

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

SECAGEM DE UVA ITÁLIA
EM LEITO FIXO

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Alimentos.

ANA LÚCIA GABAS
Engenheira de Alimentos

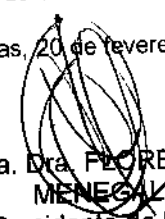
Profa. Dra. FLORENCIA CECILIA MENEGALLI
Orientadora

Prof. Dr. JAVIER TELIS ROMERO
Co-Orientador

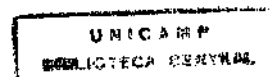
PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por ANA LÚCIA GABAS aprovada pela Comissão Julgadora em 20 de fevereiro de 1998.

Campinas, 20 de fevereiro de 1998.


Profa. Dra. FLORENCIA C.
MENEGALLI
Presidente da Banca

CAMPINAS - 1998



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	
TIPO DE DOCUMENTO	G11s
VL	33 507
NUM. 395/98	
	D X
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	16/04/98
N.º CPD	

CM-00108793-3

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

G11s Gabas, Ana Lúcia
Secagem de Uva Itália em leito fixo / Ana Lúcia Gabas. –
Campinas, SP: [s.n.], 1998.

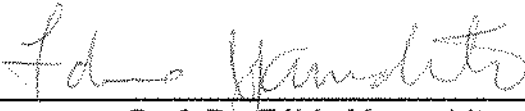
Orientador: Florencia Cecilia Menegalli
Co-orientador: Javier Telis Romero
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1.Secagem. 2.Uva. 3.Permeabilidade. 4.Curvas de isoterma.
I.Menegalli, Florencia Cecilia. II.Telis Romero, Javier.
III.Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia
de Alimentos. IV.Título.

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Florencia Cecilia Menegalli
(DEA/UNICAMP)



Prof. Dr. Fábio Yamashita
(DETA/UNESP)



Prof. Dr. Paulo José do Amaral Sobral
(FZEA/USP)

Profa. Dra. Míriam Dupas Hubinger
(DEA/UNICAMP)

Aos meus pais
Nilson e Cida

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Florencia Cecilia Menegalli e Javier Telis Romero pela orientação, dedicação e apoio no decorrer da tese.

Aos Professores Paulo José do Amaral Sobral, Fábio Yamashita e Miriam Dupas Hubinger, pelas correções e sugestões apresentadas ao trabalho.

Às Professoras Maria Aparecida Mauro, Vânia R. Nicoletti Telis e Marta de Toledo Benassi, pela valiosa colaboração no desenvolvimento da tese.

Ao Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos da UNESP, pelo apoio no desenvolvimento da parte experimental.

À Olivera Trifunovic e Alessandra Rodrigues da Silva pela contribuição na realização dos experimentos.

Aos amigos Ana Lúcia Alvares Jonas e Carlos Alberto Jonas pelo apoio e compreensão.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

À FAPESP e ao CNPq pelo financiamento dos equipamentos e materiais necessários à execução deste trabalho, com processos de No. 95/6327-1 e 521168/96-1 respectivamente.

À EMBRAPA, Campo experimental de Jales-SP e Rio de Janeiro-RJ e à Cooperativa Frupeg de Jales-SP, pelas informações, bem como pelo fornecimento da matéria prima.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	I
ÍNDICE DE TABELAS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	V
NOMENCLATURA	VIII
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. SECAGEM DE UVAS	4
2.2. PRÉ-TRATAMENTOS QUÍMICOS	5
2.3. FUNDAMENTOS DE SECAGEM	6
2.4. TEORIA E MECANISMOS DE SECAGEM	7
2.5. CINÉTICA DE SECAGEM	9
2.5.1. PERÍODO DE TAXA CONSTANTE	9
2.5.2. PERÍODO DE TAXA DECRESCENTE	11
2.5.2.1. MODELOS TEÓRICOS	11
2.5.2.2. MODELOS SEMI-TEÓRICOS	14
2.5.2.3. MODELOS EMPÍRICOS	15
2.5.3. FATORES QUE AFETAM A DE TAXA DE SECAGEM	16
2.5.4. SECAGEM COM ENCOLHIMENTO	17
2.6. TERMODINÂMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS	19
2.6.1. CONTEÚDO DE ÁGUA DE EQUILÍBRIO	19
2.6.1.1. MODELOS EMPÍRICOS DE ISOTERMAS	22
2.6.1.2. MÉTODOS DE MEDIDA	26
2.6.1.3. CALOR ISOSTÉRICO DE SORÇÃO	27
2.6.2. PROPRIEDADES FÍSICAS	29
2.7. PERMEABILIDADE DA CASCA	33

3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1. MATÉRIA-PRIMA E LOCAL DE TRABALHO.....	35
3.2. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA.....	35
3.3. ISOTERMAS DE SORÇÃO.....	36
3.3.1. CALORES DE SORÇÃO	40
3.4. PERMEABILIDADE	40
3.4.1. CÉLULAS DE MEDIDA	41
3.4.2. ESPESSURA DA CASCA (L)	43
3.4.3. PRESSÕES PARCIAIS P_1 E P_2	44
3.3.4. CORREÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO DE GLUCOSE	45
3.5. SECAGEM EM LEITO FIXO.....	46
3.5.1. PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO DAS UVAS	46
3.5.2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	47
3.5.3. OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO	48
3.5.4. ESTUDO DA VARIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DURANTE A SECAGEM.....	49
3.6. ESTUDO DA VARIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DURANTE A SECAGEM	50
3.7. DETERMINAÇÃO DE UMIDADE DAS AMOSTRAS	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1. CARACTERÍSTICAS DA MATÉRIA-PRIMA	53
4.2. ISOTERMAS DE SORÇÃO.....	54
4.2.1. CURVAS DE DESSORÇÃO DE UMIDADE	54
4.2.2. CURVAS DE ADSORÇÃO DE UMIDADE E HISTERESE	62
4.2.3. CALOR ISOSTÉRICO DE SORÇÃO	64
4.3. PERMEABILIDADE DA CASCA DA UVA ITÁLIA AO VAPOR DE ÁGUA	67
4.3.1. EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE GLUCOSE	68
4.3.2. EFEITO DO PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO	70
4.3.3. EFEITO DA TEMPERATURA.....	71
4.3.4. EFEITO DA ESPESSURA DA CASCA.....	72
4.4. COEFICIENTE DE ENCOLHIMENTO E DENSIDADE APARENTE.....	75
4.5. CINÉTICA DE SECAGEM.....	82
4.5.1. EFEITO DA TEMPERATURA DO AR	83
4.5.2. EFEITO DO PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO	86
5. CONCLUSÕES	90
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	92
APÊNDICES	101

