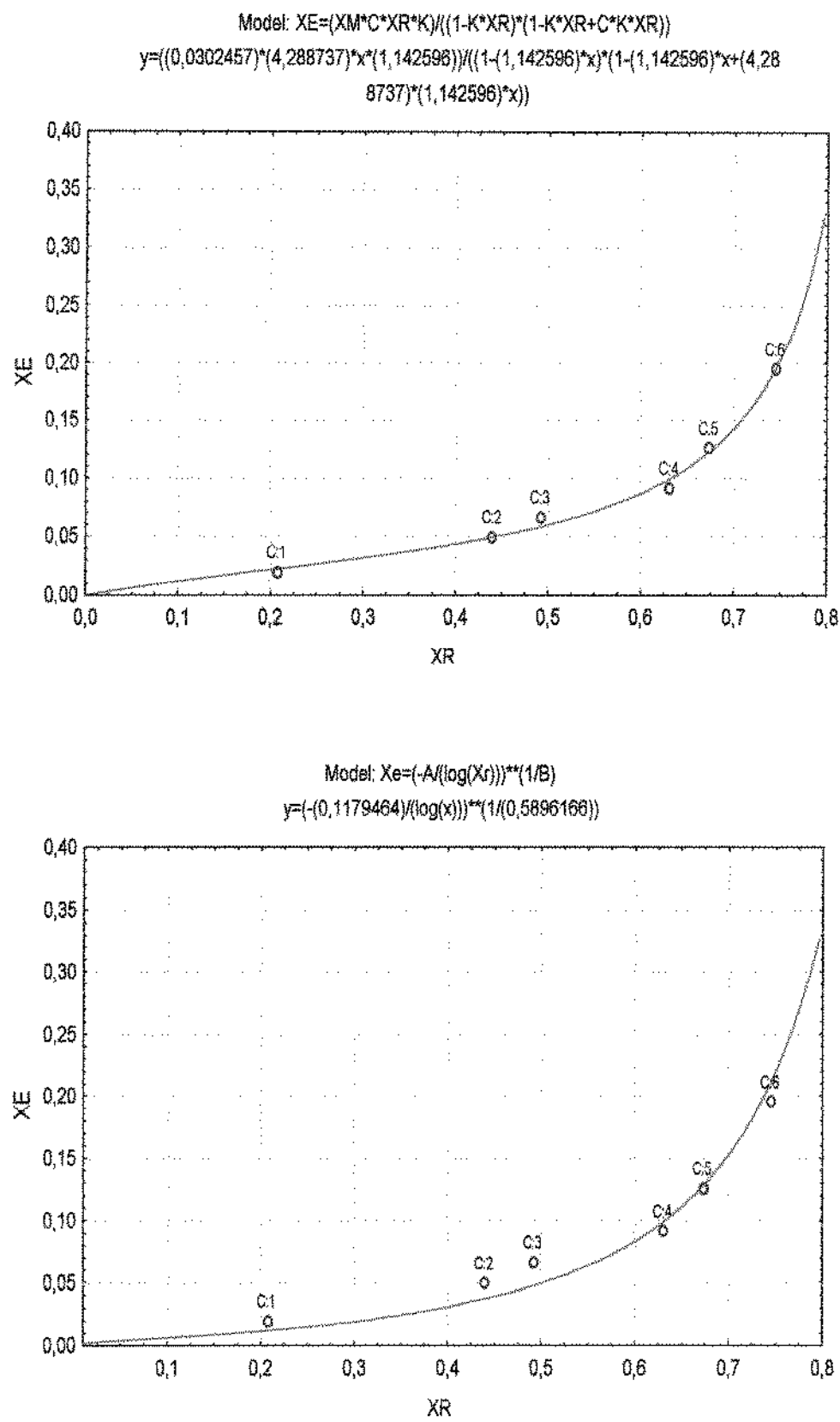


Figura 2 - Isoterma de dessorção na temperatura de 60°C ajustada pelos modelos de GAB e Halsey

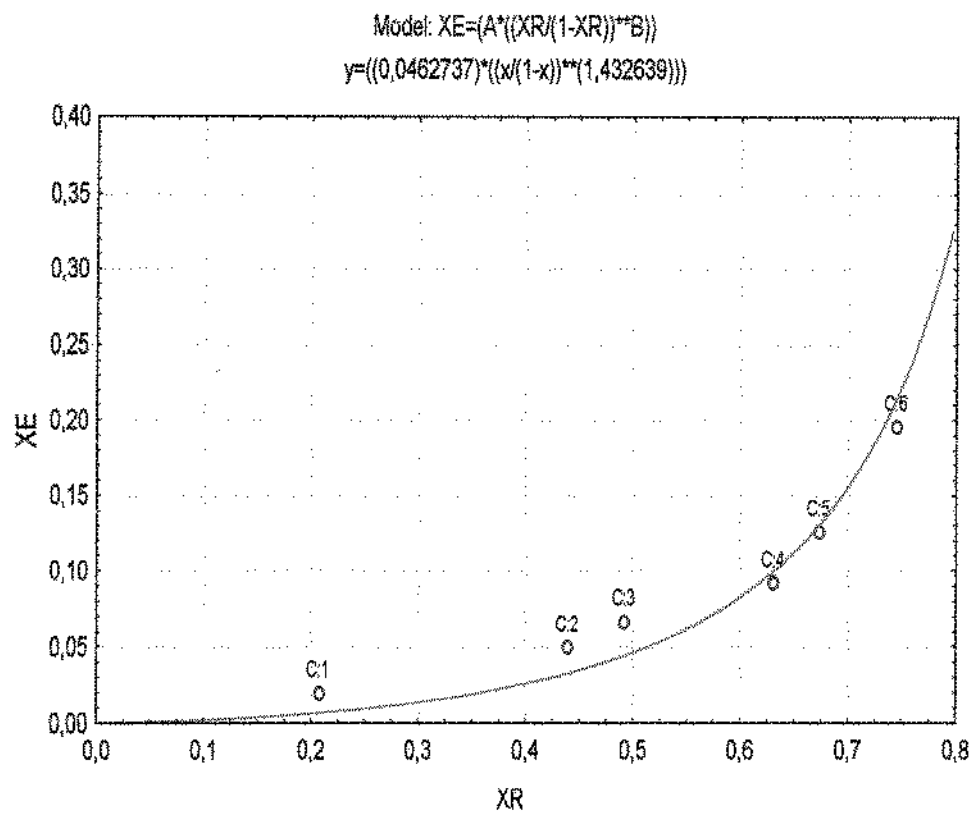


Figura 3 - Isoterma de dessorção na temperatura de 60°C ajustada pelo modelo de Oswin

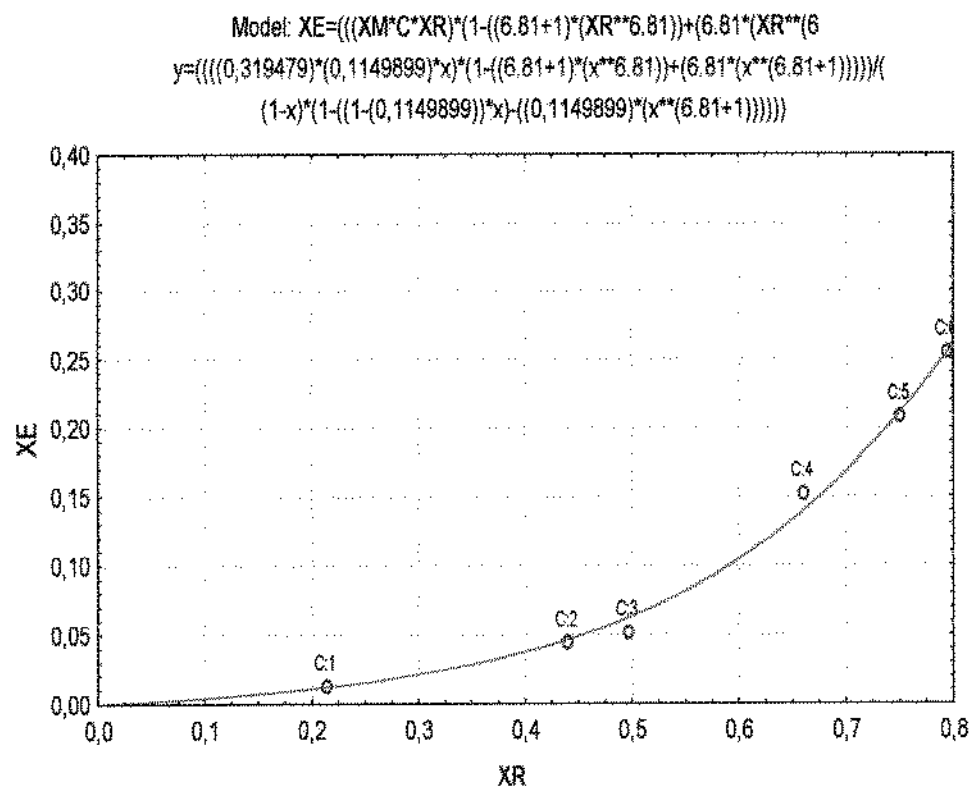
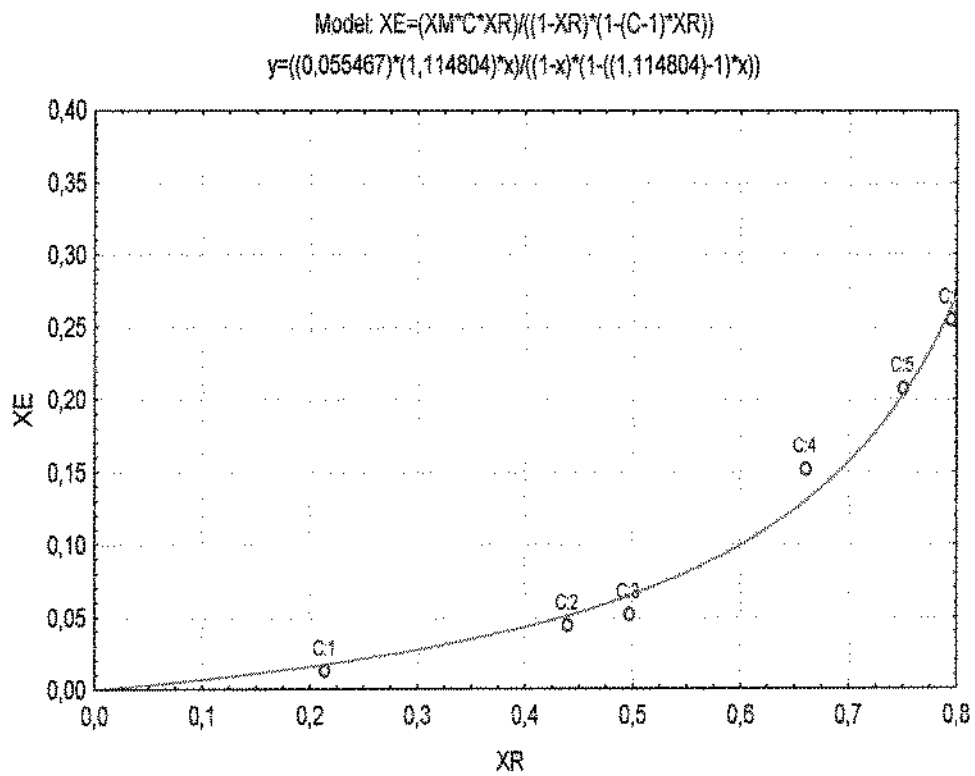


Figura 4 - Isoterma de dessorção na temperatura de 70°C ajustada pelos modelos de BET linearizado e BET

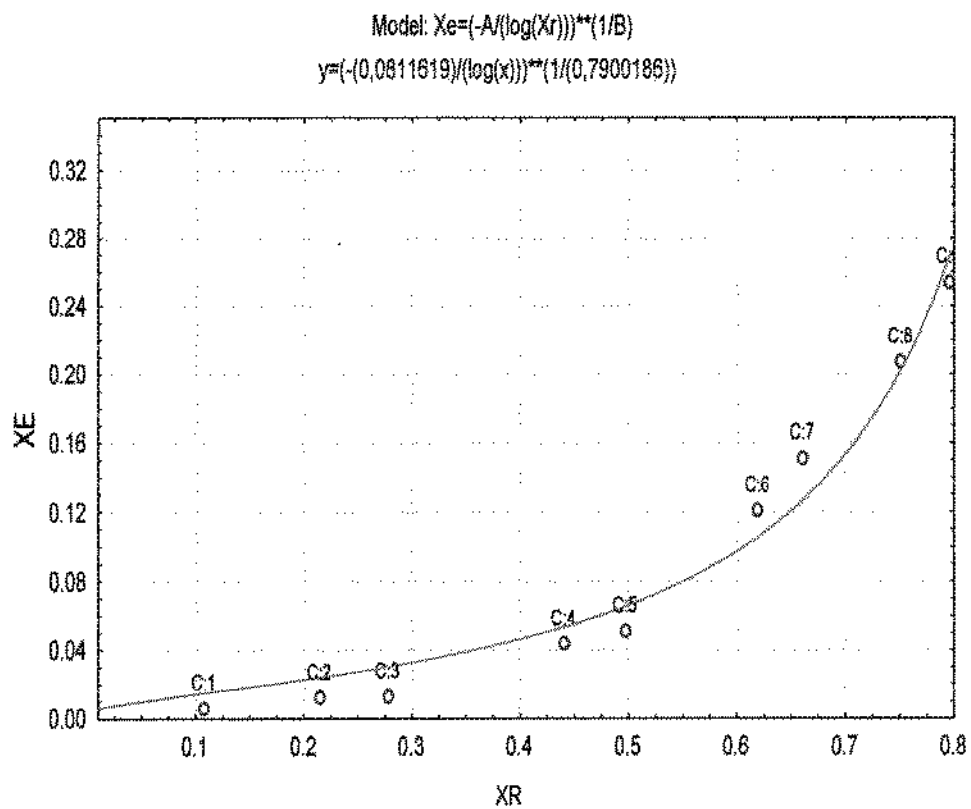
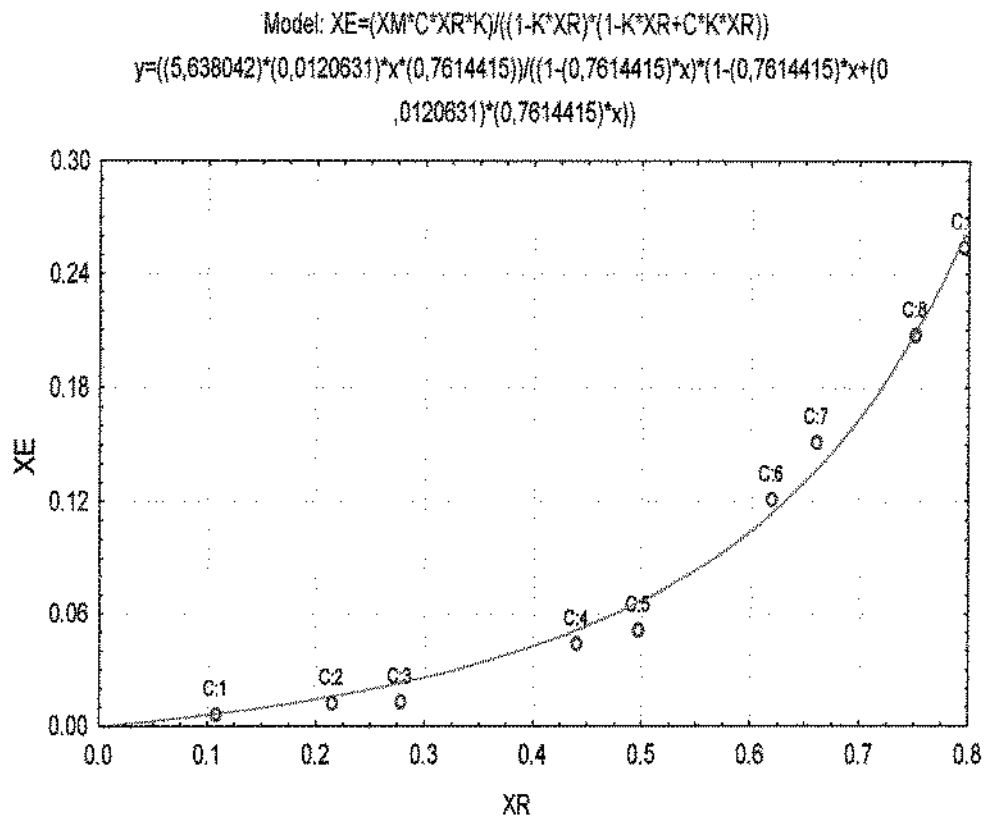


Figura 5 - Isoterma de dessorção na temperatura de 70°C ajustada pelos modelos de GAB e Halsey

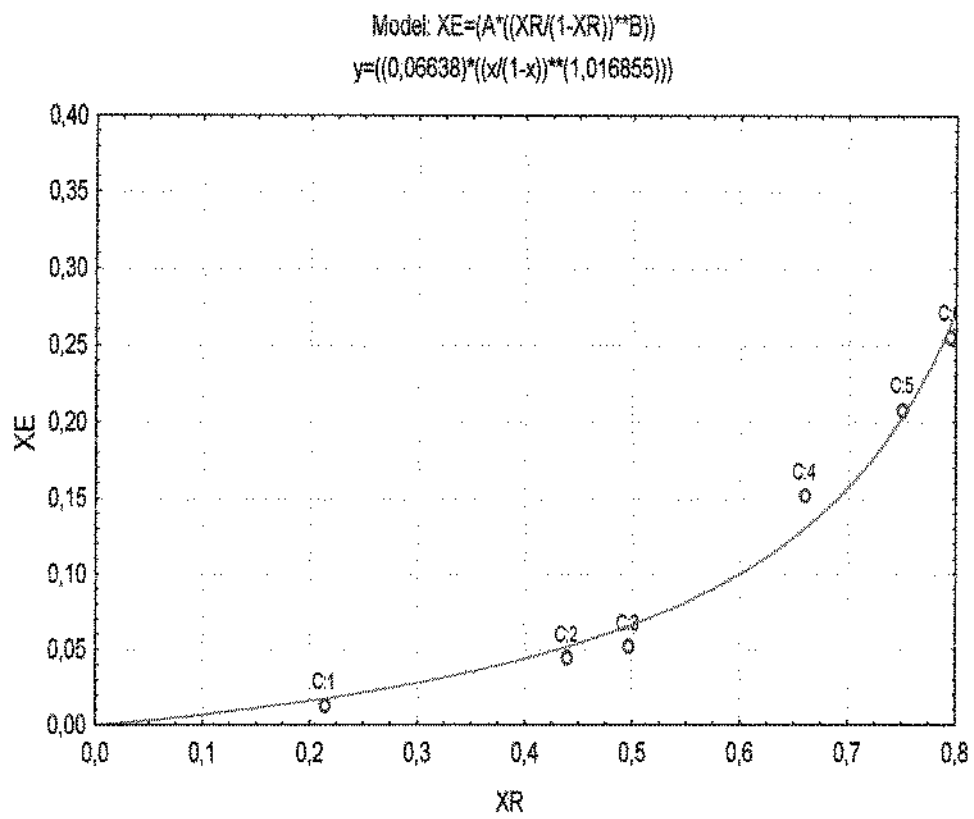


Figura 6 - Isoterma de dessorção na temperatura de 70°C ajustada pelo modelo de Oswin