ÍNDICE DE TABELAS

<u>Tabela 3.1:</u> Variação da Umidade Relativa de Equilíbrio com a Temperatura.....	37
<u>Tabela 3.2:</u> Equações para Determinar Umidade Relativa de Equilíbrio em Função da Temperatura.....	38
<u>Tabela 4.1:</u> Caracterização química da uva Itália utilizada nos experimentos.....	53
<u>Tabela 4.2:</u> Parâmetros dos modelos de GAB, Halsey Modificado e BET, χ^2 (χ^2) e coeficiente de determinação (R^2), calculados pelo ajuste das isotermas de dessorção da casca da uva Itália a diferentes condições de temperatura.....	59
<u>Tabela 4.3:</u> Parâmetros dos modelos de GAB, Halsey Modificado e BET, χ^2 (χ^2) e coeficiente de determinação (R^2), calculados pelo ajuste das isotermas de dessorção da polpa da uva Itália a diferentes condições de temperatura.....	60
<u>Tabela 4.4:</u> Parâmetros (q_0 e X_0), coeficiente de determinação (R^2) e nível de significância (P) do ajuste da Equação de TSAMI <i>et al.</i> (1990), para os dados do calor isostérico de sorção (q_{st}) e da umidade (X) da casca e polpa da uva.....	67
<u>Tabela 4.5:</u> Valores experimentais obtidos para o cálculo do encolhimento de secagem de uva Itália a 40°C, com pré-tratamento químico de $\text{CaCO}_3 = 2\%(\text{p/v})$ e $\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2 = 0,0\%(\text{v/v})$, onde U = umidade em base úmida; X = umidade em base seca; V_s , V_w e V_a são os volumes do sólido, da água e dos poros de ar; v/v_f = adimensional de volume específico e m_s e m_w = massa do sólido e da água.....	76
<u>Tabela 4.6:</u> Valores do coeficiente de encolhimento (β), densidade aparente do sólido seco (ρ_{bo}) e parâmetros χ^2 (χ^2), coeficiente de determinação (R^2) e nível de significância (P) do ajuste, calculados pela Equação 2.30 na temperatura de 60°C...	79
<u>Tabela 4.7:</u> Valores do coeficiente de encolhimento (β), densidade aparente do sólido seco (ρ_{bo}) e parâmetros χ^2 (χ^2), coeficiente de determinação (R^2) e nível de significância (P) do ajuste, calculados pela Equação 2.30 com pré-tratamento químico de 2% (p/v) de CaCO_3 (sem oleato).....	80
<u>Tabela 4.8:</u> Parâmetros do modelo de Page, χ^2 (χ^2) e coeficiente de determinação (R^2), calculados por regressão dos dados experimentais da cinética de secagem da uva Itália sem pré-tratamento de oleato e a diferentes temperaturas.....	85

<u>Tabela 4.9:</u> Parâmetros do modelo de Page, χ^2 e coeficiente de determinação (R^2), calculados por regressão dos dados experimentais da cinética de secagem da uva Itália à 60°C, em diferentes concentrações de oleato de etila ($C_{20}H_{38}O_2$)	89
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema do processo de secagem de material sólido.....	7
Figura 2.2: Curva de secagem típica: a) umidade; b) taxa de secagem; c) temperatura da partícula.....	8
Figura 2.3: Malha variável com passo igual na direção temporal e desigual na direção espacial	19
Figura 2.4: Curva de dessorção típica e tipos de umidade	21
Figura 3.1: Célula para medida de permeabilidade	41
Figura 3.2: Secador (Degem com controle de UR) utilizado nos ensaios de permeabilidade.....	42
Figura 3.3: Câmara de ensaio.....	43
Figura 3.4: Material utilizado na medida da espessura da casca das uvas	44
Figura 3.5: Secador de Leito Fixo.....	48
Figura 3.6: Aparelho utilizado para determinação do volume individual de uvas com diferentes teores de umidade	52
Figura 4.1: Isotermas de dessorção da casca da uva Itália à diferentes temperaturas	54
Figura 4.2: Isotermas de dessorção da polpa da uva Itália à diferentes temperaturas	55
Figura 4.3: Isoterma de dessorção de umidade da casca e da polpa da uva, na temperatura de 35°C	57
Figura 4.4: Isoterma de dessorção de umidade da casca e da polpa da uva, na temperatura de 60°C	57
Figura 4.5: Isoterma de dessorção da casca da uva Itália, na temperatura de 35°C ajustada pelos modelos de GAB e Halsey modificado	61
Figura 4.6: Isoterma de dessorção da polpa da uva Itália, na temperatura de 35°C ajustada pelos modelos de GAB e Halsey modificado	61
Figura 4.7: Fenômeno de histerese para a casca da uva Itália, na temperatura de 60°C ajustada pela Equação de GAB	62

Figura 4.8: Fenômeno de histerese para a polpa da uva Itália, na temperatura de 60°C ajustada pela Equação de GAB	63
Figura 4.9: Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, para a casca da uva Itália	64
Figura 4.10: Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, para a polpa da uva Itália	65
Figura 4.11: Influência da quantidade de umidade no calor de sorção da casca da uva Itália	65
Figura 4.12: Influência da quantidade de umidade no calor de sorção da polpa da uva Itália	66
Figura 4.13: Curva de evaporação típica	68
Figura 4.14: Efeito da concentração de glucose na permeabilidade da casca da uva Itália ao vapor de água	69
Figura 4.15: Efeito do pré-tratamento na permeabilidade da casca da uva Itália ao vapor de água	70
Figura 4.16: Efeito da temperatura sobre a permeabilidade da casca da uva Itália ao vapor de água	71
Figura 4.17: Efeito da espessura sobre a permeabilidade da casca da uva Itália, sem pré-tratamento	73
Figura 4.18: Efeito da espessura na permeabilidade da casca da uva Itália, com pré-tratamento	74
Figura 4.19: Perda de volume da uva com relação à perda de água na temperatura de 40°C	77
Figura 4.20: Comparação entre os valores da densidade aparente da uva Itália experimental e predito pela Eq.(2.30) a 40°C	77
Figura 4.21: Comparação entre os valores experimentais da densidade aparente da uva Itália a 60°C, com pré-tratamento fixo em 2% (p/v) de CaCO_3 , variando-se as concentrações de $\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2$ (0 a 3%, v/v)	78
Figura 4.22: Comparação entre os valores experimentais da densidade aparente da uva Itália com pré-tratamento químico fixo em 2% (p/v) de CaCO_3	80

Figura 4.23: Efeito da temperatura no coeficiente de encolhimento da uva Itália.....	81
Figura 4.24: Efeito da temperatura do ar na cinética de secagem da uva Itália	83
Figura 4.25: Curvas de secagem da uva Itália.....	85
Figura 4.26: Efeito do pré-tratamento químico na cinética de secagem da uva Itália com ar a 60°C	87
Figura 4.27: Curvas de secagem da uva Itália na temperatura de 60°C.....	88

NOMENCLATURA

a = constante da equação (2.6), adimensional

a_w = atividade de água

A = área, [L^2]

C = constante de Guggenheim ou de BET, adimensional

D = difusividade, [$L^2 \theta^{-1}$]

DH = permeabilidade, [$M.L.F^{-1} \theta^{-1}$]

E = massa de água evaporada, [M]

E_a = energia de ativação, [$H.mol^{-1}T^{-1}$]

h = coeficiente de transferência de calor, [$F.L^{-1}T^{-1}\theta^{-1}$]

H_l = calor de condensação da água pura, [H]

H_m = calor total de sorção da 1ª camada, [H]

H_n = calor total de sorção das multicamadas, [H]

K = constante da Equação de GAB, adimensional

L = espessura, [L]

m = massa, [M]

$\bar{M}$ = umidade residual média, adimensional

N_a = fluxo mássico, [$M \theta^{-1} L^{-2}$]

p = pressão de vapor de água no alimento, [$F.L^{-2}$]

p_0 = pressão de vapor da água pura, [$F.L^{-2}$]

P_0 = constante da Equação (4.1), adimensional

Q_{st} = calor isostérico de sorção, [$H.M^{-1}$]

q_{st} = excesso de calor isostérico de sorção, [$H.M^{-1}$]

R = constante universal dos gases ($R = 0,46188 \text{ kJ/kgK}$), [$H.M^{-1}$]

T = temperatura absoluta, [T]

t = tempo, [θ]

UR = umidade relativa do ar

v = velocidade do ar de secagem, [$L \theta^{-1}$]

V = volume da amostra, [L^3]

x = umidade, adimensional

X = umidade média da partícula, adimensional

X^* = umidade de equilíbrio, adimensional

X_m = teor de umidade na monocamada

X_1 = fração molar da água

X_2 = fração molar do soluto na solução

Letras Gregas

β = coeficiente de encolhimento, adimensional

ε = porosidade das amostras, adimensional

λ = calor latente de vaporização da água, [FL.M⁻¹]

ρ_b = densidade aparente, [M.L⁻³]

ρ_{bo} = densidade aparente do sólido seco, [M.L⁻³]

v = volume específico do material no conteúdo de umidade X, [L³.M⁻¹]

v_o = volume específico em X = 0, [L³.M⁻¹]

Sub-índices

a = ar

bu = bulbo úmido

e = equilíbrio

EF = efetiva

f = final

g = gás

p = partícula

s = sólido

n = componente

o = inicial

vap = vapor

w = água

RESUMO

Neste trabalho, estudou-se a cinética de secagem de uva da variedade Itália, analisando-se a influência da temperatura do ar e de pré-tratamentos químicos, empregando-se soluções alcalinas e oleato de etila. Obteve-se parâmetros não encontrados na literatura para a uva, necessários em projeto de secadores, como densidade aparente em função da umidade do produto, coeficiente de encolhimento volumétrico em função da temperatura e dos pré-tratamentos químicos e curvas de equilíbrio da casca e polpa da uva separadamente. A permeabilidade da casca da uva ao vapor de água foi estudada, considerando-se a influência dos pré-tratamentos químicos, da concentração de glucose, da temperatura do ar e da espessura da casca. Para os ensaios de secagem utilizou-se um secador de leito fixo. As curvas da cinética de secagem foram representadas pela Equação de Page, ajustando-se bem aos dados experimentais, com coeficientes de determinação próximos de 1. A permeabilidade da casca ao vapor de água aumentou consideravelmente com o aumento da concentração do pré-tratamento. A partir da concentração mínima de glucose estudada (10%) até a máxima (70%) a permeabilidade diminuiu para menos da metade de seu valor inicial. Os valores obtidos de energia de ativação para as uvas com e sem pré-tratamento químico foram de 6,94 Kcal/molK e 7,46 Kcal/molK respectivamente. A espessura da casca apresentou um efeito significativo, somente na ausência de pré-tratamento, confirmando ser a película de cera contida na fruta, uma barreira efetiva ao processo de secagem. As isotermas de dessorção foram obtidas em diversas temperaturas (35, 40, 50, 60, 70 e 75°C) e ambas puderam ser bem correlacionadas com a Equação Guggenheim-Anderson-deBoer. A partir das curvas de equilíbrio da casca e polpa da uva, calculou-se o calor isostérico de sorção em função da umidade da amostra.

ABSTRACT

The drying kinetics of the grape variety Italia was studied in this work, analysing the influence of air temperature and chemical pretreatments, using alkaline solution and ethyl oleate. The parameters not found in the literature for dryers project was obtained for grape, like bulk density as function of the moisture of product, volumetric shrinkage coefficient as function of the temperature and chemical pretreatments and equilibrium curves for skin and pulp of the grape separately. A study of grape skin permeability to water vapour was performed, considering the effects of the chemical pretreatments, glucose concentration, air temperature and skin thickness. A fixed bed dryer was used for the drying tests. In order to represent the drying kinetics curves, the Page's Equation was used and good fits was obtained with determination coefficients near 1. Skin permeability to water vapour increased considerably with increasing concentration of pretreatment. The influence of glucose concentration became evident when a gradual increase of its level caused a decrease in the skin permeability. Since minimum glucose concentration studied (10%) until the maximum (70%) the permeability decreased for less than half of it initial value. The values of activation energy obtained for grapes with and without chemical pretreatment, were 6,94 Kcal/molK and 7,46 Kcal/molK respectively. Skin thickness showed a significant effect only in the absence of pretreatment, confirming the fact that the cuticular wax involving the fruits is an effective barrier to water vapour. Desorption isotherms were obtained at different temperatures (35, 40, 50, 60, 70 and 75°C), and both were well correlated with Guggenheim-Anderson-de Boer Equation. The isosteric heat of sorption for skin and pulp of the grape was calculated using the equilibrium curves as a function of the humidity of the sample.

1. INTRODUÇÃO

Um dos procedimentos mais importantes de conservação de alimentos por diminuição de sua atividade de água (a_w) é a desidratação ou secagem. Considerando que a maioria dos produtos vegetais é constituída por mais de 80% de água, o processo de secagem implica em uma considerável redução de custos em transporte e manipulação do produto, além de prover um efetivo método de prolongamento de sua vida útil.

As uvas desidratadas, conhecidas como passas, representam a maior parte das frutas secas produzidas no mundo atualmente. Aproximadamente 50% da produção mundial é originária da Califórnia (EUA). Outros países cuja produção de passas é expressiva são: Turquia, Austrália, Grécia, Irã, África do Sul e Espanha (SOMOGYI & LUH, 1986).

Praticamente toda a uva passa consumida no Brasil é importada da Califórnia, Argentina e Chile, embora a produção de uvas de mesa venha crescendo constantemente no país, principalmente nos estados de São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul e no Vale do Rio São Francisco (FRUPEG, 1996). Isso faz com que exista um grande potencial para o aproveitamento de excedentes de produção, e frutas fora do padrão (manchadas, pequenas, etc), que poderiam ser transformados em passas, reduzindo desperdícios e agregando valor ao produto.

Atualmente, a região de Jales, no interior de São Paulo, contribui com uma boa parcela da produção brasileira de uvas de mesa, destacando-se as variedades Itália, Rubi e Thompson. As cooperativas de produtores dessa região vêm buscando métodos alternativos de processamento da uva, de forma a aumentar o lucro com a produção, o que poderia ser conseguido através da desidratação dessas frutas.