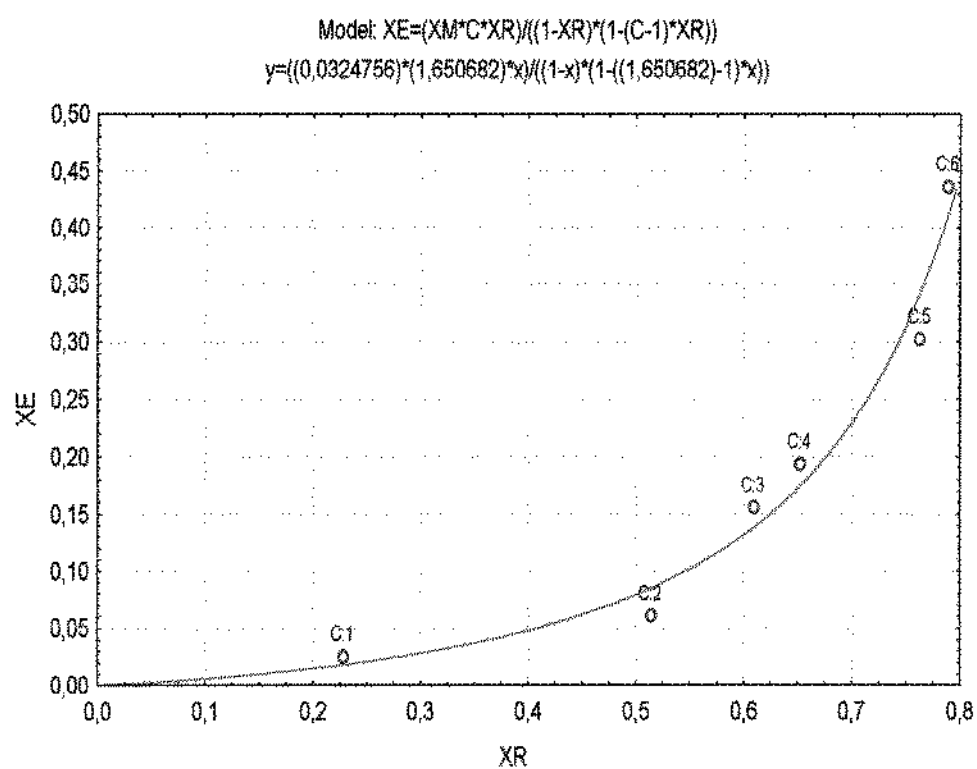
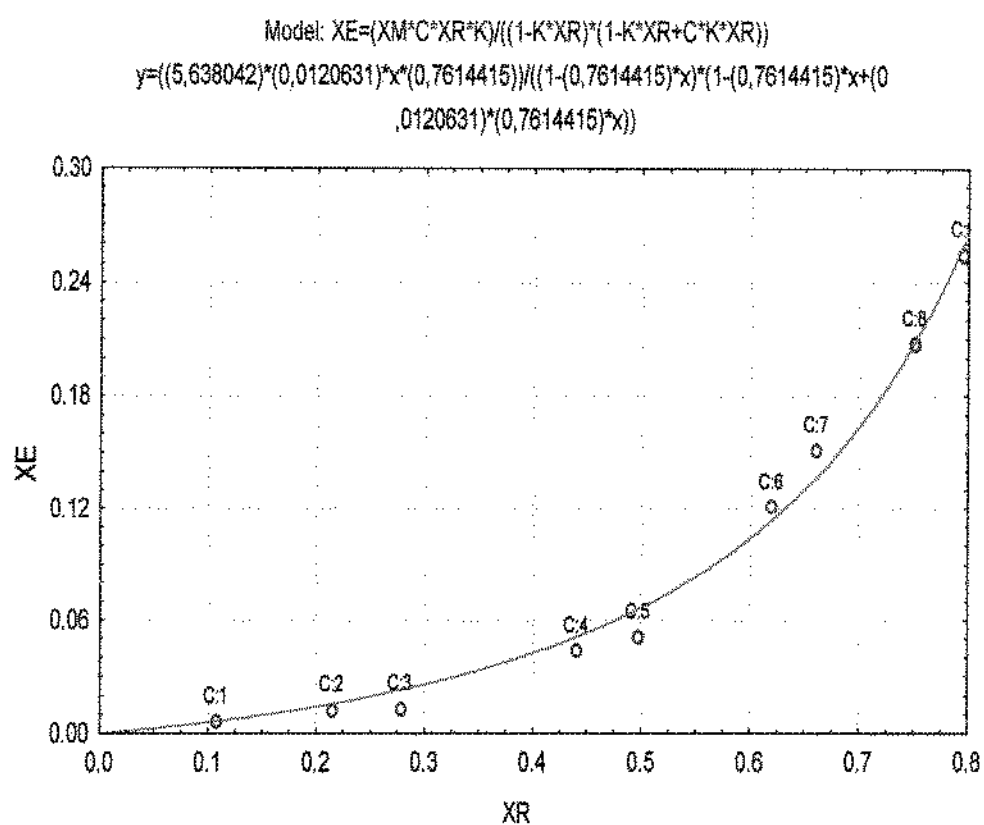


Figura 7. Isoterma de dessorção na temperatura de 80 °C ajustada pelos modelos de Bet linearizado e BET

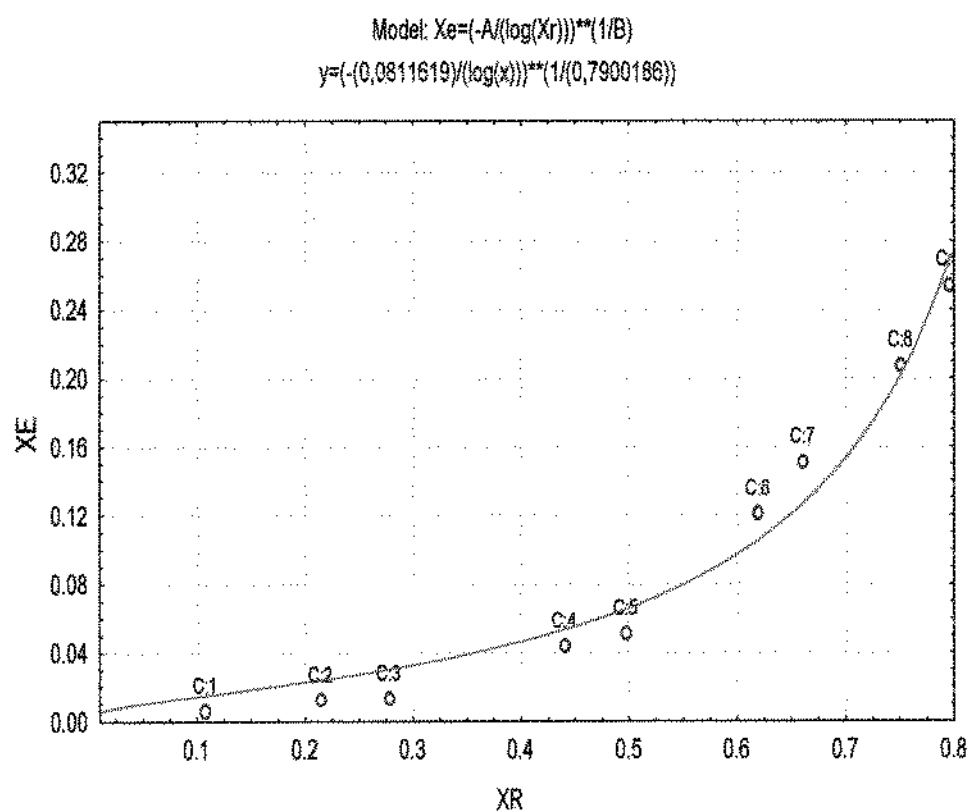
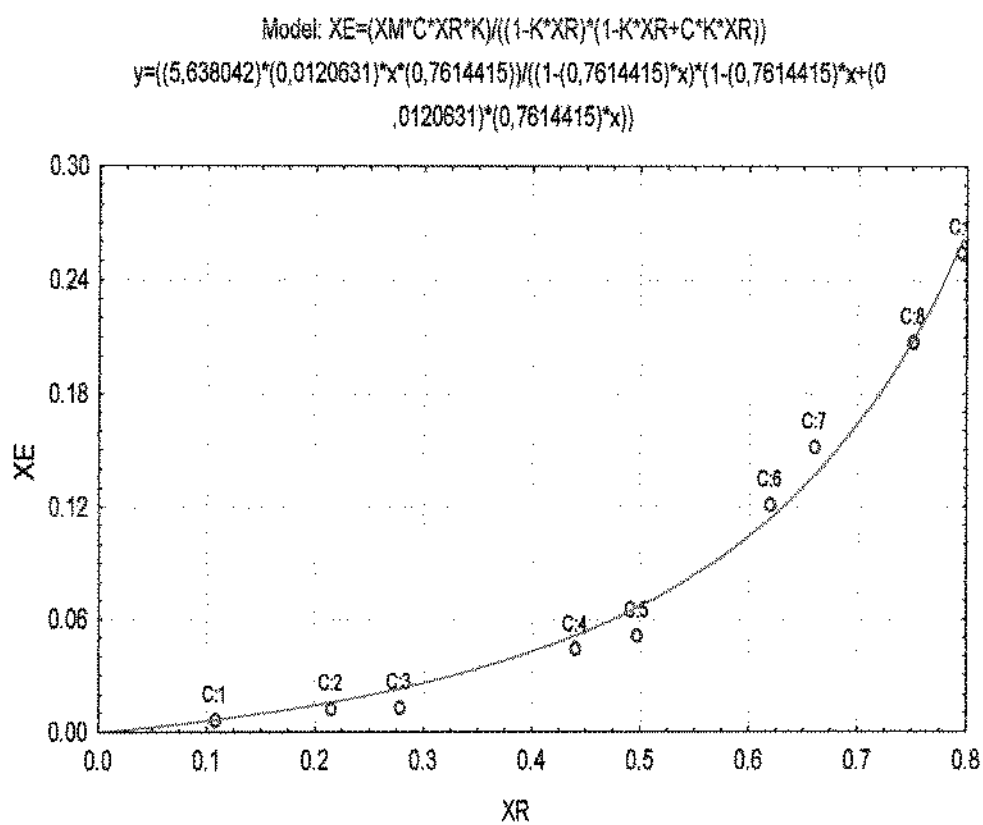


Figura 8 - Isoterma de dessorção na temperatura de 70°C ajustada pelos modelos de GAB e Halsey

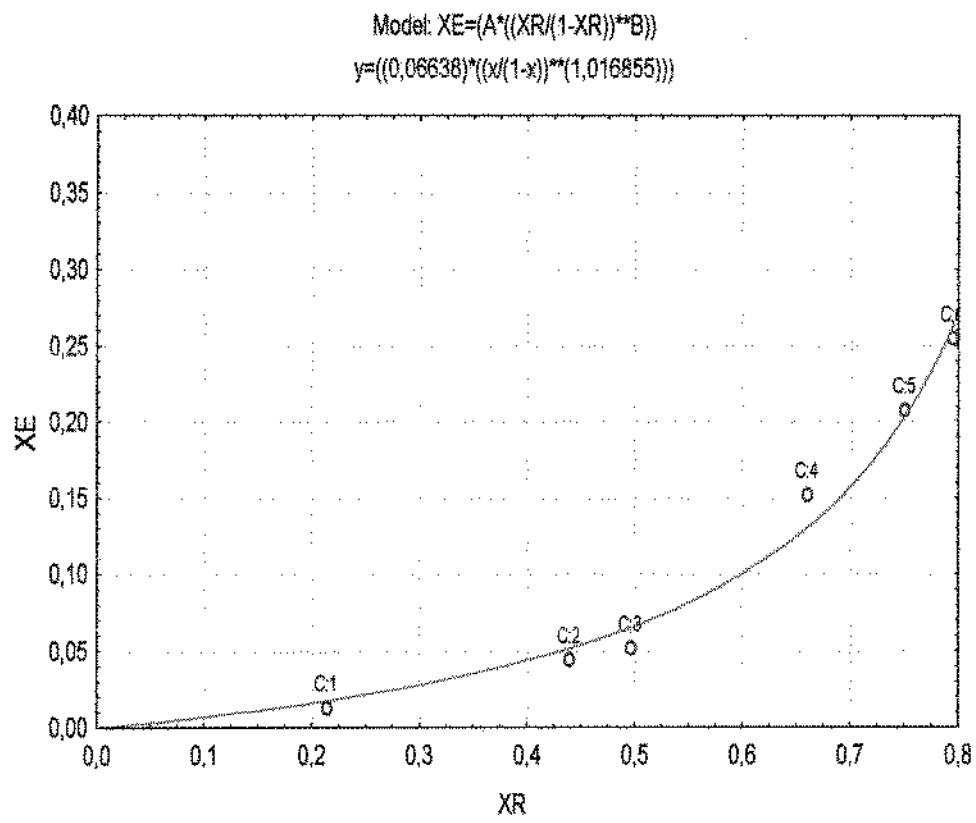


Figura 9 - Isoterma de dessorção na temperatura de 70°C ajustada pelo modelo de Oswin

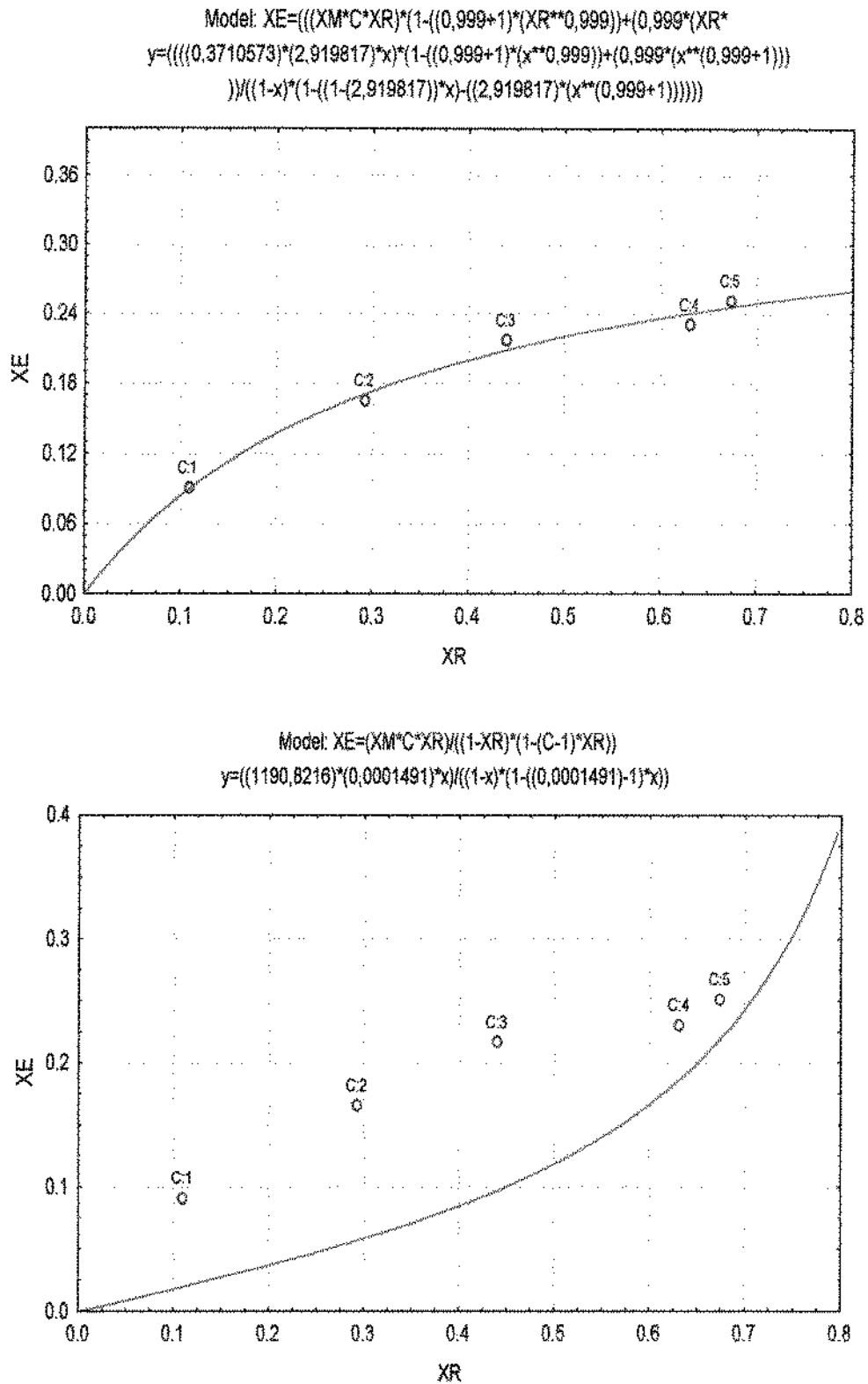


Figura 10. Isoterma de adsorção de tâmaras na temperatura de 60 °C ajustada pelos modelos de BET linearizado e BET

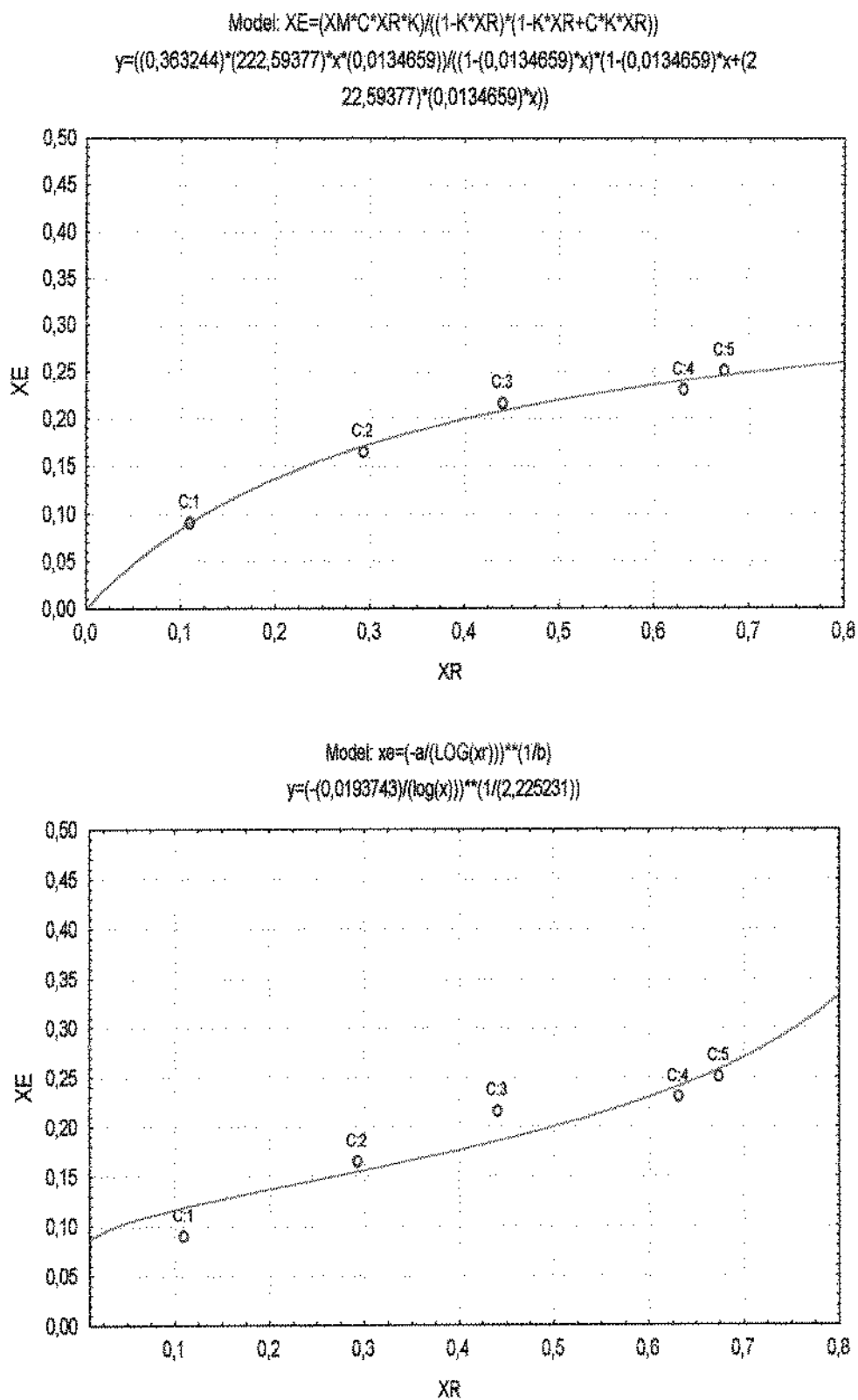


Figura 11 - Isotherma de adsorção na temperatura de 60°C ajustada pelos modelos de GAB e Halsey.