Em geral, as uvas passas ainda são produzidas pelo método tradicional de secagem pela exposição direta ao sol. Entretanto, esse processo tem diversas desvantagens, tais como longos tempos de secagem, contaminação do produto e perdas devido a condições climáticas adversas. Uma opção seria a utilização de secadores mecânicos que empregassem energia solar. Considerando que o Brasil é um país tropical, com temperaturas elevadas e dias ensolarados em quase todo o ano nas diversas regiões produtoras, a secagem de uvas por este método é uma alternativa com um potencial muito grande, principalmente em se tratando de unidades secadoras de baixo custo, que poderiam ser instaladas em sistema de cooperativa entre vários produtores, próximo às propriedades rurais.

A desidratação de uvas tem sido tema de diversos estudos experimentais. Entretanto, a comparação entre as taxas de secagem obtidas não é de grande utilidade, uma vez que diversos fatores, tais como pré-tratamentos, variedade, origem do produto, safra, etc., têm grande influência sobre esse parâmetro.

As uvas contêm uma membrana cuticular contínua cobrindo a epiderme. Este suporte carrega um filme fino de cera, de natureza hidrofóbica, que estabelece uma barreira efetiva contra a perda de água por parte do fruto. Desta forma, faz-se necessário retirar essa cera ou modificar sua estrutura, tornando-a hidrofílica, com o auxílio de pré-tratamentos químicos, antes de submeter a uva ao processo de secagem.

De uma forma geral, produtos biológicos encolhem durante a secagem, e este encolhimento é interessante porque reduz custos de embalagem do produto final, armazenagem e transporte. Um estudo do fenômeno do encolhimento, e de outras propriedades físicas como a densidade aparente e a porosidade, é de grande importância para a modelagem matemática do processo de secagem.

Os objetivos deste trabalho foram estudar a cinética de secagem da uva Itália em secador de leito fixo, analisando-se a influência dos pré-tratamentos químicos e da temperatura do ar de secagem; obter parâmetros para o projeto de secadores não encontrados na literatura para a uva, como massa específica aparente em função da umidade do produto, coeficiente de encolhimento

volumétrico em função de pré-tratamentos químicos e da temperatura do ar e curvas de equilíbrio da casca e polpa da uva separadamente; e estudar a permeabilidade da casca da uva ao vapor de água, considerando a influência de pré-tratamentos químicos, concentração de glucose, temperatura do ar de secagem e espessura da casca.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item são apresentados dados relacionados com produção de uva passa, assim como os pré-tratamentos utilizados em sua produção. Encontram-se relacionados também os fundamentos da secagem de materiais sólidos, com seus respectivos conceitos e mecanismos e as diversas teorias existentes, que tentam explicar a migração de umidade no interior dos sólidos durante o processo de secagem. São apresentados os resultados de diversos trabalhos sobre a secagem de frutas, analisando o comportamento dos mesmos durante os períodos de taxa constante e taxa decrescente. Além disso, contém uma análise do equilíbrio termodinâmico e das propriedades físicas e de transporte, para alimentos.

2.1. SECAGEM DE UVAS

As uvas destinadas ao processo de secagem devem estar completamente maduras, para a obtenção de passas de cor e textura satisfatórias. A uva "in natura" possui cerca de 80% de água (base úmida) e após a desidratação chega a aproximadamente 15-12%. De acordo com FOHR & ARNAUD (1992), a temperatura do ar de secagem pode variar entre 40 e 70° C, dependendo das condições do secador a ser utilizado. Além disso, a velocidade do ar de secagem, em um secador de leito fixo por exemplo, pode variar de 0,5 a 1,8 m/s. Com relação ao tempo de secagem, vários fatores podem influenciar este parâmetro, tais como: pré-tratamentos, temperatura, velocidade e umidade do ar, variedade e origem do produto, tipo de secador, etc.

2.2. PRÉ-TRATAMENTOS QUÍMICOS

Em uvas frescas, a casca e, especialmente a fina camada de cera que a cobre, constituem uma barreira efetiva contra a desidratação e deterioração de sua textura, além de dificultar o ataque microbiano. Esta constituição da parte externa das uvas é também um problema de grande importância para obtenção de produtos desidratados. Por isso, as uvas devem sofrer um pré-tratamento antes de serem submetidas ao processo de secagem, para redução da barreira ao transporte de água (BARNETT, 1980).

A película de cera que recobre a uva possui em sua composição, ésteres de ácidos graxos de alto peso molecular e álcoois, hidrocarbonetos, ácidos graxos livres, álcoois livres, cetonas e aldeídos, constituindo uma estrutura apolar, que ao ser mantida em contato com uma solução básica, ocorrerá a reação de saponificação, tornando-a polar (BELITZ & GROSH, 1985).

Considerando que o processo de secagem de uvas em condições ambientais mediante energia solar, pode levar um tempo de aproximadamente três semanas (PETRUCCI *et al.*, 1974; KERRIDGE & GRNCAREVIC, 1965), o risco de alterações e perda da qualidade do produto é alto. Na prática, a eliminação mecânica das cascas das uvas não é fácil, de maneira que são necessários estudos de outros tipos de tratamento.

O pré-tratamento comumente utilizado é um processo químico, que consiste em mergulhar as frutas em soluções de hidróxido de sódio (lixívia) ou emulsões de óleo em soluções alcalinas, com o objetivo de remover a camada cerosa que envolve a casca e aumentar a taxa de secagem. Tradicionalmente tem-se usado um breve tratamento com soluções diluídas de soda cáustica quente, com a desvantagem das fissuras que este pré-tratamento causa na casca, por onde pode ocorrer perda de suco, resultando em um aspecto pegajoso não desejável ao produto (BARNETT, 1980). GRNCAREVIC *et al.*, (1968) determinaram que a eliminação química da película cerosa diminui em quatro vezes o tempo de secagem de uvas.

Desde a década de 70 na Austrália, vem sendo usados um pré-tratamentos que consistem na imersão da fruta em emulsões diluídas de óleo em soluções alcalinas (O/A), denominadas "dipping oils". A fase oleosa é formada principalmente por ésteres etílicos de ácidos graxos saturados, ésteres de ácido oleico e ácido oleico livre, sendo o éster etílico de ácido oleico (EO: oleato de etila), um dos componentes mais ativos (GRNCAREVIC, 1963; PONTING & MC BEAN, 1970; RADLER, 1964). Este procedimento já era muito usado na Grécia, onde uma suspensão de cinzas e azeite de oliva em água foi adaptada ao desenvolvimento tecnológico atual sem ser submetido a uma investigação científica sistemática, recomendando-se concentrações de 2% de EO e 2,5% de K_2CO_3 (PONTING & MC BEAN, 1970).

Quanto ao mecanismo de ação deste pré-tratamento, GRNCAREVIC *et al.* (1968); GRNCAREVIC (1963) e DUDMAN & GRNCAREVIC (1962) afirmaram que a película cerosa não é eliminada, o que levou CHAMBER & POSSINGHAM, (1963) a afirmarem que só ocorre uma modificação na sua estrutura física.

2.3. FUNDAMENTOS DE SECAGEM

Segundo MC CORMICK (1983) a secagem é normalmente considerada um processo de remoção de umidade de um sólido por evaporação. Quando o calor necessário para evaporar a água é fornecido ao material, ocorrem transferências simultâneas de calor e massa, conforme esquematizado na Figura 2.1. A exposição de uma amostra úmida (Fig. 2.1) ao ar de temperatura T_g , com umidade relativa UR, e velocidade v_g , constantes, constitui uma secagem sob condições constantes. Ocorrerá transferência de calor e de massa simultaneamente, sendo o calor suprido pelo ar, que arrasta a umidade evaporada. A amostra secará de tal forma que a sua umidade (X), a taxa de secagem (R) e a sua temperatura (T_p) poderão ser representados em função do tempo de secagem, formando as curvas a, b, e c, respectivamente, na Figura 2.2.

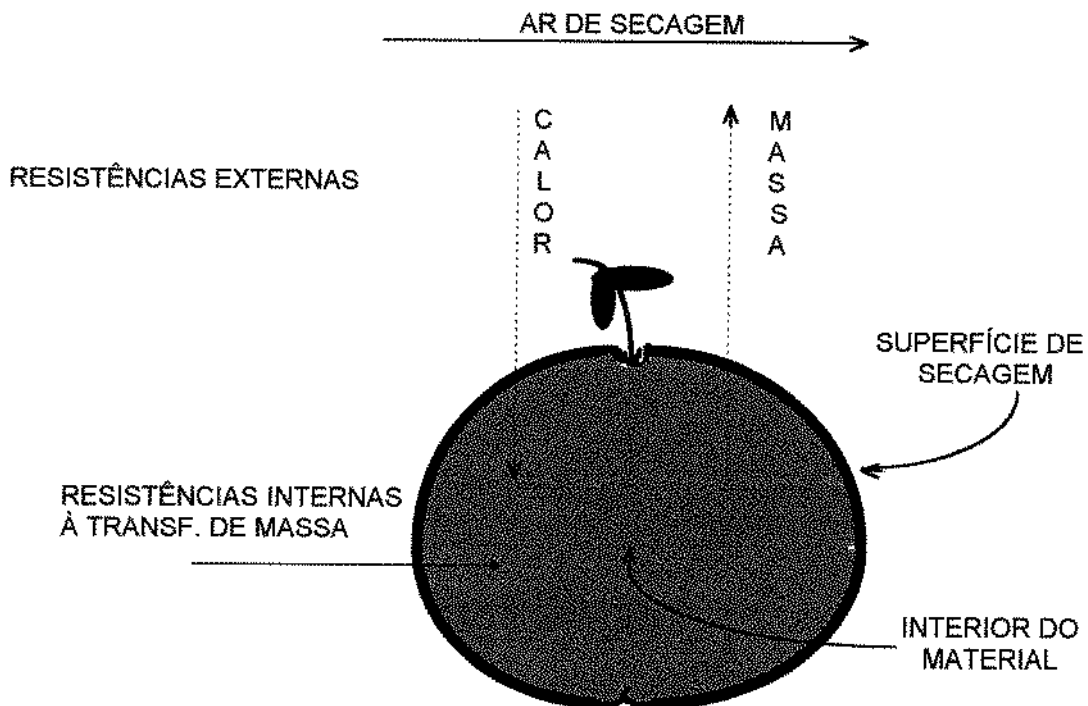


Figura 2.1: Esquema do processo de secagem de material sólido.

2.4. TEORIA E MECANISMOS DE SECAGEM

Desde os pioneiros da pesquisa de secagem foi ressaltado que o conhecimento do mecanismo de transferência de água, do interior do material para a sua superfície, é de fundamental importância para a descrição do fenômeno de secagem. BRUIN & LUYBEN (1980) evidenciam que a migração de umidade através do sólido pode acontecer por meio dos seguintes mecanismos:

1) Transporte de vapor de água

- Difusão devido ao gradiente de concentração
- Difusão de Knudsen
- Difusão térmica
- Escoamento viscoso

2) Transporte de água líquida

- Difusão devido ao gradiente de concentração

- Escoamento capilar
- Difusão superficial
- Movimento por gravidade

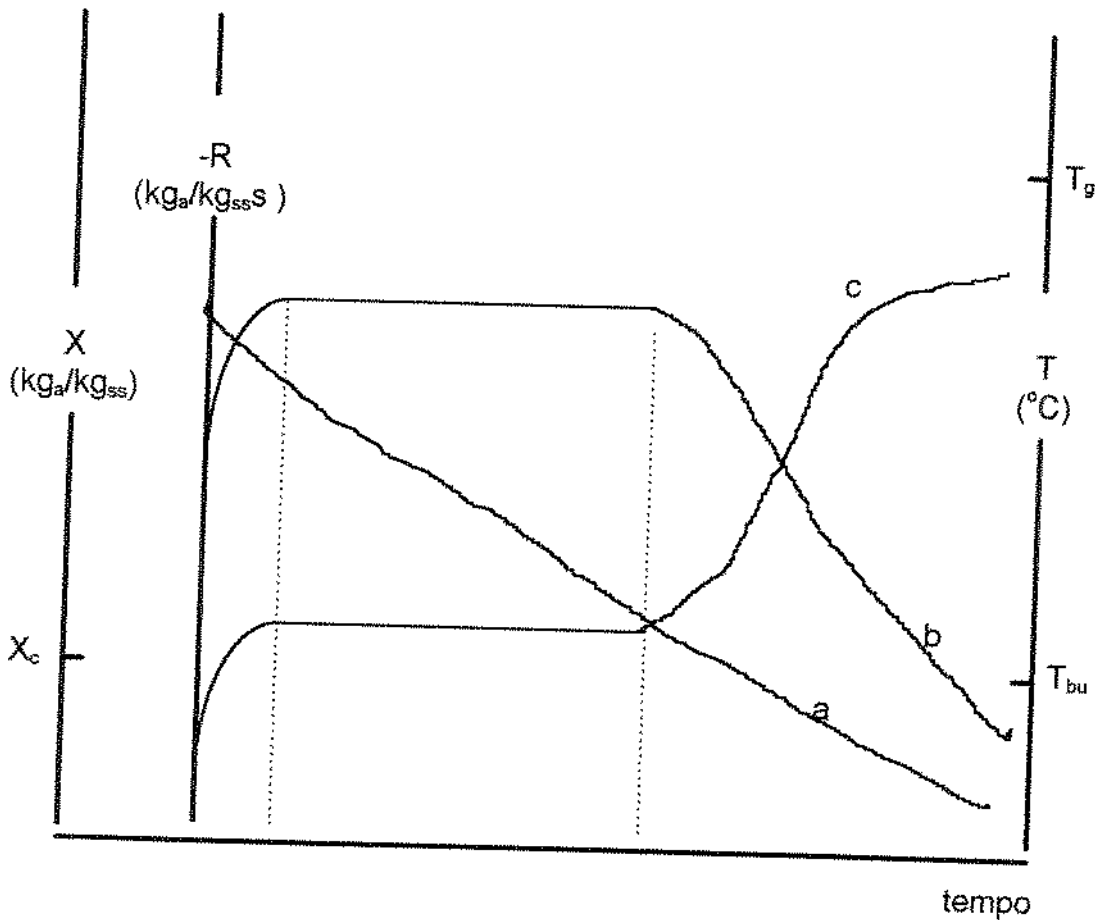


Figura 2.2: Curva de secagem típica: a) umidade; b) taxa de secagem; c) temperatura da partícula.