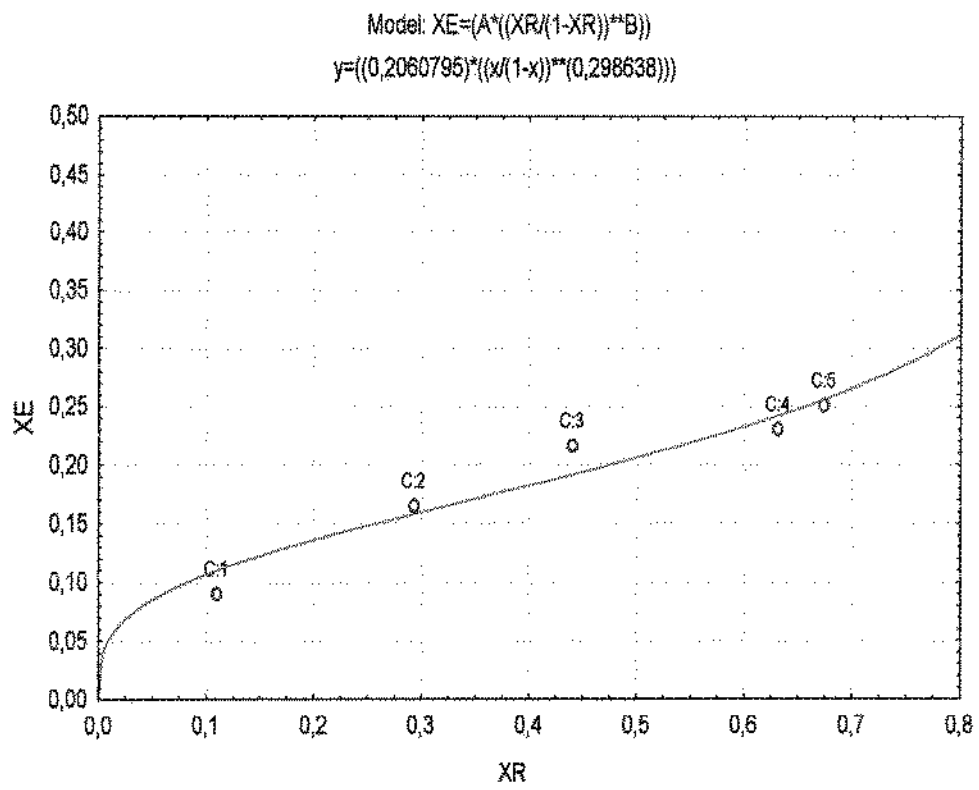


Figura 12 - Isoterma de adsorção na temperatura de 60°C ajustada pelo modelo de Oswin

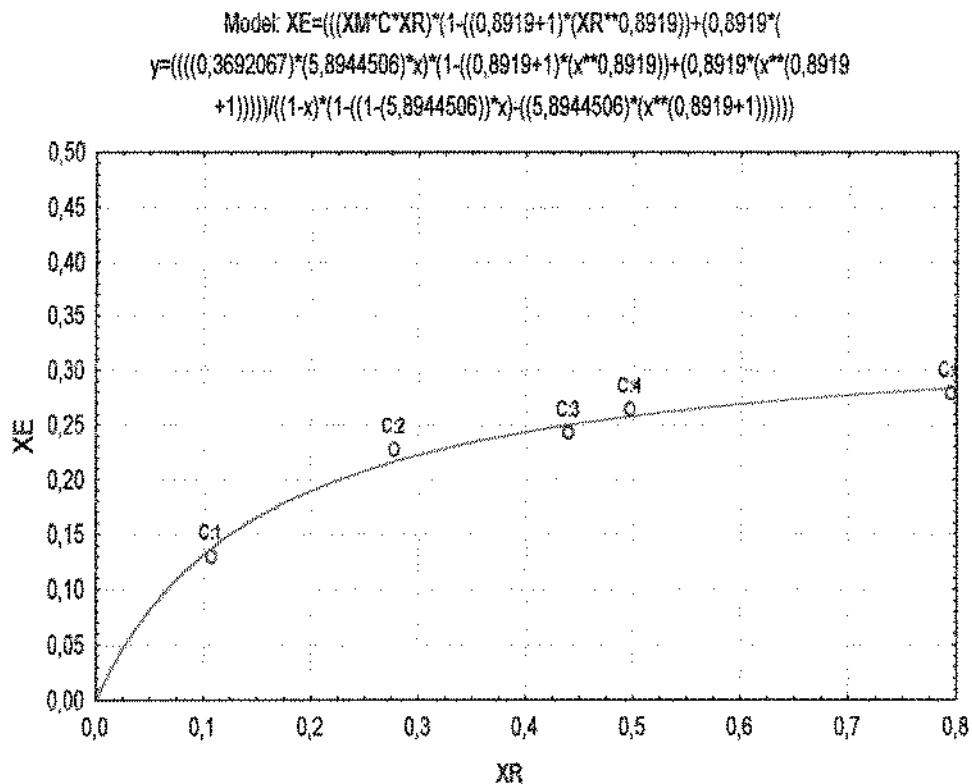
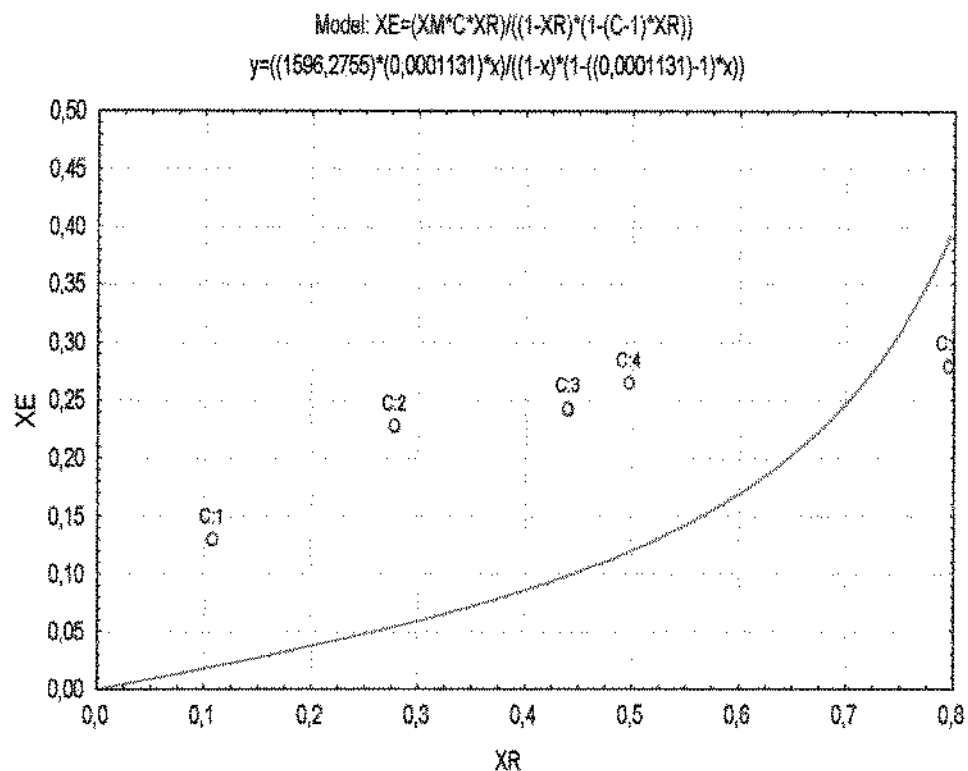


Figura 13 - Isoterma de adsorção na temperatura de 70°C ajustada pelos modelos de BET linearizado e BET

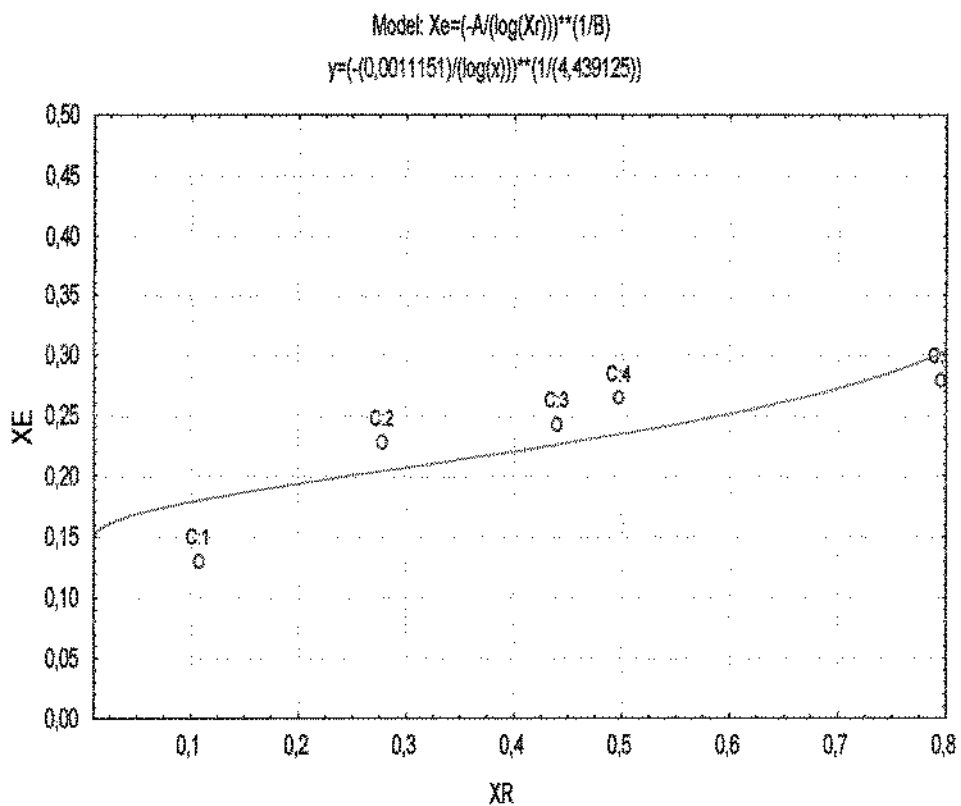
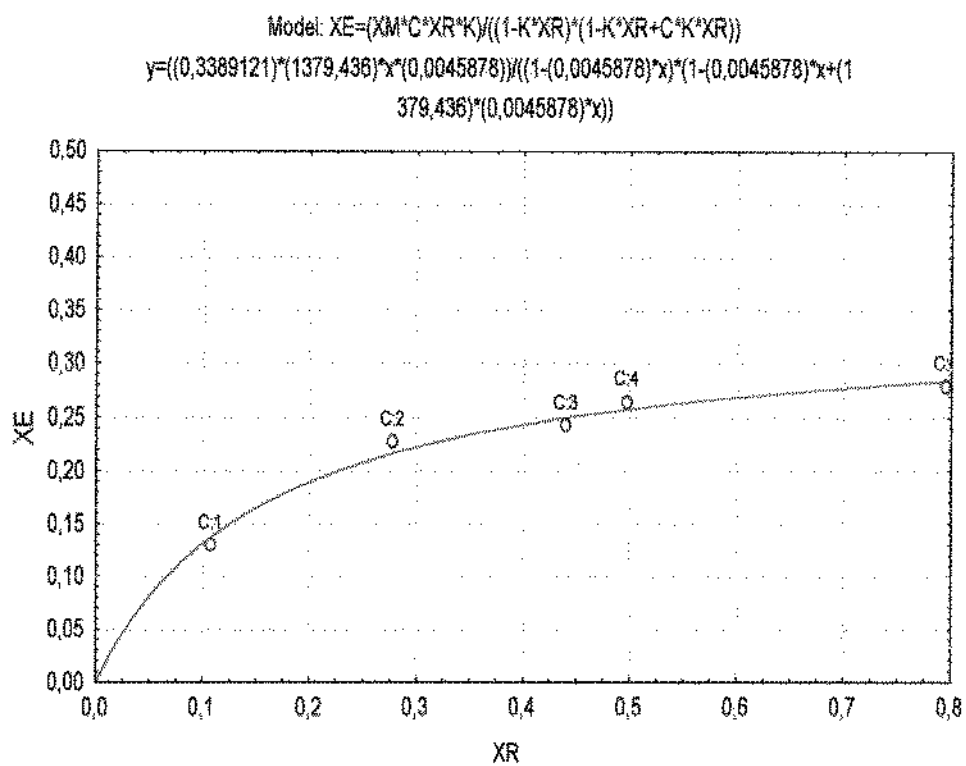


Figura 14 - Isoterma de adsorção na temperatura de 70°C ajustada pelos modelos de GAB e Halsey

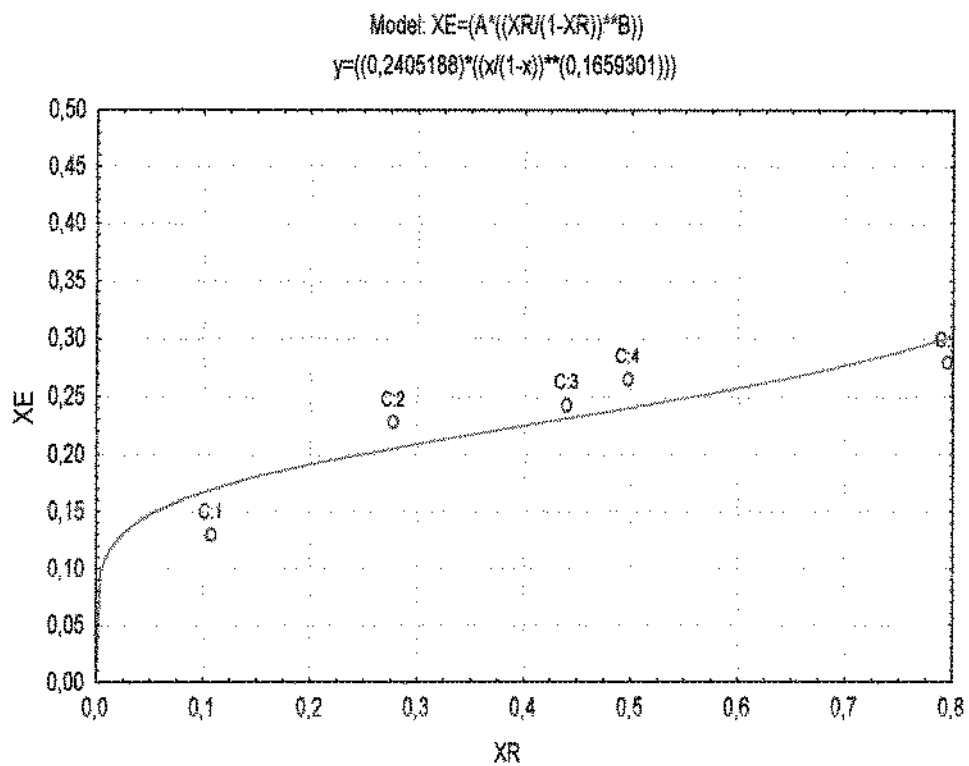


Figura 15 - Isoterma de adsorção na temperatura de 70°C ajustada pelo modelo de Oswin

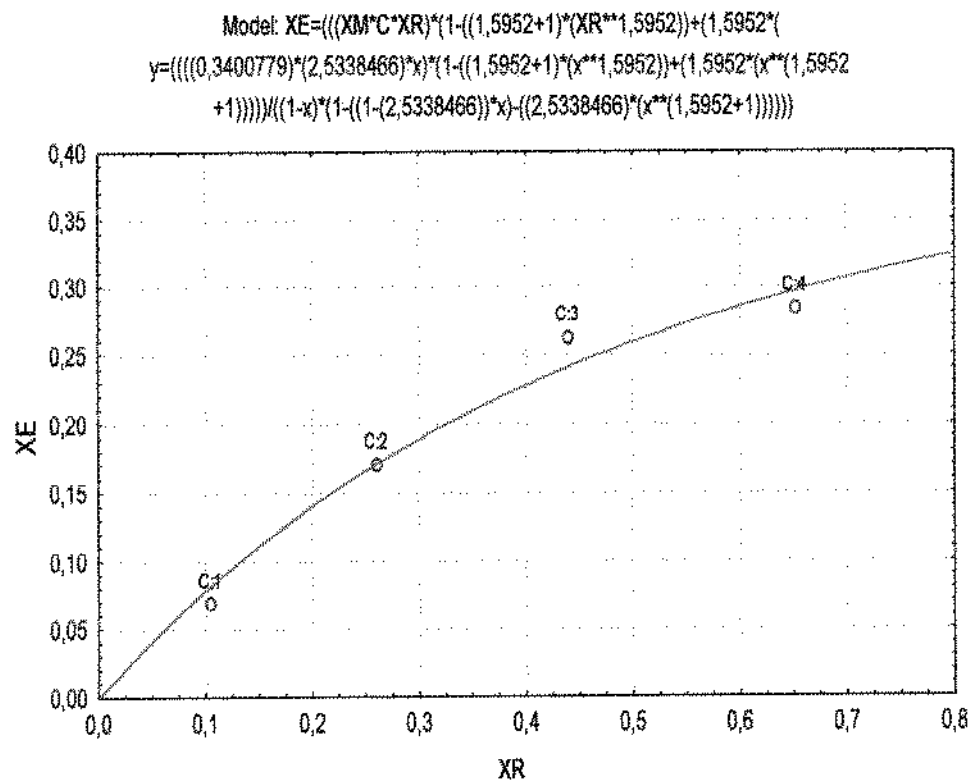
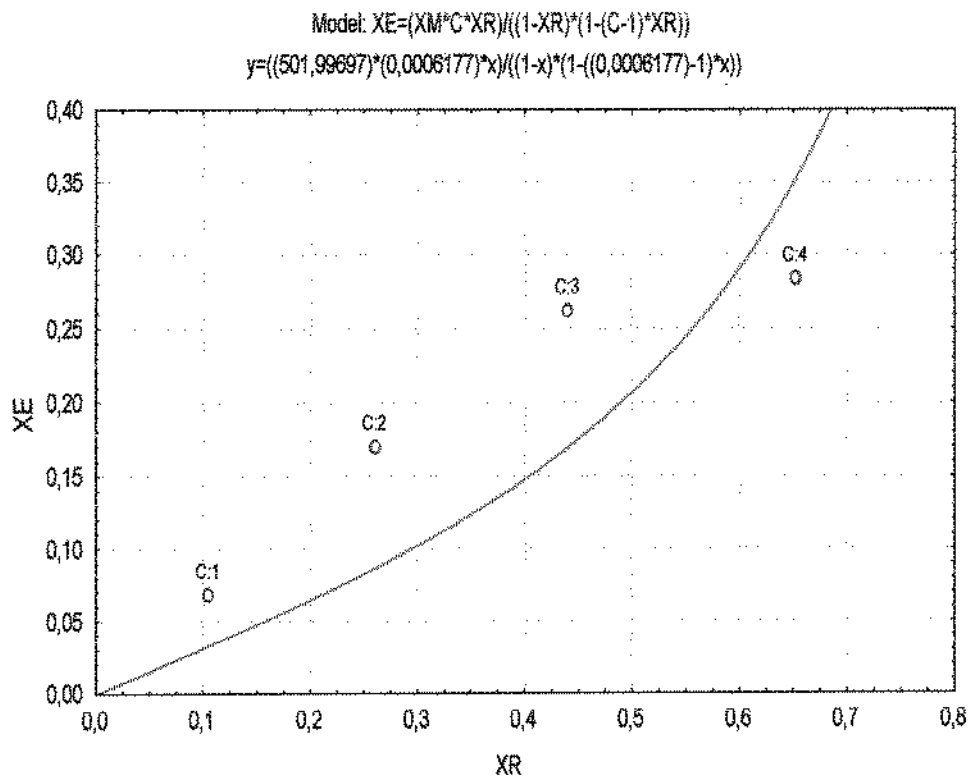


Figura 16 - Isoterma de adsorção na temperatura de 80°C ajustada pelos modelos de BET linearizado e BET

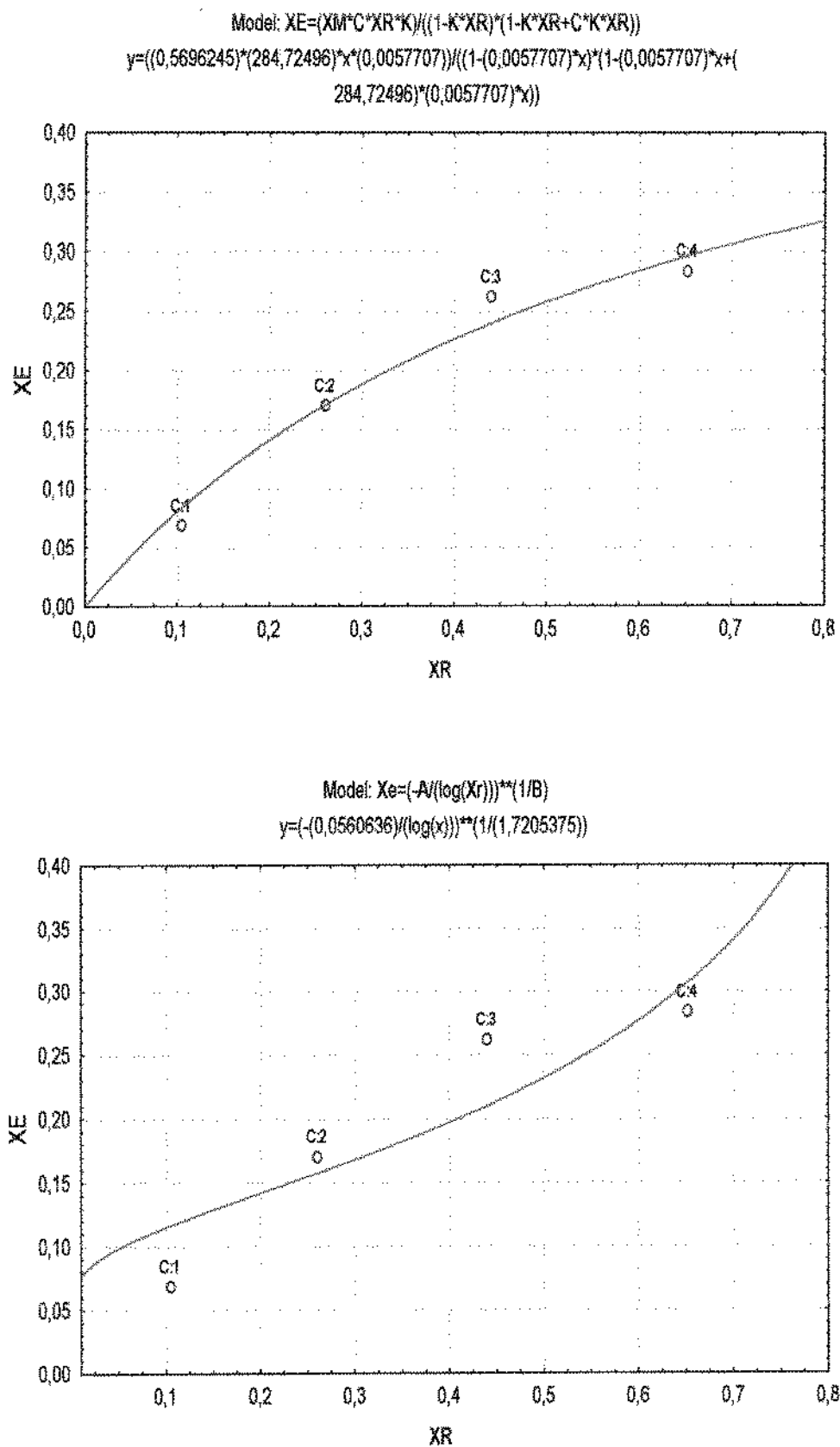


Figura 17 - Isoterma de adsorção na temperatura de 80°C ajustada pelos modelos de GAB e Halsey