A difusão de Knudsen ocorre quando o diâmetro dos poros do material é comparável ao percurso livre médio das moléculas de vapor. Ela é importante somente em condições de alto vácuo, como na secagem por liofilização. A difusão térmica (efeito Soret) não é considerada pois seu efeito é desprezível para pequenos gradientes de temperatura, como acontece durante o período de taxa decrescente de secagem. O escoamento viscoso, devido aos gradientes de pressão total, deve ser considerado apenas no início da secagem de alimentos a vácuo. A difusão superficial de água líquida não é levada em consideração por

quaisquer das teorias de secagem de alimentos, pois ela aparece somente em teores de água muito baixos. O movimento por gravidade é freqüentemente desconsiderado, pois não tem significativa influência devido às dimensões dos poros serem muito pequenas (BRUIN & LUYBEN, 1980).

Assim, na secagem de alimentos, os mecanismos mais importantes são: a difusão de vapor devido ao gradiente de concentração, a difusão de água líquida em termos do gradiente de concentração e o escoamento capilar. As transferências internas de massa são influenciadas por dois fenômenos importantes em materiais biológicos (DAUDIN, 1983):

- migração de soluto: formação de crosta.
- deformação do produto: encolhimento.

2.5. CINÉTICA DE SECAGEM

De acordo com o apresentado por MC CORMICK (1983), a secagem pode ser classificada em:

- Período de Taxa Constante
- Período de Taxa Decrescente

2.5.1. Período de Taxa Constante

É caracterizado pelo fato da superfície do material ser mantida num nível de umidade tal que sua pressão parcial é a pressão de saturação à temperatura de bulbo úmido do ar, isto é, a secagem ocorre como se o sistema fosse água pura evaporando. As resistências à transferência de calor e massa estão localizadas somente na corrente de ar, de modo que a taxa de evaporação de água não muda com o tempo.

Segundo CHIRIFE (1983), o fim do período de taxa constante corresponde ao tempo em que a migração interna de água para a superfície não

consegue mais compensar a taxa de evaporação da água livre da mesma. O conteúdo de umidade deste ponto é denominado "umidade crítica". CHIRIFE (1983) também verificou que o período de taxa constante é importante somente para situações em que o potencial de secagem é muito baixo ou a umidade do alimento é muito alta. VACAREZZA *et al.* (1974) e ALZAMORA *et al.* (1979) não observaram a existência do período de taxa constante durante a secagem de vegetais.

CHIRIFE (1983) afirma que os valores da umidade crítica não são somente características de cada material alimentício, mas também dependem de outros fatores, os quais controlam a razão de movimento de umidade (interno/externo), tais como espessura da peça e condições do ar (velocidade, temperatura e umidade relativa).

No estudo da secagem, depois da obtenção das curvas e da caracterização dos períodos de secagem, é interessante descrever o processo matematicamente, de forma que as equações obtidas possam ser utilizadas no próprio estudo da cinética de secagem ou em projetos de secadores.

No período de secagem à taxa constante, a água evapora de acordo com o fornecimento de calor para o sólido úmido, e portanto, a transferência de calor gás-sólido controla o processo. Como todo calor transferido é convertido em calor latente, pode-se representar a taxa de secagem da seguinte forma (CRANK, 1975):

$$Na = \frac{h(T_g - T_{bu})}{\lambda} \quad (2.1)$$

onde: Na - fluxo mássico (kg/h m²);

h - coeficiente de transferência de calor (kcal/h m² °C);

T_g - temperatura do ar (°C);

T_{bu} - temperatura de bulbo úmido do ar (°C)

λ - calor latente de vaporização da água a T_{bu} (kcal/kg);

2.5.2. Período de Taxa Decrescente

Segundo CHIRIFE (1983), este período se inicia quando a migração interna de umidade passa a controlar o processo. Para a primeira fase do período de taxa decrescente, os principais mecanismos de transporte sugeridos são: escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor. Nota-se que um mecanismo não necessariamente exclui os outros, podendo haver a ocorrência simultânea de diversos mecanismos. KING, citado por CHIRIFE (1983), diz que na segunda fase deste período, onde a umidade de equilíbrio está abaixo da saturação, a difusão da fase vapor é provavelmente o mecanismo dominante.

De acordo com DAUDIN (1983), a teoria de migração de água por difusão apoia-se exclusivamente sobre a lei de Fick, expressa em termos do gradiente de umidade. Esta teoria foi aplicada ao estudo da secagem de produtos alimentícios por vários pesquisadores (AGUERRE *et al.*, 1985; ALZAMORA *et al.*, 1979; CARBONELL *et al.*, 1986; YUSHENY & POULSEN, 1988).

De acordo com DAUDIN (1983), as análises feitas com a utilização da lei de Fick, enfocam principalmente o estudo dos efeitos globais do fenômeno interno e, conseqüentemente, não descrevem os possíveis mecanismos de migração. Para descrever o processo de secagem no período de secagem decrescente, utilizam-se modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos. Esses modelos são geralmente de transferência de massa, negligenciando-se o efeito de transferência de calor.

2.5.2.1. Modelos Teóricos

A secagem de alimentos é analisada através de curvas de secagem, apresentadas na forma de umidade adimensional $\left(\frac{\bar{X}}{X_0}\right)$ em função do tempo,

da taxa de secagem (N) em função da umidade absoluta ($\bar{x}$) e do adimensional de água livre, $\varphi = \left(\frac{\bar{x} - x_e}{x_0 - x_e} \right)$, em função do tempo.

A principal teoria utilizada para interpretar a secagem de alimentos e de produtos agrícolas, é a teoria da difusão da umidade como líquido ou vapor, representada pela segunda lei de Fick (CRANK, 1975):

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ap} \nabla x) \quad (2.2)$$

onde: x - umidade (b.s.);

t - tempo;

D_{ap} - difusividade aparente.

CRANK (1975) calculou várias soluções analíticas em forma de séries para a equação da difusão, com diversas condições iniciais e de contorno, considerando a difusividade constante ou variando com a concentração de água. Como o fenômeno de migração é complexo, trabalha-se com a difusividade aparente, que engloba todos os efeitos que podem intervir nesse fenômeno. Essas soluções aplicam-se a sólidos de forma geométrica simples e constantes ao longo do processo.

Considerando-se que o sólido seja uma esfera homogênea, de difusividade constante, que a sua superfície entre em equilíbrio imediatamente com o ar de secagem e que o efeito do gradiente de temperatura dentro da partícula seja desprezível, têm-se a seguinte solução analítica (CRANK, 1975):

$$\bar{M} = 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 \pi^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{ap} t}{r^2}\right) \quad (2.3)$$

onde:

$\bar{M}$ - umidade residual média $(X - X^*)/(X_0 - X^*)$;

X - umidade média da partícula (b.s.);

X^* - umidade de equilíbrio (b.s.);

X_0 - umidade inicial (b.s.);

D_{ap} - difusividade aparente;

t - tempo;

r - raio.

SUAREZ *et al.*, (1980) estudando a secagem de sorgo, consideraram a difusividade constante, baseados em outros autores que determinaram que a difusividade no trigo independe da concentração de água entre 12% e 30% (b.u.) de umidade. AGUERRE *et al.* (1985) secando arroz, também consideraram que a difusividade independe da umidade. LUIKOV, citado por KEEY (1975), considera que a difusividade varia e descreve esse comportamento em quatro regimes, dependendo do estado de sorção da água: em monocamada, em multicamada, em microcapilares e em capilares.

AGUERRE *et al.* (1985) resolveram numericamente a equação da difusão, considerando três tipos de relação entre a difusividade e a umidade: exponencial, potencial e hiperbólica, concluindo que a determinação da difusividade a partir da inclinação da reta de secagem, em coordenadas semi-logarítmicas, não fornece necessariamente o valor real e nem indica que a difusividade é constante.

A migração de água em sólidos pode ser representada pela segunda lei de Fick (Equação 2.2). A maioria dos cereais (arroz, trigo, feijão, soja, etc.) apresentam uma pequena mudança de volume durante a secagem. Desta maneira, esta solução analítica pode ser aplicada satisfatoriamente no estudo destes materiais. Para alimentos de alto conteúdo de umidade (uva, caqui, ameixa, maçã, etc.) a variação de volume é grande e por esta razão as soluções analíticas da Equação (2.2) não podem ser aplicadas.

2.5.2.2. Modelos Semi-Teóricos

Alguns modelos semi-teóricos são baseados na teoria da difusão, assumindo que a resistência ocorre numa camada fina na superfície das partículas, como o modelo de Lewis, análogo à lei do resfriamento de Newton, que na sua forma integrada (Equação 2.4), é comumente chamada de modelo exponencial. Este modelo estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre na forma (PARRY, 1985):

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = -K(\bar{x} - x_e) \quad (2.4)$$

onde o fator de proporcionalidade K é denominado de constante de secagem. Esta equação é a expressão da lei de resfriamento de Newton considerando que toda a resistência ao transporte de umidade concentra-se na camada limite. A Equação (2.4) é normalmente utilizada na forma integral, como:

$$\bar{M} = \frac{\bar{x} - x_e}{x_o - x_e} = \exp(-Kt) \quad (2.5)$$

onde: $\bar{M}$ - umidade residual média $(X - X^*)/(X_o - X^*)$;

t - tempo;

K - constante.

CHIANG & PETERSEN (1985) citam autores que determinaram que " K ", durante a secagem de grãos, é função da temperatura absoluta dos grãos, e outros que determinaram que " K " depende da umidade e da temperatura de secagem.

2.5.2.3. Modelos Empíricos

Outras duas importantes modificações do modelo exponencial na forma integrada a dois e três parâmetros que apresentam bons ajustes experimentais são:

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = a \cdot \exp(-Kt) \quad (2.6)$$

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = C \exp(-Kt^n) \quad (2.7)$$

A equação (2.6) é similar à solução do modelo de Fick para tempos de secagem longos quando apenas o primeiro termo da solução em série for significativo (MC CORMICK, 1983).

Esta correlação é utilizada por muitos pesquisadores da área de secagem para a determinação da difusividade efetiva a partir da constante de secagem, como observado nos trabalhos de AGUERRE *et al.* (1982) para arroz, TOBINAGA & PINTO (1992) para filés de peixes, VACCAREZZA *et al.* (1974) para raiz de beterraba açucareira, CARBONELL *et al.* (1986) para pimenta, SARAVACOS & RAOUZEOS (1986) para amido, YUSHENY & POULSEN (1988) para batata e MAZZA & LEMAGUER (1980) para cebola. A relação entre estes parâmetros é:

$$K = \frac{\pi^2 D_{EF}}{4L_0^2} \quad \text{para lâminas (secagem por um lado)} \quad (2.8)$$

$$K = \frac{\pi^2 D_{EF}}{r^2} \quad \text{para esferas} \quad (2.9)$$

A equação (2.7) é conhecida como modelo de Page, sendo freqüentemente utilizado nos estudos da secagem de produtos agrícolas, em particular para grãos e sementes, por apresentar excelentes resultados (PARTI & DUGMANICS, 1990; PATHAK *et al.*, 1991). MISRA & BROOKER (1980) compilaram dados de secagem de milho em camada fina, de nove fontes diferentes, e ajustaram-nos através da Equação de Page, observando que "n" reflete a resistência interna à secagem, enquanto "K" representa os efeitos das condições externas. Diferentes tipos de equações empíricas podem ser encontradas nas revisões feitas por DAUDIN (1983) e PARRY (1985).

2.5.3. Fatores que Afetam a Taxa de Secagem

De acordo com HOLDSWORTH (1971) os principais fatores que afetam a taxa de secagem são:

- propriedades físicas do produto;
- arranjo geométrico do produto em relação à superfície de transferência de calor;
- propriedades físicas do ambiente de secagem;
- características do equipamento de secagem.

Segundo VAN ARSDEL *et al.* (1973), dos fatores citados, o que mais influencia a taxa de secagem é a natureza da matéria prima, compreendendo a constituição química e física das paredes das células. A conclusão de VACCAREZZA *et al.* (1974), ao estudarem a secagem de beterraba, foi que a taxa de secagem é afetada principalmente pela temperatura de secagem e tamanho da partícula, e em menor grau pela velocidade do ar.

Trabalhando com cação da espécie *Prionace glauca*, TORRANO & OKADA (1977) observaram uma variação da taxa de secagem em relação às amostras com e sem pele. Os pedaços com pele apresentaram taxas maiores do

que os sem pele, isto devido à pele agir como uma membrana porosa, facilitando a saída de água e evitando a secagem rápida da superfície.

ALZAMORRA *et al.* (1979), ao estudarem a desidratação de abacate verificaram, dentre os fatores avaliados, o teor de óleo como sendo o que mais influenciou na taxa de secagem. A difusividade de água é afetada negativamente pelo teor de óleo. Ao analisarem o efeito de diferentes velocidades do ar na umidade do material durante a secagem de grão de sorgo, SUAREZ *et al.* (1980) concluíram que a resistência interna é o que mais afeta a taxa de perda de umidade, já que o acréscimo da velocidade do ar não influi na taxa de secagem.