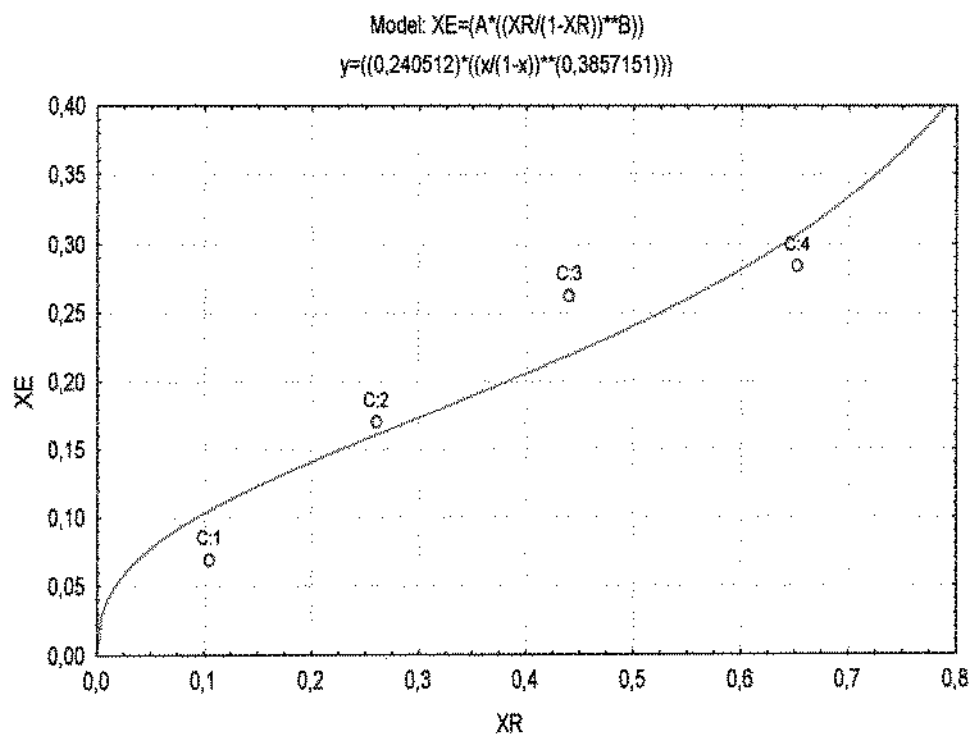


Figura 18 - Isoterma de adsorção na temperatura de 80°C ajustada pelo modelo de Oswin

APÊNDICE 3

APENDICE 3 :Valores utilizados para quantificar o encolhimento das tâmaras e testar as equações propostas por SUZUKI et al. (1976), relacionadas no capítulo 3.

Tabela 1. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 60°C e v = 0,5 m/s

	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
Ubs (%)	RaCST	RaCCT	RaEP	RaEO	EaEP	EaCCT	EaEO
88,9	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	12,73	28,67	9,79
79,2	0,9250	0,9167	0,9188	0,9008	13,32	27,51	12,15
69,4	0,8905	0,8827	0,8847	0,8680	13,30	27,55	12,08
59,5	0,8164	0,8003	0,8046	0,7674	14,00	26,14	15,21
25,8	0,7752	0,7561	0,7613	0,7157	14,31	25,49	16,72
24,4	0,7258	0,6997	0,7070	0,6412	14,99	24,05	20,31

RaCST= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
RaCCT= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
RaEP= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
RaEO= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 2. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 60°C e v = 1,0m/s

	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
Ubs (%)	RaCST	RaCCT	RaEP	RaEO	EaEP	EaCCT	EaEO
70,1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	12,65	9,50	28,23
60,7	0,9556	0,9548	0,9550	0,9534	12,71	9,71	28,72
51,4	0,9270	0,9276	0,9274	0,9282	12,61	9,34	28,91
43,4	0,8568	0,8448	0,8479	0,8216	13,56	13,22	27,02
36,4	0,8366	0,8224	0,8261	0,7946	13,75	14,04	26,65
17,6	0,8060	0,7893	0,7937	0,7555	13,99	15,17	26,15

RaCST= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
RaCCT= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
RaEP= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
RaEO= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 3. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 60°C e $v = 1,5\text{m/s}$

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	Ra _{CST}	Ra _{CCT}	Ra _{EP}	Ra _{EO}	Ea _{EP}	Ea _{EO}	Ea _{CCT}
86,2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	13,38	12,42	27,39
74,5	0,9312	0,9234	0,9256	0,9060	13,91	14,79	26,32
64,0	0,8736	0,8565	0,8614	0,8160	14,59	18,19	24,89
53,4	0,8139	0,7911	0,7978	0,7350	15,09	20,21	23,81
44,7	0,7723	0,7483	0,7554	0,6886	15,27	21,91	22,43
22,69	0,7274	0,6974	0,7067	0,6198	15,85	25,37	22,14

Ra_{CST}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
Ra_{CCT}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
Ra_{EP}= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
Ra_{EO}= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 4. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 70°C e $v = 0,5\text{m/s}$

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	Ra _{CST}	Ra _{CCT}	Ra _{EP}	Ra _{EO}	Ea _{EP}	Ea _{EO}	Ea _{CCT}
138	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	11,85	6,79	30,37
104	0,9499	0,9535	0,9527	0,9579	11,58	6,00	30,87
70,9	0,8369	0,8218	0,8254	0,7982	13,06	11,10	28,02
45,9	0,7438	0,7238	0,7287	0,6897	13,64	13,56	26,86
6,4	0,6794	0,6536	0,6602	0,6056	14,35	16,92	25,41

Ra_{CST}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
Ra_{CCT}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
Ra_{EP}= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
Ra_{EO}= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 5. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 70°C e $v = 1,0\text{m/s}$

	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
Ubs (%)	Ra _{CST}	Ra _{CCT}	Ra _{EP}	Ra _{EO}	Ea _{EP}	Ea _{EO}	Ea _{CCT}
137	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	12,72	9,78	28,68
110	0,9385	0,9333	0,9360	0,9293	12,96	10,68	28,23
83,5	0,8811	0,8774	0,8783	0,8704	13,01	10,88	28,12
57,8	0,8159	0,8021	0,80857	0,7743	13,82	14,38	26,50
39,2	0,7850	0,7446	0,7773	0,7542	13,59	13,33	26,97
24,3	0,7529	0,7381	0,7420	0,7078	13,99	15,19	26,15

Ra_{CST}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
Ra_{CCT}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
Ra_{EP}= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
Ra_{EO}= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 6. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 70°C e $v = 1,5\text{m/s}$

	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
Ubs (%)	Ra _{CST}	Ra _{CCT}	Ra _{EP}	Ra _{EO}	Ea _{EP}	Ea _{EO}	Ea _{CCT}
104	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	12,85	10,27	28,43
77,0	0,9001	0,8879	0,8911	0,8632	13,72	13,94	26,69
54,2	0,8777	0,8624	0,8665	0,8306	13,97	15,08	26,19
36,9	0,8321	0,8164	0,82067	0,7834	14,06	15,51	26,00
24,7	0,7832	0,7612	0,7673	0,7126	14,63	18,36	24,82
15,2	0,7717	0,7520	0,7574	0,7093	14,46	17,52	25,16

Ra_{CST}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
Ra_{CCT}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
Ra_{EP}= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
Ra_{EO}= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 7. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 80°C e v = 0,5m/s

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	Ra _{CST}	Ra _{CCT}	Ra _{EP}	Ra _{EO}	Ea _{EP}	Ea _{EO}	Ea _{CCT}
146	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	11,94	7,06	30,20
81,4	0,8745	0,8607	0,8640	0,8387	13,00	10,85	28,14
39,9	0,7948	0,7778	0,7819	0,7495	13,37	12,36	27,42
20,4	0,7879	0,7713	0,77537	0,7438	13,34	12,26	27,46
12,1	0,7478	0,7280	0,7329	0,6934	13,70	13,82	26,75

Ra_{CST}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
Ra_{CCT}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
Ra_{EP}= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
Ra_{EO}= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 8. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 80°C e v = 1,0m/s

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	Ra _{CST}	Ra _{CCT}	Ra _{EP}	Ra _{EO}	Ea _{EP}	Ea _{EO}	Ea _{CCT}
160	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	13,31	12,11	27,53
79,3	0,8571	0,8588	0,8583	0,8622	13,18	11,58	27,78
35,5	0,7537	0,7435	0,7464	0,7208	14,15	15,94	25,82
18,1	0,7109	0,6987	0,7022	0,6709	14,37	17,04	25,36
11,7	0,6676	0,6548	0,6584	0,6250	14,50	17,72	25,08

Ra_{CST}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
Ra_{CCT}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
Ra_{EP}= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
Ra_{EO}= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 9. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 80°C e $v = 1,5\text{m/s}$

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	RaCST	RaCCT	RaEP	RaEO	EaEP	EaEO	EaCCT
138	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	11,45	5,64	31,12
67,8	0,8389	0,8208	0,8249	0,7935	12,93	10,56	28,28
28,5	0,7173	0,6848	0,6930	0,6273	14,46	17,49	25,18
13,8	0,6481	0,6107	0,6206	0,5386	15,21	21,59	23,55
9,7	0,6302	0,5929	0,6028	0,5201	15,31	22,14	23,34

RaCST= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
RaCCT= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
RaEP= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
RaEO= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 10. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 60°C e $v = 0,5\text{m/s}$ (fotos)

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	RaCST	RaCCT	RaEP	RaEO	EaEP	EaCCT	EaEO
89,0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	11,34	28,85	4,28
79,2	0,9323	0,9233	0,9047	0,8322	13,97	27,60	14,55
69,4	0,8877	0,8748	0,8217	0,6628	17,93	26,97	28,53
59,5	0,8056	0,7815	0,7677	0,6641	15,50	25,00	21,08
50,8	0,7590	0,7323	0,7433	0,5466	13,16	24,32	14,12

RaCST= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
RaCCT= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
RaEP= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
RaEO= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 11. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 60°C e v = 1,0m/s (fotos)

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	RaCST	RaCCT	RaEP	RaEO	EaEP	EaCCT	EaEO
70,1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	12,42	8,67	29,27
60,7	0,9433	0,9468	0,9460	0,9521	12,17	7,82	29,75
51,4	0,9032	0,8977	0,9125	0,9390	11,52	5,05	28,48
43,4	0,8377	0,8213	0,8662	0,9358	9,44	2,02	26,75
36,4	0,7571	0,7429	0,7851	0,8548	9,18	3,11	26,85
17,6	0,7134	0,7014	0,7168	0,7230	12,00	7,45	27,08

RaCST= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
RaCCT= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
RaEP= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
RaEO= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 12. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 60°C e v = 1,5m/s (fotos)

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	RaCST	RaCCT	RaEP	RaEO	EaEP	EaEO	EaCCT
86,2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,35	35,81	25,42
74,5	0,9118	0,9083	0,9492		3,73	51,49	24,95
64,0	0,8480	0,8371	0,8663	0,8679	1,80	38,99	23,80
53,4	0,7703	0,7576	0,7949	0,8015	2,84	41,33	23,36
44,7	0,7247	0,7117	0,7417	0,7324	1,99	37,27	23,18
22,69	0,6837	0,6643	0,7168	0,7089	4,47	40,84	21,86

RaCST= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
RaCCT= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
RaEP= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
RaEO= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 13. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 70°C e v = 0,5m/s ((fotos)

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	RaCST	RaCCT	RaEP	RaEO	EaEP	EaEO	EaCCT
138	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	11,90	6,95	30,26
104	0,9736	0,9797	0,9785	0,9869	11,47	5,69	31,08
70,9	0,9062	0,9082	0,9077	0,9107	11,75	6,48	30,56
45,9	0,9062	0,9082	0,8808	0,8049	14,37	17,34	30,56
6,4	0,7474	0,7407	0,7169	0,6377	15,50	20,61	29,10

RaCST= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
RaCCT= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
RaEP= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
RaEO= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 14. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 70°C e v = 1,0m/s (fotos)

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	RaCST	RaCCT	RaEP	RaEO	EaEP	EaEO	EaCCT
137	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	12,29	8,22	29,52
110	0,9779	0,9783	0,9715	0,9530	12,86	10,55	29,57
83,5	0,8655	0,8520	0,8819	0,9247	10,63	1,95	27,50
57,8	0,8439	0,8353	0,8502	0,8686	11,63	5,53	28,21
39,2	0,7573	0,7336	0,7678	0,7845	11,07	4,93	25,97
24,3	0,6919	0,6739	0,6987	0,7083	11,43	6,05	26,15

RaCST= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
RaCCT= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
RaEP= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
RaEO= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 15. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 70°C e v = 1,5m/s (fotos)

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	Ra _{CST}	Ra _{CCT}	Ra _{EP}	Ra _{EO}	Ea _{EP}	Ea _{EO}	Ea _{CCT}
104	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	9,78	2,19	29,49
77,0	0,9549	0,9506	0,9458	0,9209	10,64	1,44	28,90
54,2	0,8369	0,8100	0,8373	0,8112	9,74	0,94	25,32
36,9	0,8261	0,8016	0,79957	0,7194	12,68	10,99	25,66
24,7	0,8043	0,7849	0,7814	0,7143	12,35	9,23	26,35
15,2	0,7324	0,7051	0,6925	0,5822	14,70	18,76	24,66

Ra_{CST}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
Ra_{CCT}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
Ra_{EP}= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
Ra_{EO}= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 16. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 80°C e v = 0,5m/s (fotos)

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	Ra _{CST}	Ra _{CCT}	Ra _{EP}	Ra _{EO}	Ea _{EP}	Ea _{EO}	Ea _{CCT}
146	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	8,60	7,05	28,95
81,4	0,8792	0,8863	0,8594	0,8080	10,66	1,60	30,00
39,9	0,7727	0,7667	0,7544	0,7055	10,77	2,25	27,94
20,4	0,7524	0,7422	0,7189	0,6336	12,66	9,85	27,21
12,1	0,7524	0,7422	0,7189	0,6336	12,66	9,85	27,21

Ra_{CST}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
Ra_{CCT}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
Ra_{EP}= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
Ra_{EO}= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 17. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 80°C e v = 1,0m/s (fotos)

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	Ra _{CST}	Ra _{CCT}	Ra _{EP}	Ra _{EO}	Ea _{EP}	Ea _{EO}	Ea _{CCT}
160	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	13,60	13,17	27,76
79,3	0,8819	0,8832	0,8899	0,9125	12,81	10,14	27,95
35,5	0,7710	0,7638	0,7808	0,8028	12,50	9,59	26,57
18,1	0,7294	0,7178	0,7387	0,7534	12,50	10,31	25,72
11,7	0,6744	0,6619	0,6852	0,7013	12,23	9,71	25,37

Ra_{CST}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
Ra_{CCT}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
Ra_{EP}= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
Ra_{EO}= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 18. Razão entre a área no instante da secagem e a área inicial na temperatura de 80°C e v = 1,5m/s (fotos)

Ubs (%)	Razão entre as áreas e a área inicial				Erros relativos (%)		
	Ra _{CST}	Ra _{CCT}	Ra _{EP}	Ra _{EO}	Ea _{EP}	Ea _{EO}	Ea _{CCT}
138	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	10,33	0,27	28,57
67,8	0,9405	0,9537	0,9057	0,8087	13,64	14,24	30,38
28,5	0,7917	0,7859	0,7907	0,7849	10,44	1,12	27,63
13,8	0,7812	0,7778	0,7452	0,6549	14,47	16,40	28,00
9,7	0,6882	0,6673	0,6925	0,6757	9,78	2,09	24,67

Ra_{CST}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro sem tampa
Ra_{CCT}= razão entre a área inicial e a área final do cilindro com tampa
Ra_{EP}= razão entre a área inicial e a área final da elipse prolata
Ra_{EO}= razão entre a área inicial e a área final da elipse oblata

Tabela 19. Ajuste não linear para as áreas calculadas através das medidas obtidas pelo paquímetro e o Modelo Uniforme 1.

CURVA	AEO		AEP		AEC		ACCT	
	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.
6005	1,2942	3,33	1,0316	3,11	0,9567	2,97	1,0602	3,13
6010	0,8975	2,58	0,7538	2,07	0,7077	1,89	0,7702	2,12
6015	1,4214	3,94	1,0332	3,16	0,9436	2,88	1,0725	3,25
7005	0,8582	2,95	0,7007	2,05	0,6560	1,77	0,7159	2,15
7010	0,6373	1,11	0,5584	0,51	0,5331	0,35	0,5673	0,58
7015	0,7249	14,04	0,5755	1,31	0,5324	1,16	0,5918	1,37
8005	0,5440	13,48	0,4626	1,42	0,4316	1,27	0,4726	1,47
8010	0,5461	25,77	0,4926	1,36	0,4781	1,23	0,4985	1,42
8015	0,9039	47,37	0,7104	1,84	0,6469	1,71	0,7331	1,95

Tabela 20. Ajuste não linear para as áreas calculadas através das medidas obtidas pelo paquímetro e o Modelo Uniforme 2.

CURVA	AEO		AEP		AEC		ACCT	
	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.
6005	1,1246	3,45	0,8956	3,26	0,8304	3,12	0,9206	3,30
6010	0,7995	2,62	0,6712	2,11	0,6302	1,94	0,6859	2,17
6015	1,2663	4,12	0,9196	3,29	0,8398	3,00	0,9547	3,39
7005	0,7376	2,79	0,6261	1,92	0,5860	1,65	0,6396	2,02
7010	0,5512	1,03	0,4829	0,44	0,4609	0,28	0,4906	0,51
7015	0,6235	2,01	0,4948	1,32	0,4578	1,17	0,5089	1,38
8005	0,4363	2,07	0,3709	1,67	0,3461	1,48	0,3790	1,72
8010	0,4851	1,72	0,4376	1,24	0,4246	1,11	0,4427	1,29
8015	0,7040	2,50	0,5527	1,38	0,5032	1,29	0,5704	1,47

Tabela 21. Ajuste linear para as áreas calculadas através das medidas obtidas pelo paquímetro e o Modelo Uniforme 1.

curva	AEO			AEP			AEC			ACCT		
	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro
6005	0,04	1,11	7,01	-0,35	0,87	37,11	-0,03	0,80	2,48	-0,35	0,89	37,53
6010	-0,12	0,84	11,11	-0,16	0,68	15,39	-0,17	0,62	16,65	-0,15	0,69	14,95
6015	0,04	1,20	8,22	-0,35	0,87	36,76	-0,31	0,80	32,60	-0,36	0,90	38,05
7005	0,04	0,93	2,46	0,02	0,77	1,76	0,02	0,71	4,43	0,03	0,79	1,84
7010	0,01	0,66	1,08	0,004	0,57	0,51	0,003	0,54	0,35	0,004	0,58	0,57
7015	-0,24	0,66	26,08	-0,17	0,53	16,67	-0,14	0,49	13,97	-0,02	0,54	1,52
8005	-0,16	0,51	15,94	-0,13	0,44	12,03	-0,11	0,41	10,08	-0,01	0,44	1,63
8010	0,02	0,59	26,45	0,01	0,51	11,52	0,009	0,49	1,35	0,01	0,52	1,59
8015	0,03	0,97	49,25	0,17	0,74	1,85	0,05	0,68	1,71	0,02	0,77	1,95

Tabela 22. Ajuste linear para as áreas calculadas através das medidas obtidas pelo paquímetro e o Modelo Uniforme 2.

curva	AEO			AEP			AEC			ACCT		
	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro
6005	-0,04	0,95	5,75	-0,04	0,74	39,99	-0,03	0,69	2,90	-0,04	0,77	40,50
6010	-0,01	0,74	12,82	-0,02	0,60	16,81	-0,02	0,55	17,98	-0,02	0,61	16,42
6015	-0,05	1,06	6,92	-0,04	0,77	39,19	-0,03	0,70	34,77	-0,04	0,80	40,60
7005	0,04	0,83	4,78	0,02	0,68	3,68	0,02	0,63	6,99	0,02	0,70	3,81
7010	0,006	0,56	3,26	0,002	0,49	2,72	0,002	0,46	2,57	0,003	0,49	2,79
7015	-0,03	0,56	27,81	-0,02	0,45	19,51	-0,02	0,42	16,56	-0,02	0,46	3,20
8005	-0,20	0,40	22,04	-0,02	0,34	17,05	-0,01	0,32	14,71	-0,02	0,35	4,59
8010	0,02	0,52	4,65	0,01	0,43	3,75	0,007	0,43	3,50	0,01	0,46	3,85
8015	0,02	0,75	14,26	0,01	0,57	10,53	0,01	0,52	9,52	0,01	0,59	10,92

Tabela 23. Ajuste não linear para as áreas calculadas através das medidas obtidas por fotografia e o Modelo Uniforme 1

CURVA	AEO		AEP		AEC		ACCT	
	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.
6005	1,9556	9,78	1,2772	3,65	1,0648	2,28	1,1720	3,16
6010	0,7558	2,43	0,9539	1,35	1,0398	1,88	1,1065	2,30
6015	1,0126	4,67	1,0215	3,63	1,1665	3,98	1,2491	4,11
7005	0,5812	5,83	0,4323	4,20	0,3809	3,52	0,3832	3,93
7010	0,5112	3,40	0,5623	2,97	0,5881	2,94	0,6347	3,28
7015	0,8929	16,89	0,6392	2,08	0,5610	2,13	0,6363	2,53
8005	0,7180	17,86	0,5315	1,21	0,4641	1,25	0,4798	1,32
8010	0,3890	18,65	0,4255	1,99	0,4452	1,97	0,4632	2,20
8015	0,5782	26,16	0,4638	2,45	0,4300	3,73	0,4447	4,63

Tabela 24. Ajuste não linear para as áreas calculadas através das medidas obtidas por fotografia e o Modelo Uniforme 2

CURVA	AEO		AEP		AEC		ACCT	
	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.
6005	1,7005	9,99	1,1095	3,85	0,9249	2,45	1,0181	3,33
6010	0,6742	2,37	0,8502	1,37	0,9266	1,95	0,9861	2,34
6015	0,9017	4,76	0,9091	3,73	1,0385	4,14	1,1121	4,27
7005	0,5199	5,72	0,3866	4,12	0,3404	3,44	0,3426	3,85
7010	0,4427	3,28	0,4868	2,84	0,5090	2,82	0,5494	3,21
7015	0,7689	3,24	0,5501	2,04	0,4826	2,08	0,5474	2,47
8005	0,5766	1,49	0,4264	1,46	0,3722	1,50	0,3849	1,34
8010	0,3457	2,21	0,3779	1,87	0,3955	1,85	0,4115	2,08
8015	0,4493	3,21	0,3608	2,25	0,3349	3,62	0,3465	4,49

Tabela 25. Ajuste linear para as áreas calculadas através das medidas obtidas por fotografia e o Modelo Uniforme 1

curva	AEO			AEP			AEC			ACCT		
	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro
6005	-0,12	1,32	6,92	-0,05	1,04	2,80	-0,02	0,96	2,27	-0,03	1,01	3,07
6010	0,02	0,87	2,58	-0,01	0,95	1,39	-0,01	0,99	1,99	-0,01	1,05	2,47
6015	0,003	0,98	4,69	-0,03	0,88	3,77	-0,04	0,96	3,50	-0,04	1,03	3,68
7005	0,07	0,77	5,61	0,04	0,54	4,06	0,03	0,46	3,42	0,03	0,48	3,81
7010	0,03	0,60	3,37	0,03	0,65	2,77	0,03	0,68	2,88	0,03	0,74	3,21
7015	-0,03	0,98	17,89	0,01	0,68	2,19	0,01	0,58	2,18	0,004	0,65	2,56
8005	-0,01	0,69	17,66	-0,09	0,51	8,80	-0,01	0,44	1,30	-0,01	0,47	1,40
8010	0,02	0,43	19,40	0,02	0,46	2,21	0,02	0,48	2,19	0,02	0,50	2,47
8015	-0,01	0,57	26,08	0,02	0,51	2,76	0,03	0,50	4,19	0,04	0,53	5,23

Tabela 26. Ajuste linear para as áreas calculadas através das medidas obtidas por fotografia e o Modelo Uniforme 2

curva	AEO			AEP			AEC			ACCT		
	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro
6005	-0,12	1,13	7,01	-0,05	0,89	2,94	-0,02	0,82	2,37	-0,03	0,87	3,18
6010	0,02	0,77	2,51	-0,01	0,84	1,36	-0,10	0,88	9,82	-0,01	0,93	2,54
6015	0,005	0,87	4,79	-0,03	0,44	3,87	-0,04	0,84	3,60	-0,05	0,90	3,79
7005	0,06	0,69	5,45	0,04	0,48	3,95	0,03	0,41	3,32	0,03	0,42	3,71
7010	0,03	0,52	3,29	0,03	0,56	2,66	0,03	0,59	2,83	0,03	0,65	3,18
7015	-0,02	0,84	3,19	0,01	0,58	2,13	0,004	0,49	2,12	0,002	0,55	2,49
8005	-0,02	0,55	1,64	-0,01	0,40	1,57	-0,01	0,35	1,03	-0,01	0,37	1,51
8010	0,02	0,38	2,47	0,02	0,40	2,07	0,02	0,42	2,04	0,02	0,44	2,31
8015	-0,01	0,44	3,29	0,02	0,40	2,51	0,03	0,39	3,95	0,04	0,41	4,98

Tabela 27. Ajuste não linear para as áreas calculadas através das medidas obtidas por paquímetro e o modelo central.

CURVA	AEO		AEP		AEC		ACCT	
	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.
6005	1,7884	3,11	1,4275	2,83	1,3244	2,70	1,4670	2,85
6010	1,2214	2,52	1,0267	1,97	0,9642	1,81	1,0489	2,03
6015	1,8491	3,61	1,3460	2,92	1,2297	2,66	1,3970	3,00
7005	0,9657	3,14	0,8205	2,21	0,7682	1,92	0,8381	2,31
7010	0,8059	1,22	0,7063	0,61	0,6744	0,44	0,7176	0,68
7015	0,9356	1,86	0,7428	1,30	0,6872	1,15	0,7639	1,36
8005	0,7005	1,71	0,5958	1,33	0,5559	1,18	0,6087	1,37
8010	0,6050	1,99	0,5459	1,46	0,5299	1,33	0,5524	1,53
8015	1,2053	3,60	0,9480	2,22	0,8634	2,00	0,9782	2,31

Tabela 28. Ajuste não linear para as áreas calculadas através das medidas obtidas por fotografia e o Modelo Central.

CURVA	AEO		AEP		AEC		ACCT	
	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.	Exp.	Erro M.
6005	2,6990	9,40	1,7656	3,31	1,4722	2,08	1,6203	2,84
6010	1,0259	2,55	1,2967	1,31	1,4140	2,08	1,5045	2,84
6015	1,3183	8,31	1,3508	3,44	1,5194	1,90	1,6261	2,72
7005	0,6793	4,50	0,5057	4,31	0,4457	2,15	0,4482	3,02
7010	0,6457	3,55	0,7103	3,13	0,7430	1,67	0,8018	2,49
7015	1,0437	17,22	0,7657	1,42	0,6855	2,00	0,7835	2,72
8005	0,9448	1,27	0,7094	1,08	0,6241	1,75	0,6403	2,22
8010	0,4318	2,39	0,4715	2,07	0,4934	1,75	0,5132	2,22
8015	0,7724	3,15	0,6188	2,60	0,5734	2,06	0,5927	2,38

Tabela 29. Ajuste linear para as áreas calculadas através das medidas obtidas por paquímetro e o Modelo Central

curva	AEO			AEP			AEC			ACCT		
	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro
6005	-0,03	1,56	2,95	-0,03	1,22	2,53	-0,03	1,13	2,36	-0,03	1,25	2,60
6010	-0,01	1,15	2,71	-0,01	0,93	2,14	-0,01	0,86	1,93	-0,01	0,96	2,20
6015	-0,04	1,58	3,53	-0,03	1,15	2,70	-0,03	1,05	2,44	-0,03	1,19	2,80
7005	0,04	1,10	2,64	0,03	0,91	1,91	0,02	0,84	1,70	0,03	0,93	2,00
7010	0,01	0,84	1,19	0,006	0,73	0,59	0,05	0,69	4,50	0,006	0,74	0,70
7015	-0,02	0,86	2,03	-0,01	0,69	1,43	0,01	0,64	2,50	-0,01	0,71	1,50
8005	-0,01	0,66	1,89	-0,01	0,57	1,50	-0,01	0,53	1,30	-0,01	0,58	1,50
8010	0,02	0,65	2,30	0,01	0,57	1,64	0,01	0,55	1,47	0,01	0,58	1,70
8015	0,03	1,31	3,60	0,02	1,00	2,25	0,02	0,91	2,10	0,02	1,04	2,40

Tabela 30. Ajuste linear para as áreas calculadas através das medidas obtidas por fotografia e o modelo central

curva	AEO			AEP			AEC			ACCT		
	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro	Cr	Ca	Erro
6005	-0,11	1,86	6,75	-0,04	1,46	2,60	-0,02	1,33	2,10	-0,03	1,42	2,90
6010	0,02	1,19	2,73	0,002	1,31	1,40	-0,01	1,36	1,87	-0,01	1,42	2,50
6015	0,001	1,30	5,40	-0,03	1,16	3,60	-0,04	1,26	1,88	-0,04	1,36	2,58
7005	0,07	0,91	4,52	0,04	0,64	4,20	0,03	0,54	2,01	0,03	0,56	2,67
7010	0,03	0,77	3,41	0,03	0,83	2,90	0,03	0,87	1,58	0,04	0,94	2,27
7015	0,008	1,08	17,50	0,003	0,78	1,50	0,00	0,68	1,89	0,00	0,78	2,53
8005	0,00	0,94	1,29	0,00	0,71	1,10	0,00	0,62	1,86	0,005	0,65	2,27
8010	0,02	0,48	2,70	0,02	0,51	2,32	0,02	0,53	2,44	0,02	0,56	2,86
8015	0,00	0,77	3,10	0,02	0,69	2,96	0,04	0,67	2,53	0,04	0,71	2,87

Valores de densidade da amostra obtidas por picnometria, durante a secagem, e volumes calculados pela relação entre a massa e a densidade

T=60 ° C v=0,5 m/s

densidade	massa	volume(cm)
1.06	12.05	11.36
1.03	10.15	9.85
0.98	9.43	9.62
0.95	8.71	9.16
0.91	8.23	9.04
0.81	6.46	7.97

T=60 ° C v=1,0 m/s

densidade	massa	volume(cm)
1.06	12.21	11.51
1.01	11.57	11.45
0.99	10.71	10.81
0.98	9.89	10.09
0.98	8.9	9.08
0.94	7.56	8.04

T=60 ° C v=1,5 m/s

densidade	massa	volume(cm)
1.01	10.88	10.77
0.98	9.84	10.04
0.91	9.14	10.04
0.9	8.13	9.03
0.9	7.67	8.52
0.89	6.65	7.47

T=70 ° C v=0,5 m/s

densidade	massa	volume(cm)
1.03	11.99	11.64
0.98	10.32	10.53
0.96	8.2	8.54
0.94	6.91	7.35
0.91	5.65	6.20

T=70 ° C v=1,0 m/s

densidade	massa	volume(cm)
1.04	11.31	10.87
0.99	9.97	10.07
0.96	8.7	9.06
0.95	7.15	7.52
0.95	6.27	6.6
0.94	6.27	6.67

T=70 °C v=1,5 m/s

densidade	massa	volume(cm)
1.03	10.34	10.03
0.97	9.2	9.48
0.92	8.33	9.05
0.92	7.39	8.03
0.91	6.62	7.27
0.91	6.62	7.27

T=80 °C v=0,5 m/s

densidade	massa	volume(cm)
1.05	10.87	10.35
0.92	7.97	8.66
0.83	6.37	7.67
0.81	5.57	6.87
0.8	5.03	6.28

T=80 °C v=1,0 m/s

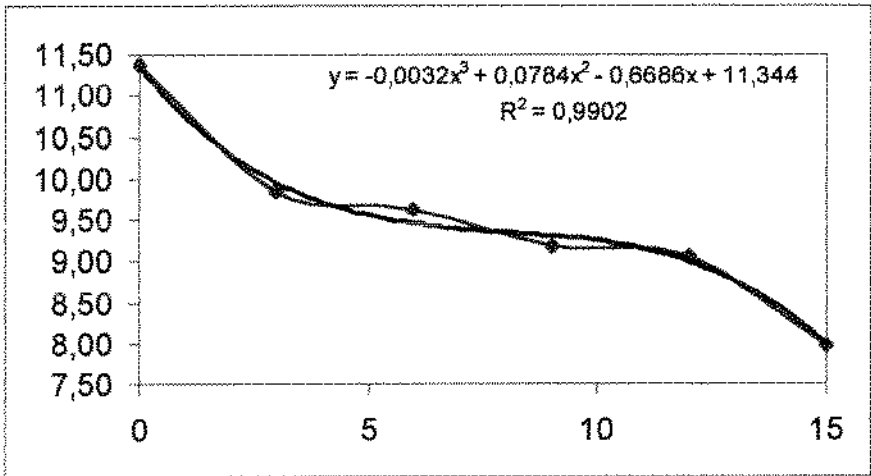
densidade	massa	volume(cm)
1.03	9.44	9.16
0.95	7.55	7.94
0.92	6.38	6.93
0.9	5.84	6.48
0.89	5.81	6.52

T=80 °C v=1,5 m/s

densidade	massa	volume(cm)
1.06	8.39	7.91
0.98	6.49	6.62
0.92	5.41	5.88
0.84	5.12	6.09
0.83	4.9	5.90

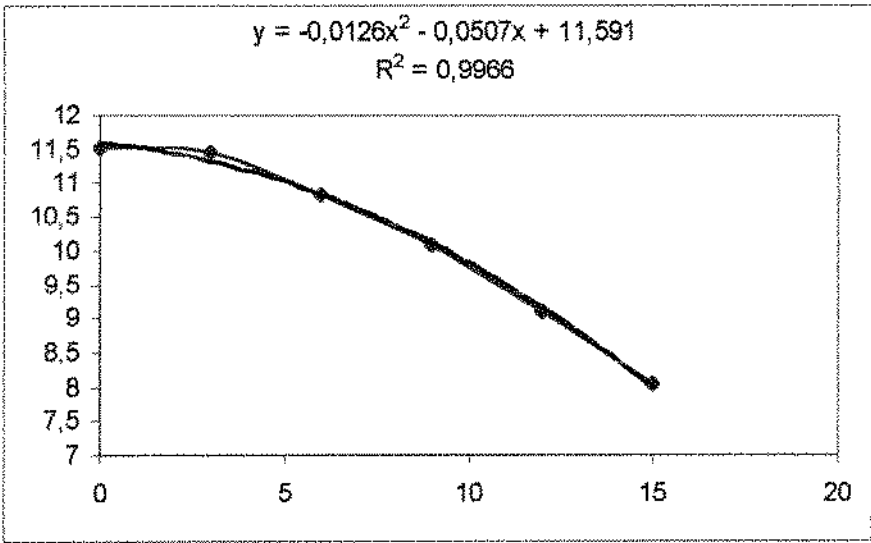
Valores do volume
correlacionados com a
umidade para toda a faixa experimental
6005

tempo	X (v=0,5)	volume	C
0	0,89	11,34	0,0784
1	0,8608	10,75	0,0800
2	0,8201	10,29	0,0796
3	0,7921	9,95	0,0795
4	0,7590	9,71	0,0780
5	0,725	9,56	0,0758
6	0,6938	9,46	0,0733
7	0,6588	9,40	0,0700
8	0,6273	9,37	0,0669
9	0,5950	9,34	0,0636
10	0,5635	9,29	0,0606
11	0,5360	9,21	0,0581
12	0,5085	9,08	0,0560



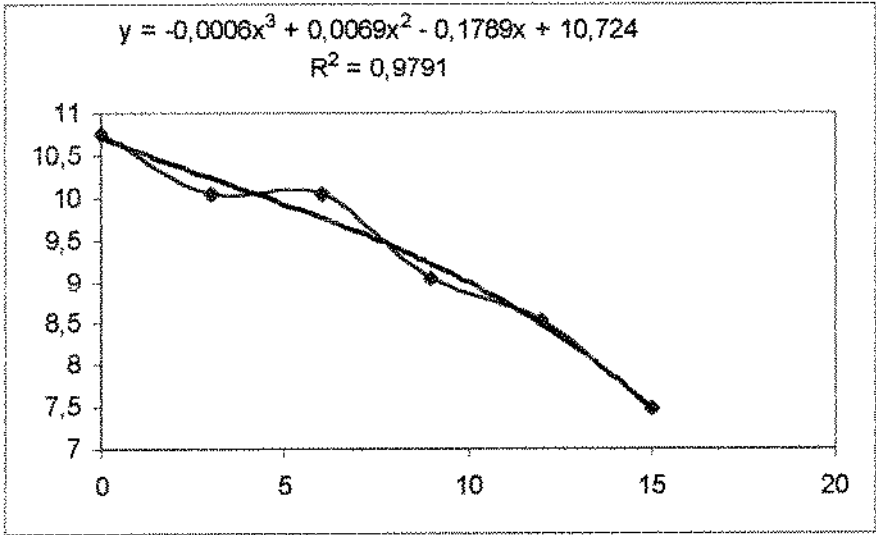
6010

tempo	curvasec	volcal	C
0	0,7007	11,59	0,0604
1	0,6697	11,52	0,0580
2	0,6387	11,43	0,0558
3	0,6068	11,32	0,0535
4	0,5750	11,18	0,0514
5	0,5432	11,02	0,0492
6	0,5145	10,83	0,0474
7	0,4843	10,61	0,0456
8	0,4587	10,37	0,0442
9	0,434	10,11	0,0429
10	0,4083	9,82	0,0415
11	0,3844	9,50	0,0404
12	0,3635	9,16	0,0396



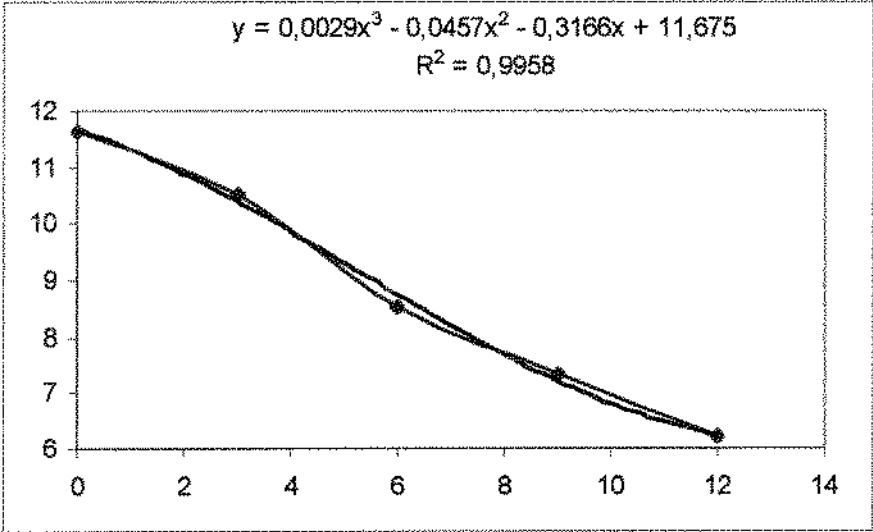
6015

tempo	curvasec	volcal	C
0	0,8624	10,72	0,0804
1	0,8201	10,55	0,0777
2	0,782	10,38	0,0752
3	0,7448	10,23	0,0727
4	0,7102	10,08	0,0704
5	0,6767	9,92	0,0681
6	0,6396	9,76	0,0654
7	0,6024	9,60	0,0627
8	0,5688	9,42	0,0603
9	0,5335	9,23	0,0577
10	0,498	9,02	0,0551
11	0,4723	8,79	0,0537
12	0,4467	8,53	0,0523



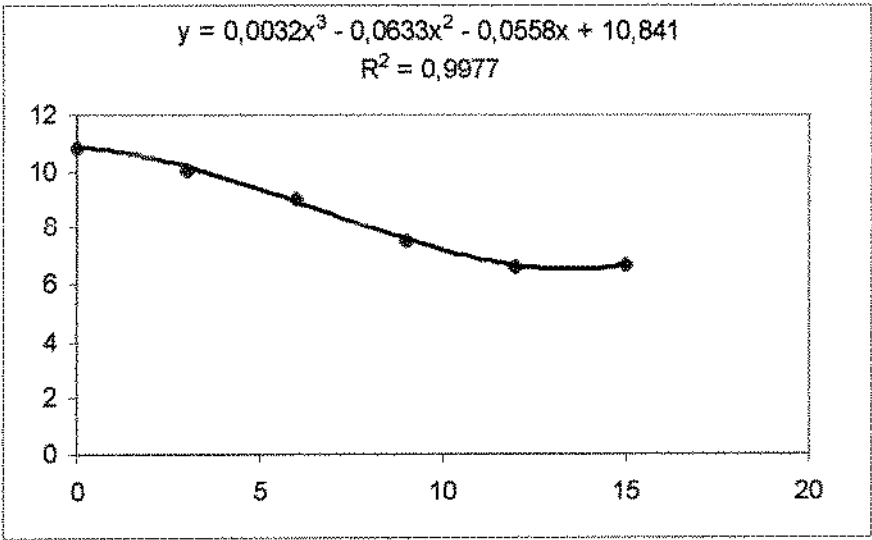
7005

tempo	curvasec	volcal	C
0	1,9385	11,67	0,1660
1	1,8212	11,31	0,1609
2	1,6788	10,88	0,1542
3	1,5391	10,39	0,1481
4	1,405	9,86	0,1424
5	1,2849	9,31	0,1379
6	1,148	8,75	0,1311
7	1,0223	8,21	0,1244
8	0,8771	7,70	0,1138
9	0,7458	7,23	0,1030
10	0,6452	6,83	0,0943
11	0,5307	6,52	0,0813
13	0,3621	6,20	0,0583
15	0,2123	6,43	0,0330



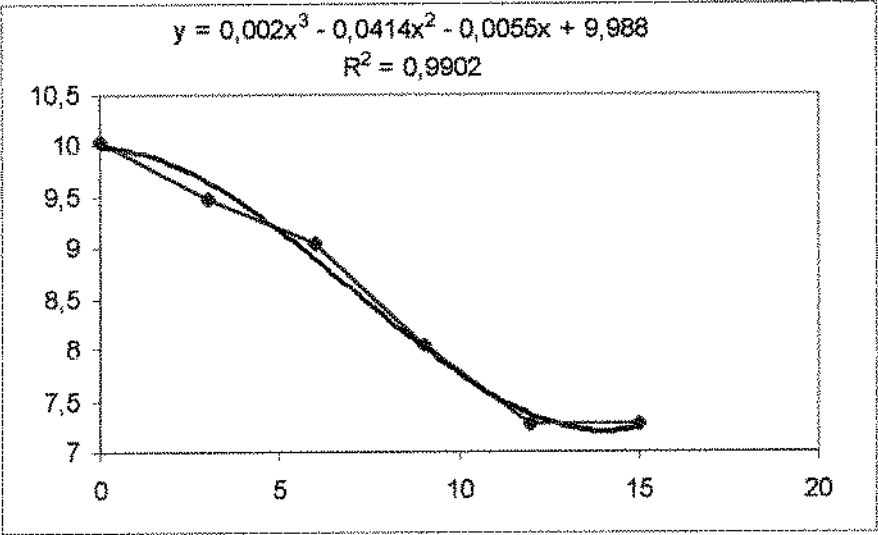
7010

tempo	curvasec	volcal	C
0	1,3732	10,84	0,1266
1	1,2948	10,78	0,1201
2	1,1926	10,61	0,1123
3	1,1017	10,35	0,1063
4	1,0278	10,03	0,1024
5	0,9292	9,65	0,0962
6	0,8354	9,25	0,0902
7	0,7424	8,83	0,0840
8	0,6487	8,42	0,0769
9	0,5777	8,04	0,0717
10	0,5097	7,71	0,0661
11	0,4397	7,44	0,0590
12	0,3916	7,25	0,0539
13	0,3157	7,17	0,0440
14	0,2756	7,21	0,0382
15	0,2434	7,39	0,0329



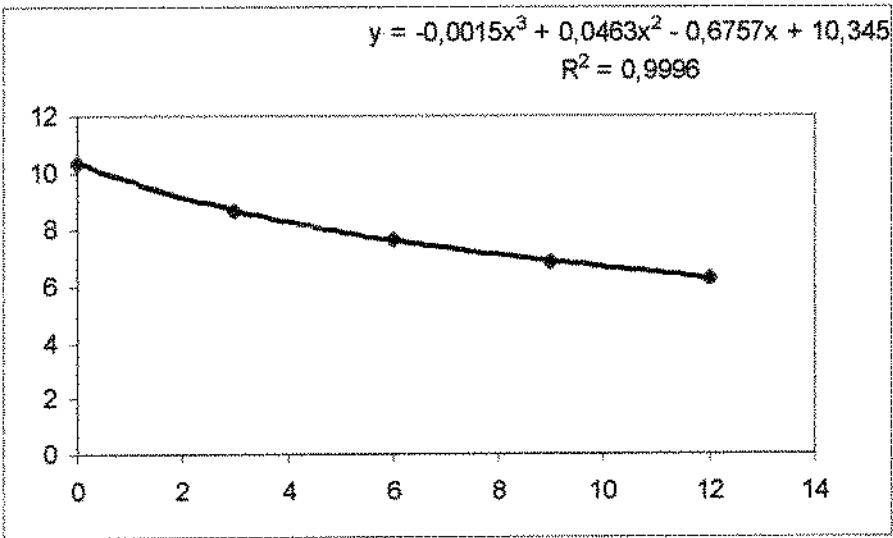
7015

tempo	curvassec	voical	C
0	1,0404	9,98	0,1041
1	0,9429	9,94	0,0943
2	0,8525	9,82	0,0867
3	0,7705	9,65	0,0798
5	0,6119	9,17	0,0666
6	0,5415	8,89	0,0608
7	0,4748	8,60	0,0551
8	0,4171	8,31	0,0501
9	0,369	8,04	0,0458
10	0,3209	7,79	0,0411
11	0,2825	7,58	0,0372
12	0,2468	7,41	0,0332
13	0,1998	7,31	0,0273
14	0,1720	7,28	0,0236
15	0,1523	7,34	0,0207



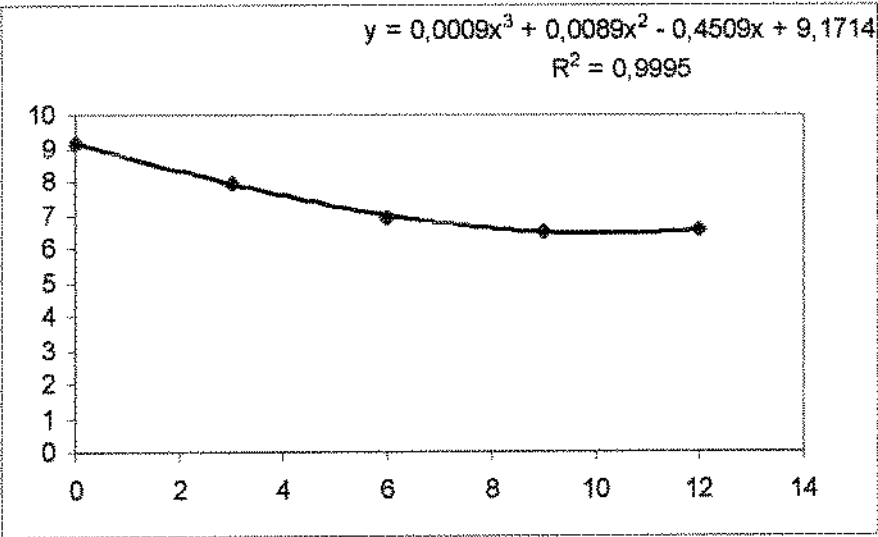
8005

tempo	curvasec	volcal	C
0	1,4555	10,34	0,1406
1	1,2409	9,71	0,1277
2	1,01	9,16	0,1101
3	0,8143	8,69	0,0936
4	0,6474	8,28	0,0781
5	0,5097	7,93	0,0642
6	0,3986	7,63	0,0522
7	0,3091	7,36	0,0419
8	0,2467	7,13	0,0345
9	0,2038	6,92	0,0294
10	0,162	6,71	0,0241
11	0,1393	6,51	0,0213
12	0,1213	6,31	0,0192



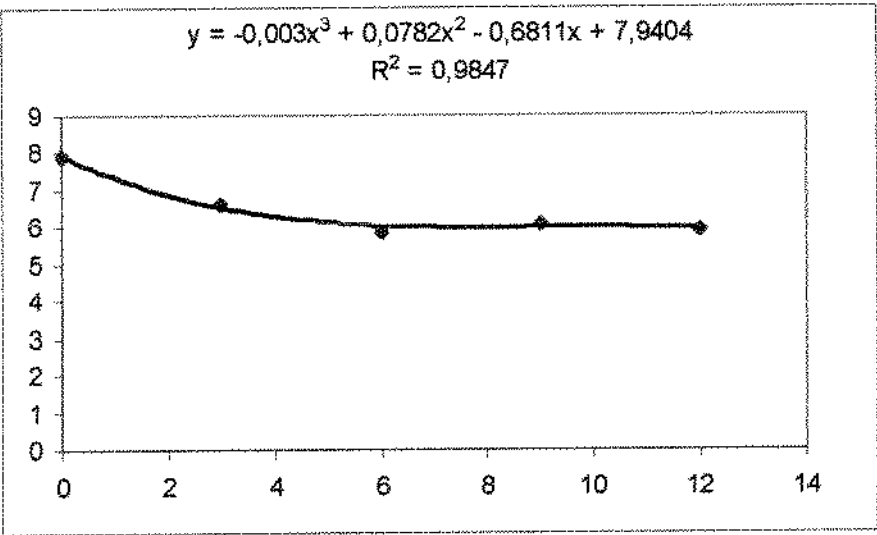
8010

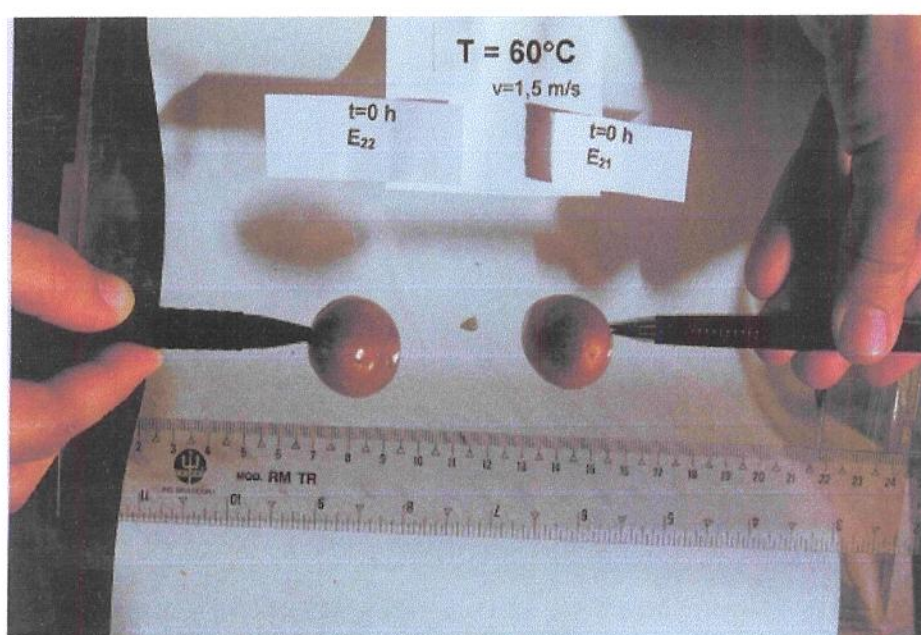
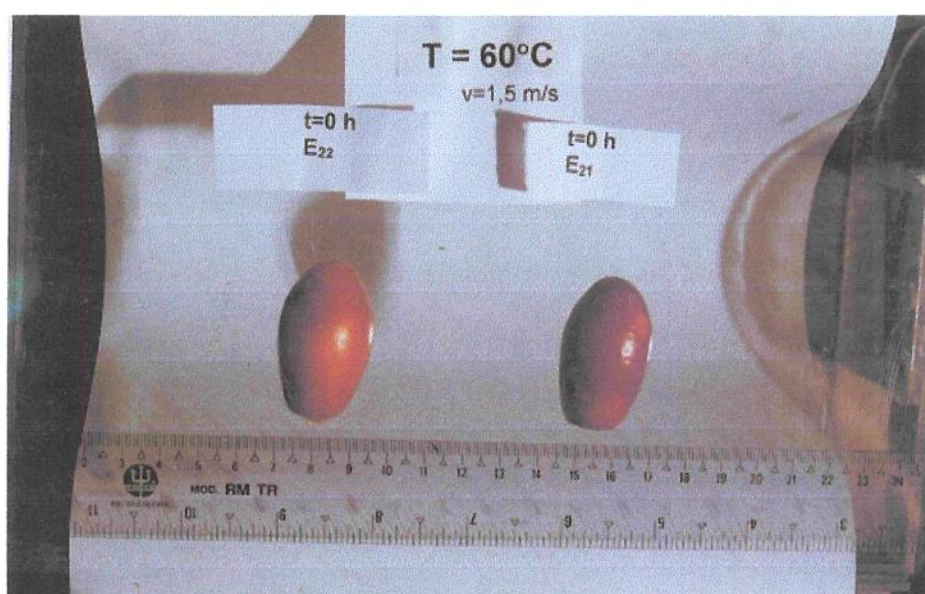
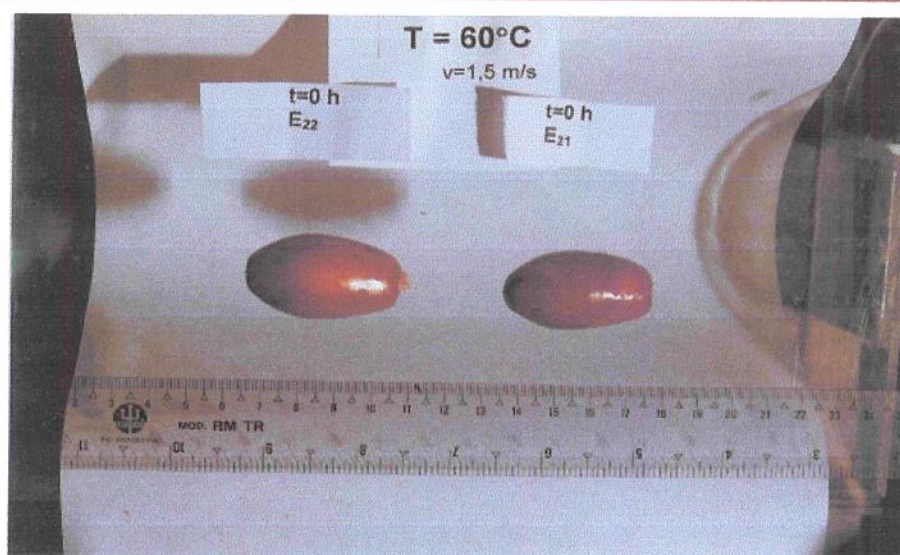
tempo	curvasec	volcal	C
0	1,6051	9,17	0,1750
1	1,2881	8,73	0,1475
2	1,0374	8,31	0,1248
3	0,7929	7,92	0,1000
4	0,6102	7,56	0,0806
5	0,4598	7,25	0,0634
6	0,3548	6,98	0,0508
7	0,2717	6,75	0,0401
8	0,218	6,59	0,0330
9	0,1806	6,49	0,0278
10	0,1337	6,45	0,0207
11	0,1169	6,48	0,0180
12	0,0821	6,59	0,0124

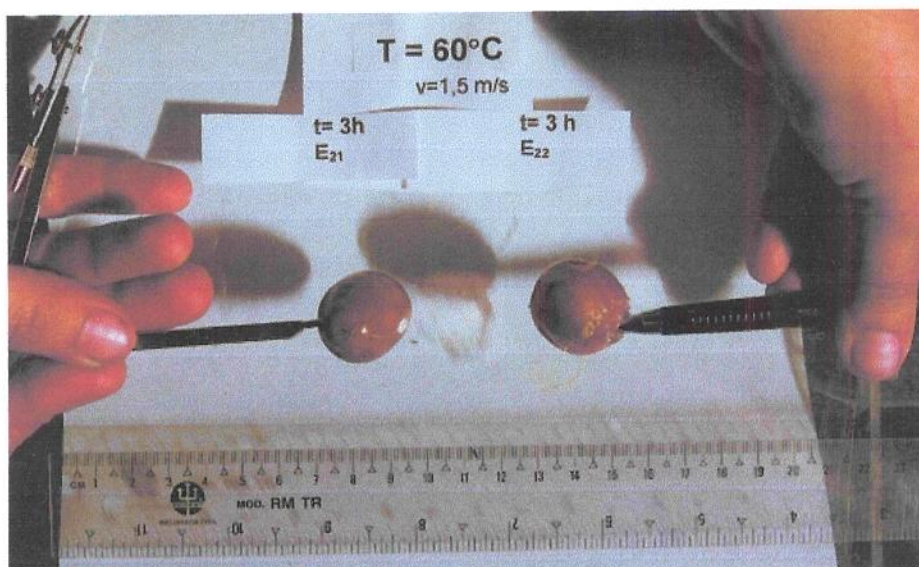
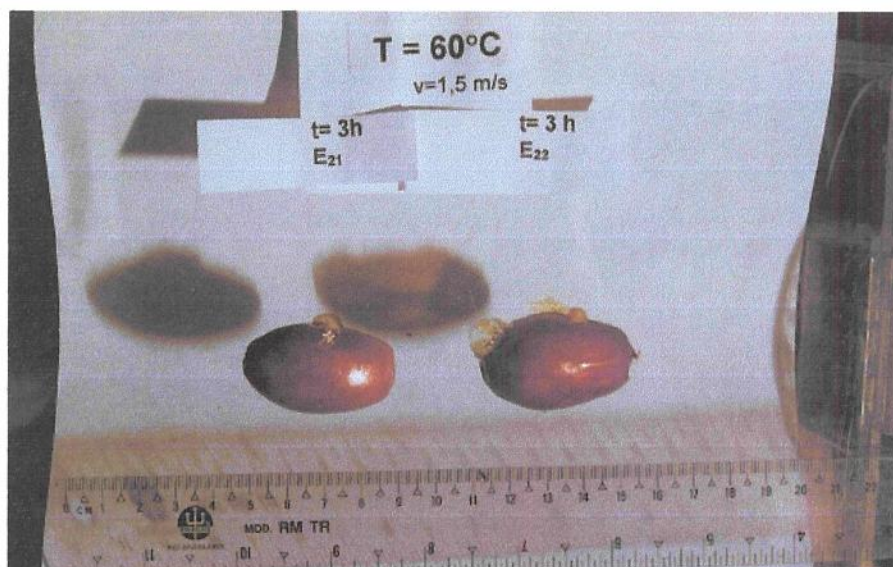


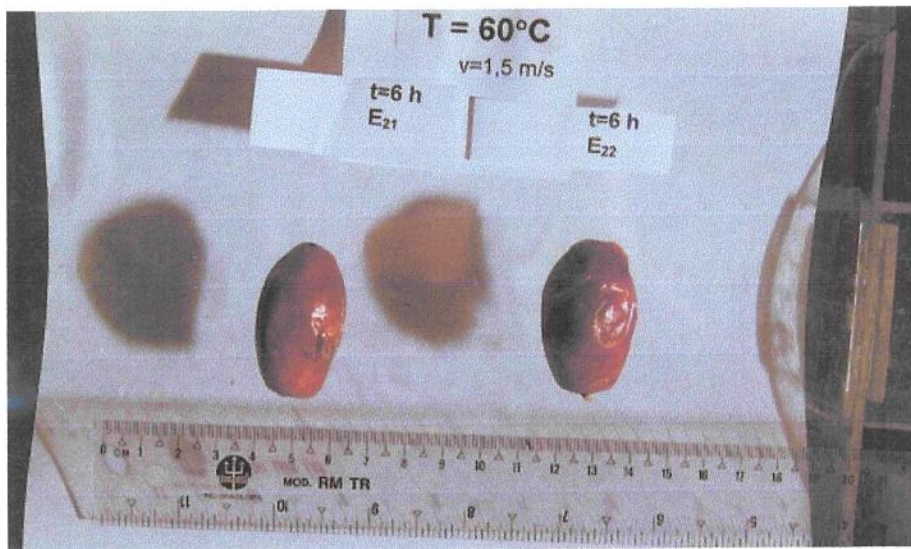
8015

tempo	curvas	sec	volcal	C
0	1,375		7,94	0,1731
1	1,1117		7,33	0,1515
2	0,8709		6,86	0,1268
3	0,6779		6,51	0,1039
4	0,5114		6,27	0,0814
5	0,3835		6,11	0,0627
6	0,2848		6,02	0,0473
7	0,2181		5,97	0,0364
8	0,1724		5,96	0,0289
9	0,1378		5,95	0,0231
10	0,1114		5,94	0,0187
11	0,0969		5,91	0,0163
12	0,0732		5,84	0,0125

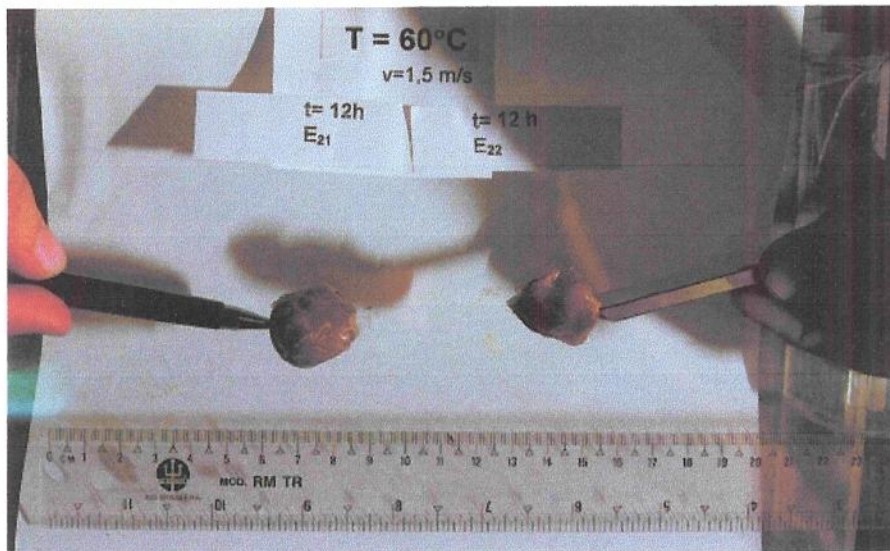




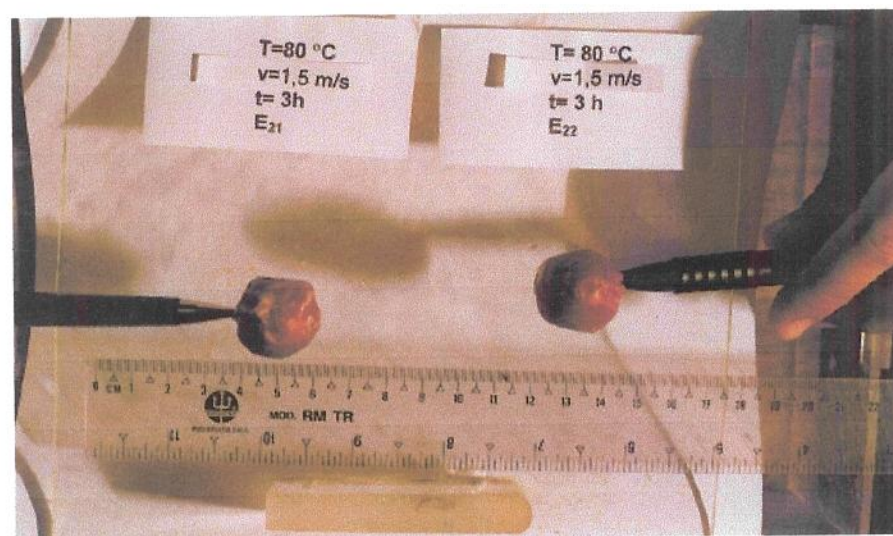
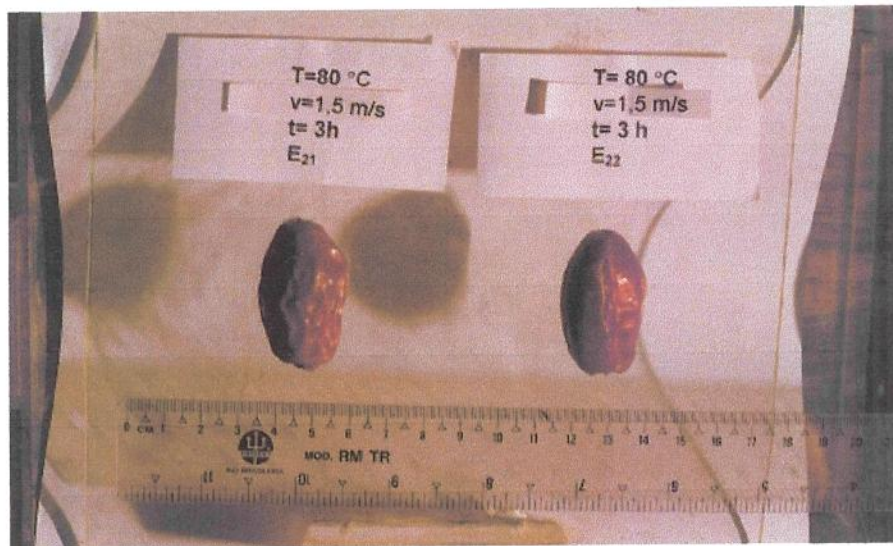


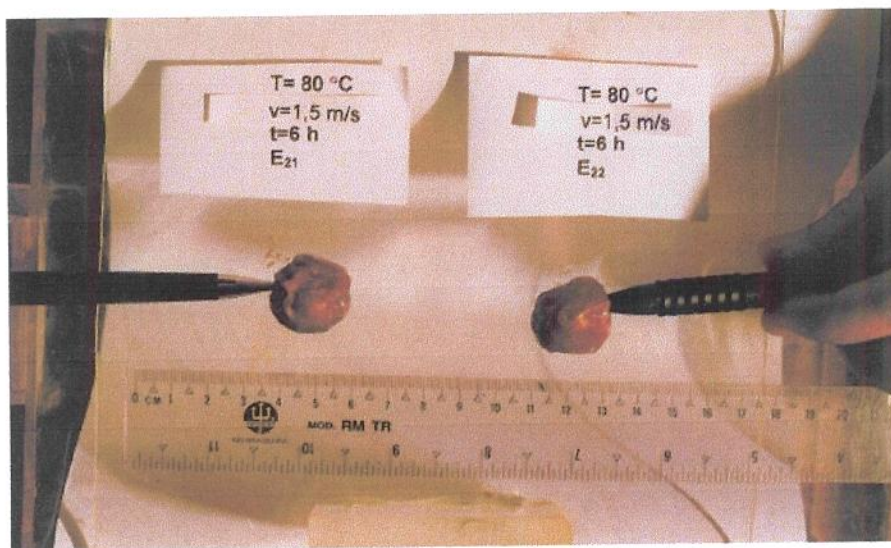
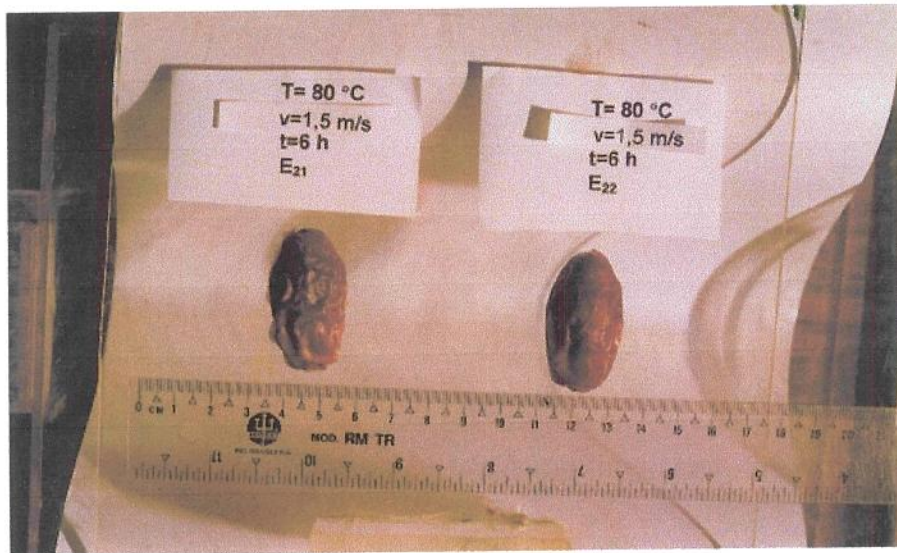


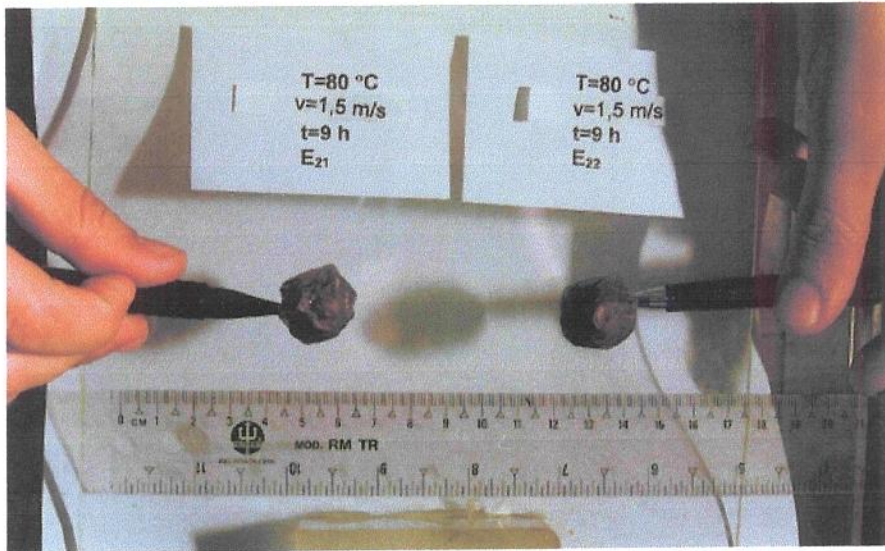












APÊNDICE 4

Apêndice 4

Gráficos dos ajustes obtidos pelo modelo difusional para geometria esférica, sem e com o encolhimento, referentes ao capítulo 4.

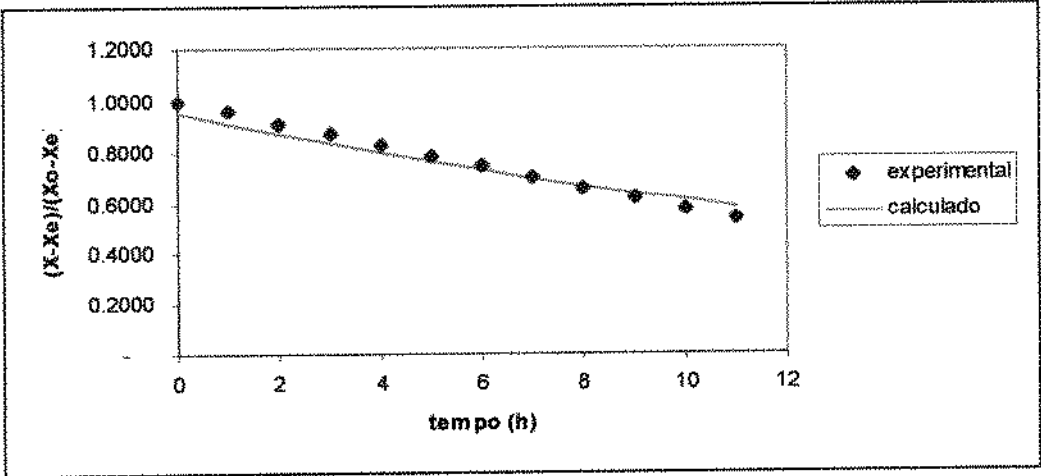


Figura 1. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica ($T=60^{\circ}\text{C}$ $v=0,5\text{ m/s}$)

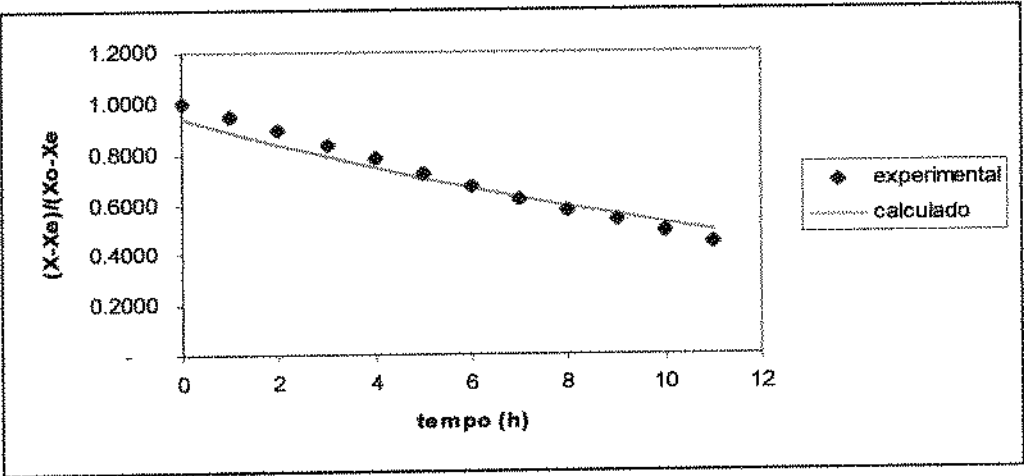


Figura 2. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica ($T=60^{\circ}\text{C}$ $v=1,0\text{ m/s}$)

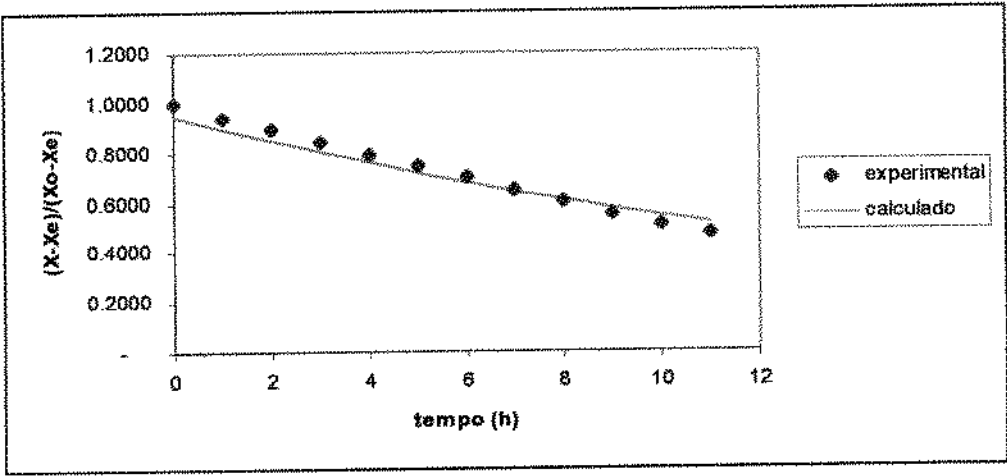


Figura 3. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica ($T=60^{\circ}\text{C}$ $v=1,5\text{ m/s}$)

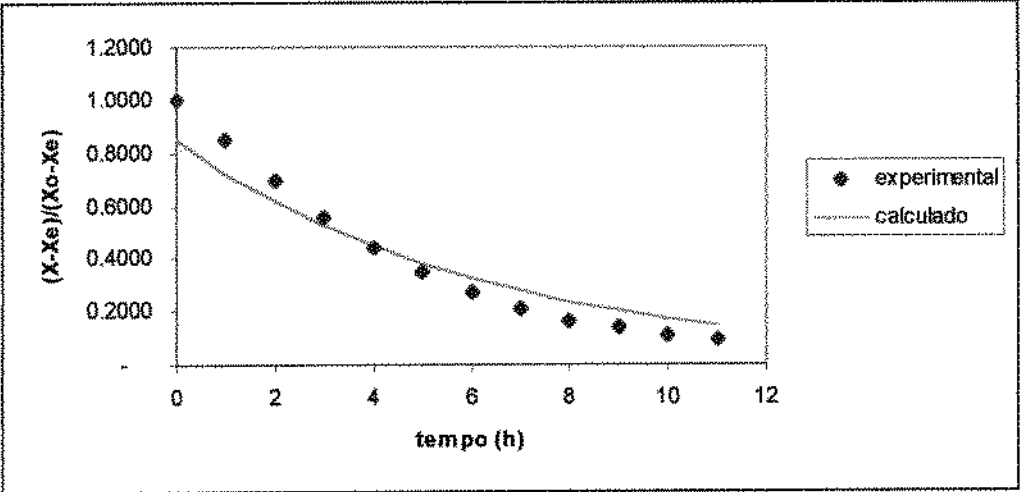


Figura 4. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica (T= 70 ° C v=0,5 m/s)

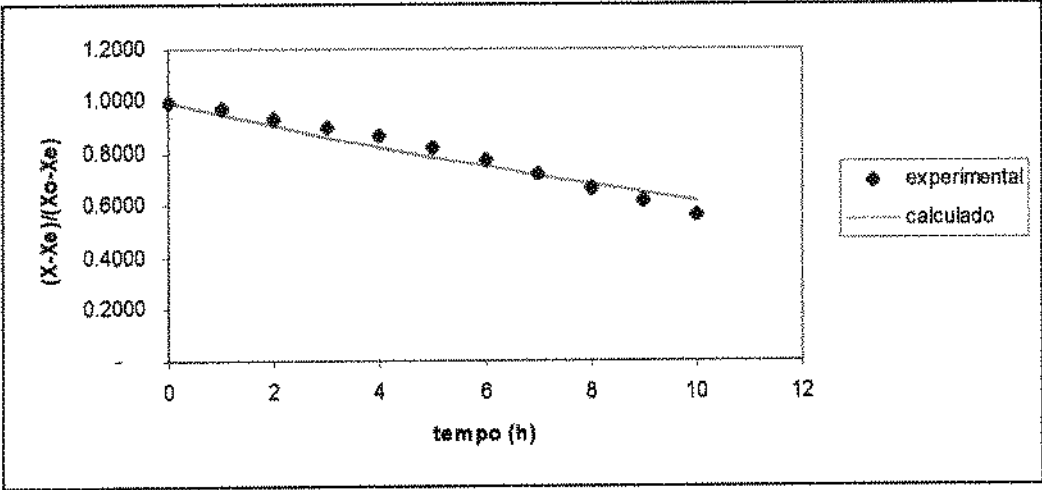


Figura 5. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica (T= 70 ° C v=1,0 m/s)

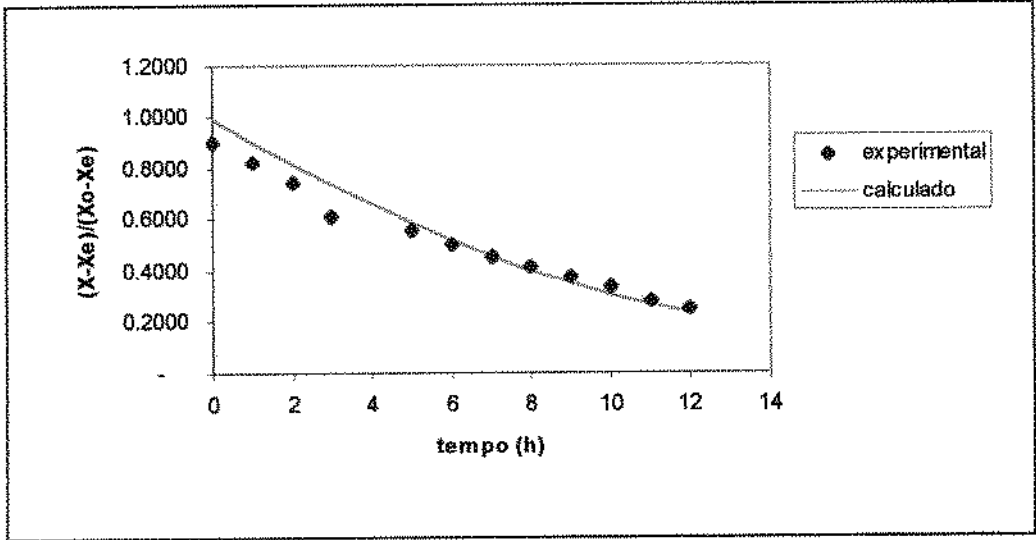


Figura 6. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica (T= 70 ° C v=1,5 m/s)

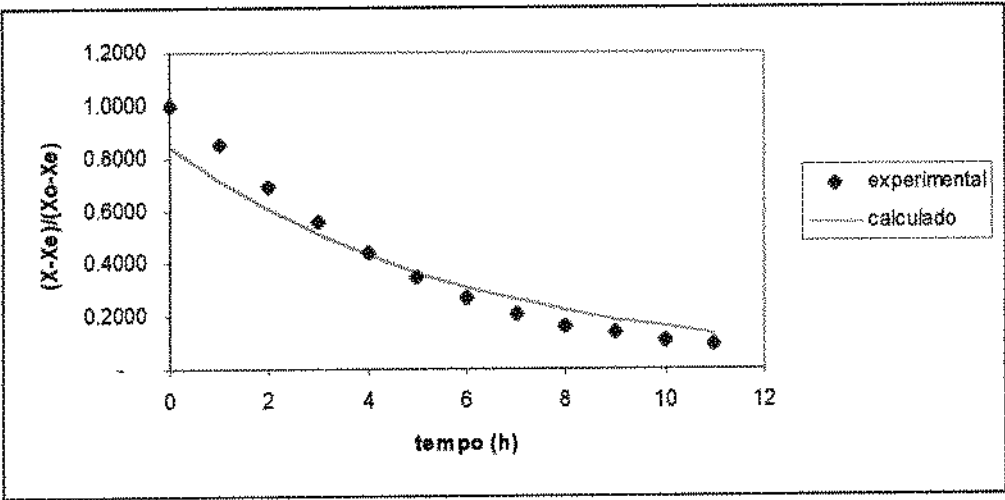


Figura 7. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica (T= 80 ° C v=0,5 m/s)

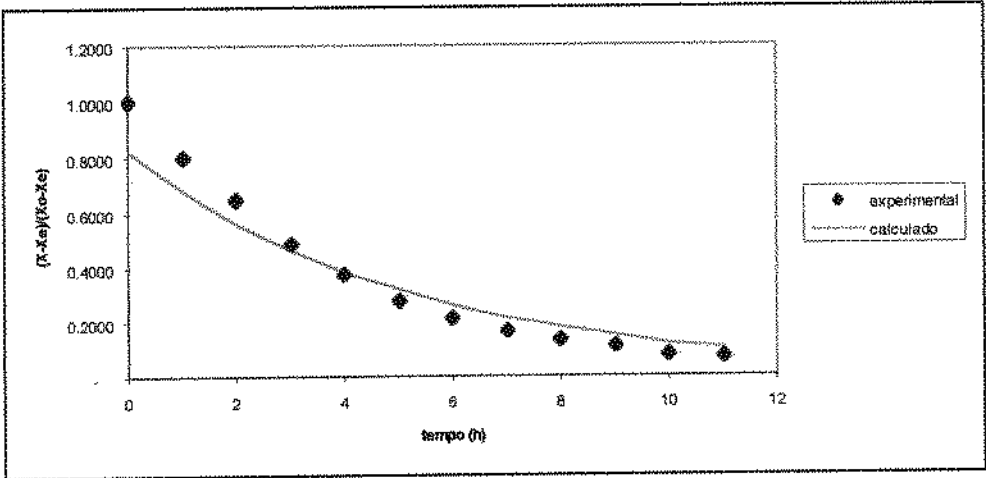


Figura 8. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica (T= 80 ° C v=1,0 m/s)

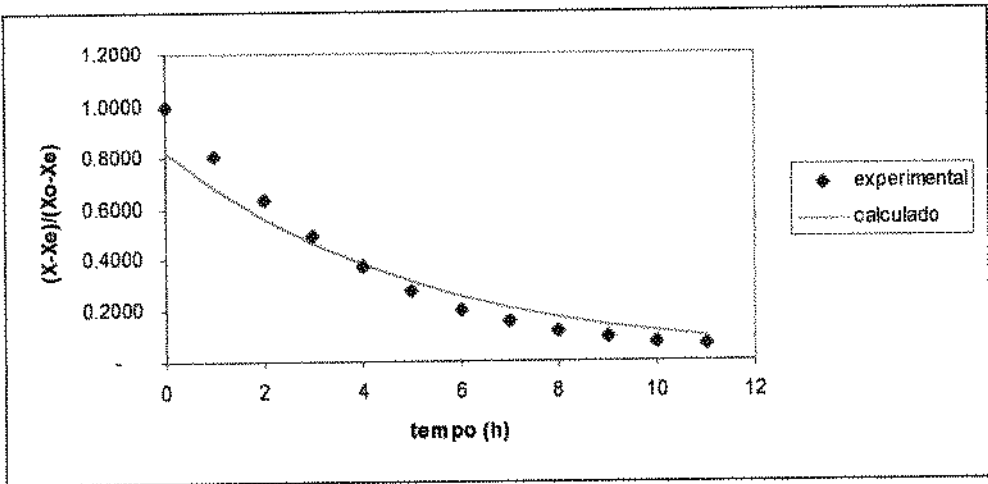


Figura 9. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional para geometria esférica (T= 80 ° C v=1,5 m/s)

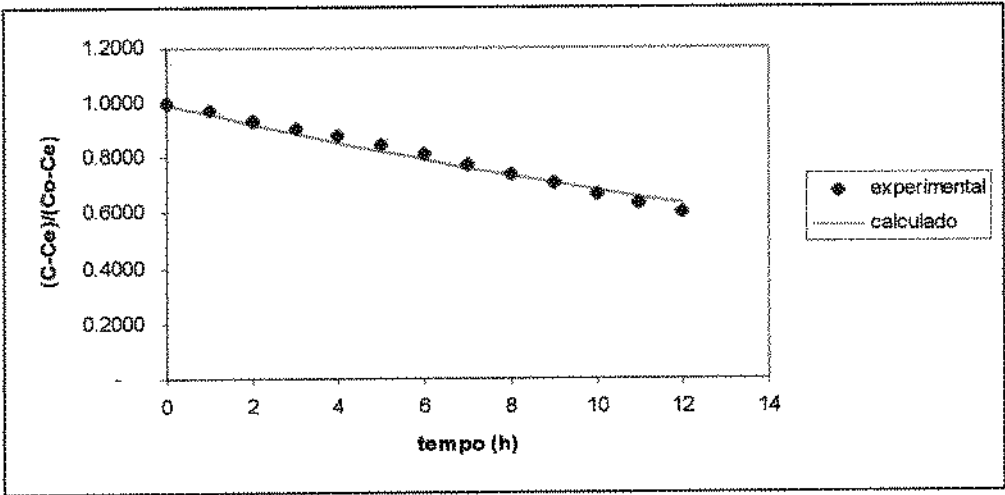


Figura 10. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria esférica ($T= 60^{\circ}C$ $v=0,5$ m/s)

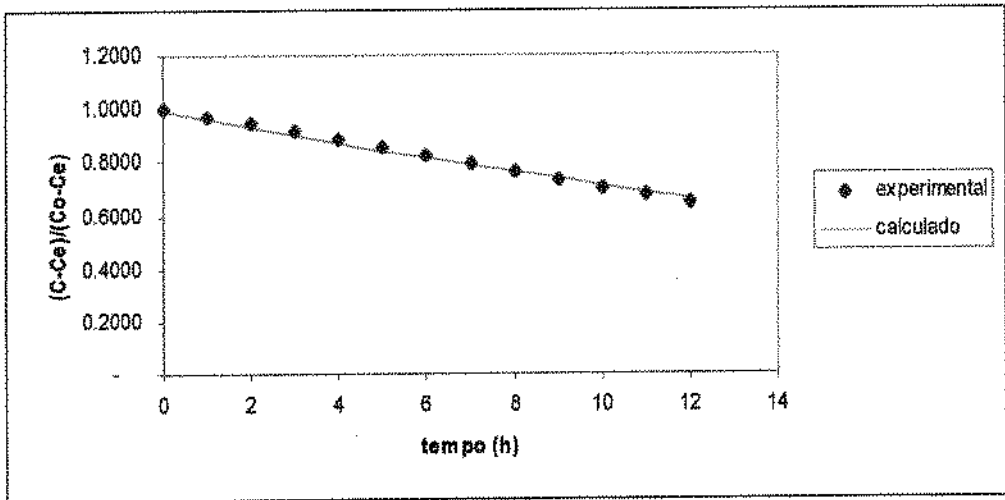


Figura 11. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria esférica ($T= 60^{\circ}C$ $v=1,0$ m/s)

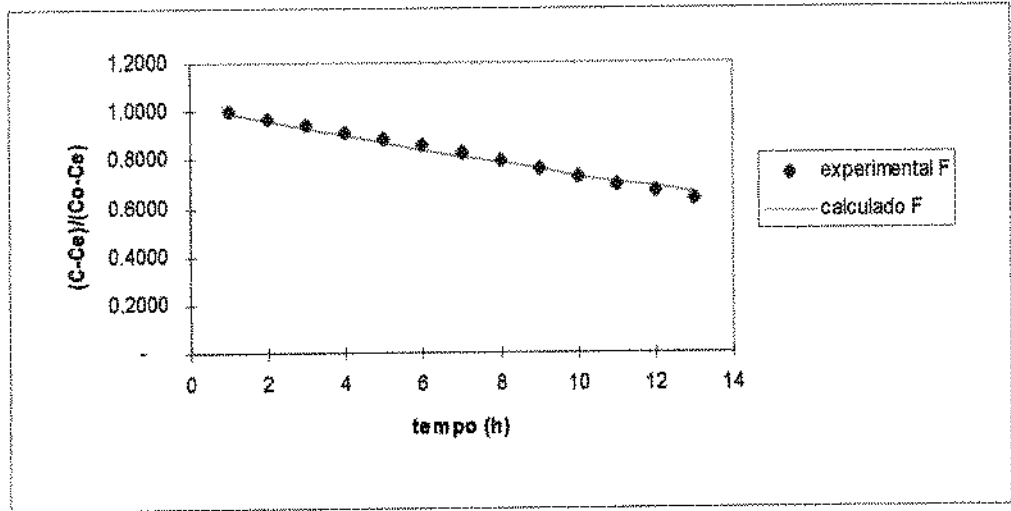


Figura 12. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria esférica ($T= 60^{\circ}C$ $v=1,5$ m/s)

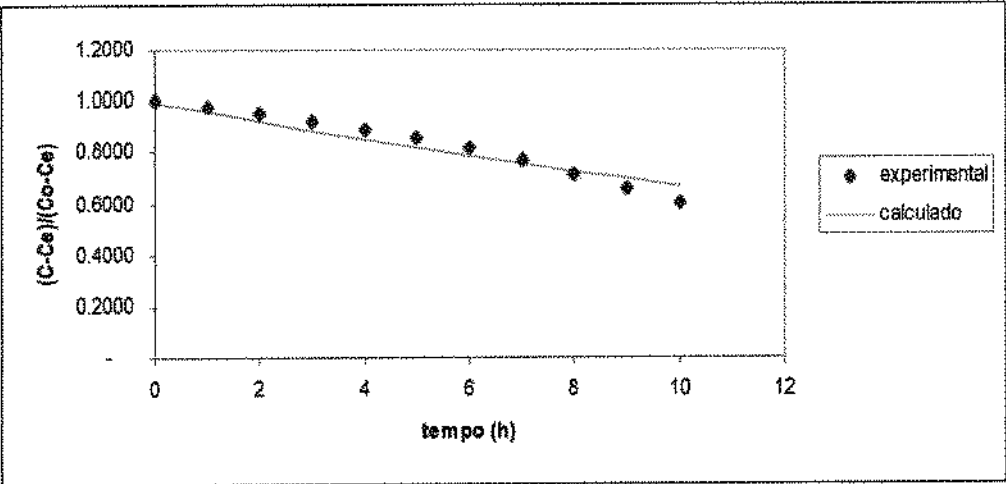


Figura 13. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria esférica ($T = 70^{\circ}\text{C}$ $v = 0,5\text{ m/s}$)

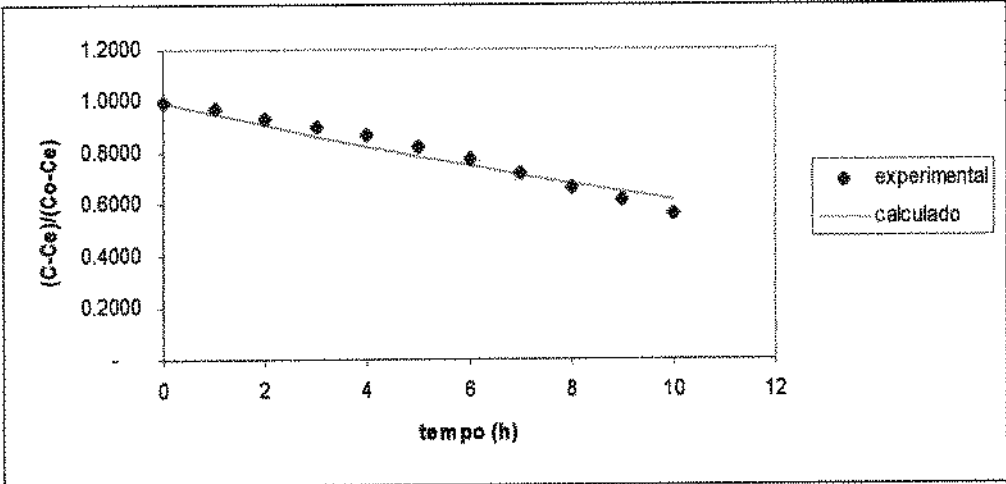


Figura 14. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria esférica ($T = 70^{\circ}\text{C}$ $v = 1,0\text{ m/s}$)

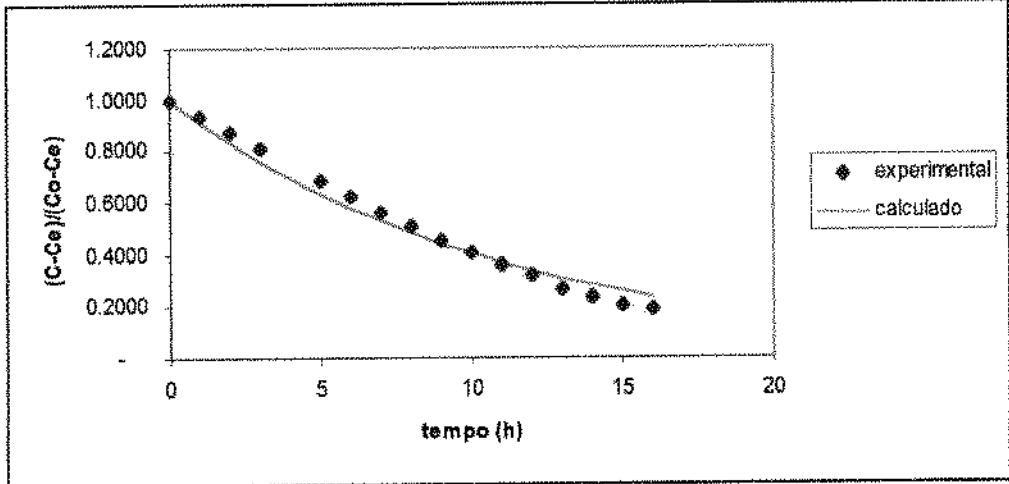


Figura 15. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria esférica ($T = 70^{\circ}\text{C}$ $v = 1,5\text{ m/s}$)

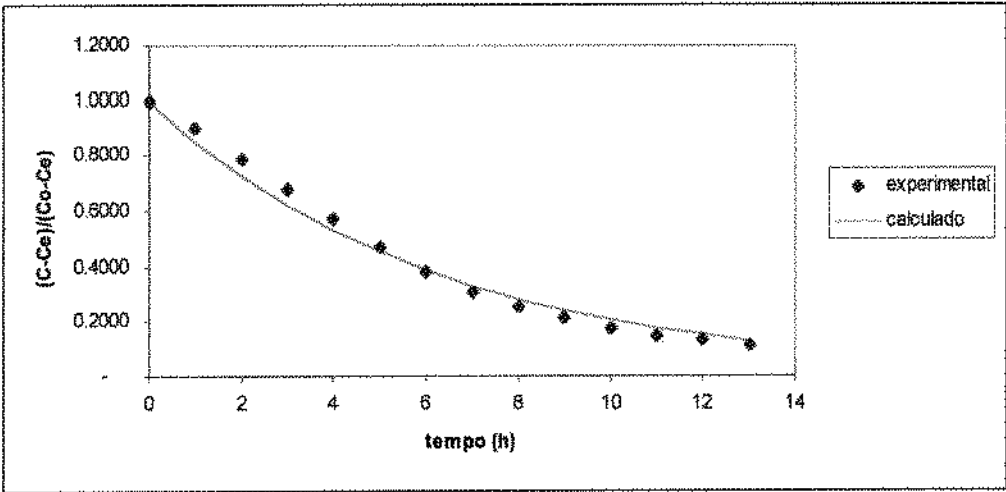


Figura 16. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria esférica ($T = 80^{\circ}\text{C}$ $v = 0,5\text{ m/s}$)

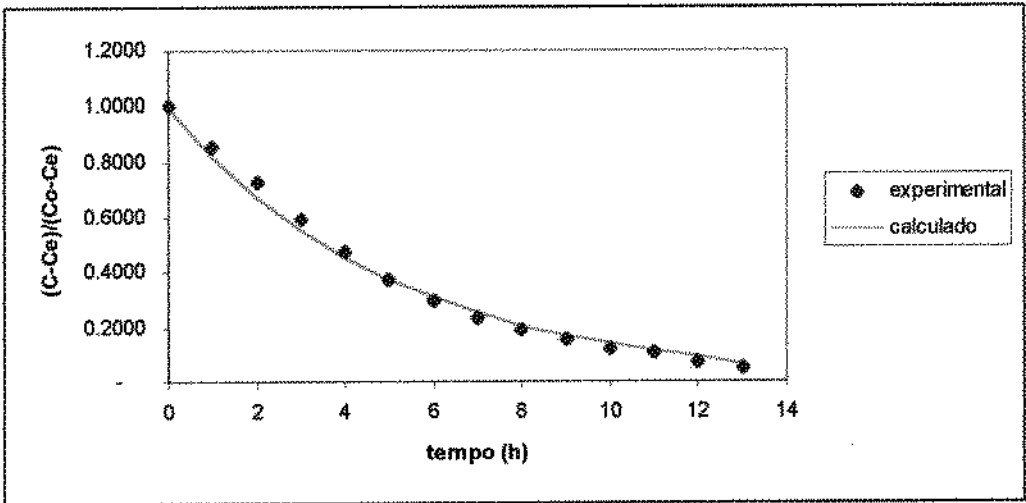


Figura 17. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria esférica ($T = 80^{\circ}\text{C}$ $v = 1,0\text{ m/s}$)

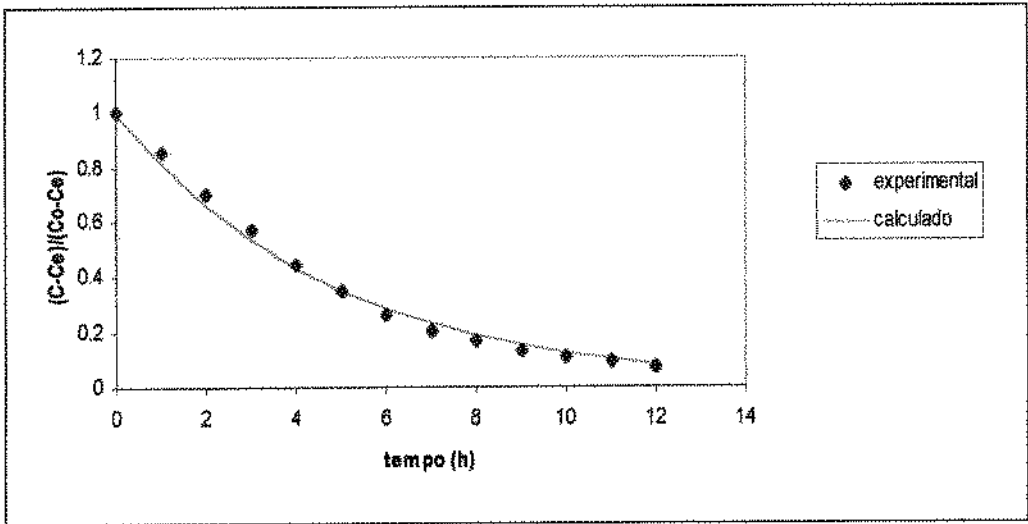


Figura 18. Curvas de secagem de tâmaras ajustada pelo modelo difusional, com encolhimento para geometria esférica ($T = 80^{\circ}\text{C}$ $v = 1,5\text{ m/s}$)