VAGENAS *et al.* (1990a) ao estudarem a secagem de alimentos, verificaram que dentre as dificuldades ou problemas encontrados durante a secagem, tem-se a complexidade da composição e estrutura do alimento e mais especificamente:

- os coeficientes de transferência de calor e massa bem como as propriedades termodinâmicas do alimento, são funções da temperatura e umidade, de forma que a equação diferencial resultante do sistema torna-se não linear e somente pode ser resolvida por métodos numéricos. Verificaram que alguns autores assumem propriedades constantes por conveniência matemática para obtenção de solução analítica;
- o alimento encolhe consideravelmente, ocasionando mudanças no tamanho e forma, afetando a taxa de secagem. Alguns autores negligenciam o encolhimento considerando seus efeitos na difusividade efetiva. Quando o encolhimento é considerado, seu efeito é reconhecido somente como decréscimo nas dimensões da amostra.

2.5.4. Secagem com Encolhimento

O estudo do encolhimento é de grande importância para um melhor entendimento do processo de secagem. SUAREZ & VIOLLAZ (1991)

analisando a secagem de batata compararam o uso da segunda lei de Fick com difusividade constante e sem encolhimento e da lei de Fick de difusão com encolhimento, encontrando resultados diferentes. Alguns pesquisadores têm admitido que o decréscimo do volume durante a secagem seja equivalente ao volume removido de umidade (LOZANO *et al.*, 1983).

Na secagem de frutas com altos teores de umidade acontece mudança de volume. Nestes casos a condução de calor e a difusão de massa é realizada através de uma interface cuja forma e tamanho muda com o tempo. Só um pequeno número de problemas de fronteira móvel admitem solução analítica (item 2.5.2.1). Estes incluem os clássicos problemas unidimensionais e multidimensionais de Stefan e Newman (CARSLAW & JAEGER, 1959).

Geralmente são requeridas técnicas numéricas para a solução de problemas de fronteira móvel bidimensionais, assim como para muitos problemas unidimensionais.

Tem-se desenvolvido muitas técnicas numéricas para a solução de destes tipos de problemas. Um método muito utilizado é introduzir uma transformação de coordenadas para imobilizar a fronteira. HSU *et al.*, (1981) utilizaram este método com bastante êxito, porém sua aplicação é complexa. Estes problemas também têm sido resolvidos, mediante técnicas de elementos finitos. Os procedimentos desenvolvidos por ICHIKAWA & KIKUCHI (1978) e por ROLPH & BATHE (1980) são interessantes devido à sua precisão e estabilidade. Esses autores empregaram uma malha fixa de elementos finitos.

Entre os métodos mais comuns que empregam diferenças finitas, estão os métodos de malha variável. Nestas técnicas o domínio $x-t$ é subdividido em passos iguais numa só direção. O tamanho da malha na outra direção é variável e é determinado na forma tal que a interface sempre caia sobre um ponto nodal da malha.

O método de MURRAY & LANDIS, (1959) que emprega diferenças finitas, consiste em representar a partícula por um sistema de malha variável, considerando-se passos iguais na direção temporal e mantendo-se o número de

pontos nodais na direção espacial. Isto faz com que o tamanho da malha, numa dada direção, varie à medida que a interface se movimenta, uma vez que um extremo da malha estará na superfície da partícula e o outro no centro (Fig. 2.3).

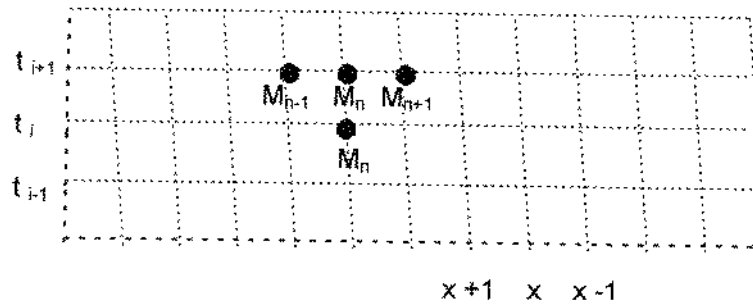


Figura 2.3: Malha variável com passo igual na direção temporal e desigual na direção espacial.

A técnica implícita, no método das diferenças finitas, consiste no cálculo do valor da umidade dos pontos nodais M_{n-1} , M_n e M_{n+1} , no tempo t_{i+1} , a partir dos valores de M_n no tempo t_i . A solução da equação diferencial se resume à solução simultânea de um sistema de equações.

No trabalho original, os autores utilizaram uma técnica explícita em diferenças finitas, para resolver a equação diferencial. GABITO & AGUERRE (1985) modificaram o método acima, resolvendo a equação com uma técnica implícita, e observaram que essa técnica é mais estável que a outra, apesar dos resultados se ajustarem em ambos os casos. De acordo com SANJUÁN *et al.* (1996), as técnicas numéricas baseadas no método das diferenças finitas são adequadas para modelar a difusão de umidade em partículas esféricas.

2.6. TERMODINÂMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS

2.6.1. Conteúdo de água de equilíbrio

A isoterma é uma relação de equilíbrio que vincula o conteúdo de água de um produto alimentício com a temperatura e umidade relativa do ar circundante,

sendo de fundamental importância no estudo da conservação de alimentos desidratados (VAN DEN BERG & BRUIN, 1981). Além disso, possui inúmeras aplicações no estudo de alimentos "in natura", no seu processamento e em produtos acabados. Incluem-se aí, entre outros, o projeto de secadores, a predição das condições finais de misturas de diversos ingredientes em alimentos formulados, o projeto de embalagens e simulação de alterações de umidade que ocorrem durante a estocagem, além da predição da estabilidade e vida de prateleira dos produtos.

A umidade contida em sólidos úmidos exerce uma pressão de vapor que depende da interação da água com a matriz sólida e da temperatura. Se o sólido úmido for exposto a um ambiente ventilado, com pressão parcial de vapor de água constante e menor que a pressão de vapor em equilíbrio com a umidade do sólido, esse perderá umidade para o ambiente, até igualar as pressões. Diz-se, então, que o sólido e o gás estão em equilíbrio e que a umidade do sólido é a umidade de equilíbrio para a dada condição ambiental.

As curvas obtidas ao se graficar a umidade do sólido versus a umidade relativa do ar, sob a qual o mesmo encontra-se em equilíbrio, para temperaturas constantes, são as denominadas isotermas de sorção. As isotermas são classificadas como sendo de adsorção, caso a determinação da umidade do produto tenha sido feita ao longo de um processo de umedecimento, ou de dessorção, como no processo de secagem. Frequentemente há diferenças entre isotermas de adsorção e de dessorção para um mesmo produto e em condições idênticas de determinação, fenômeno a que se denomina histerese.

Na figura 2.4, mostra-se uma típica isoterma de dessorção, de forma sigmoideal, onde se ilustram os diversos tipos de umidade.

As umidades ligadas e não ligadas, referem-se às umidades contidas numa substância, que exercem uma pressão de vapor menor e igual à do líquido puro na mesma temperatura respectivamente. A umidade livre é aquela que está em excesso, isto é, está acima da umidade de equilíbrio, nas condições de secagem.

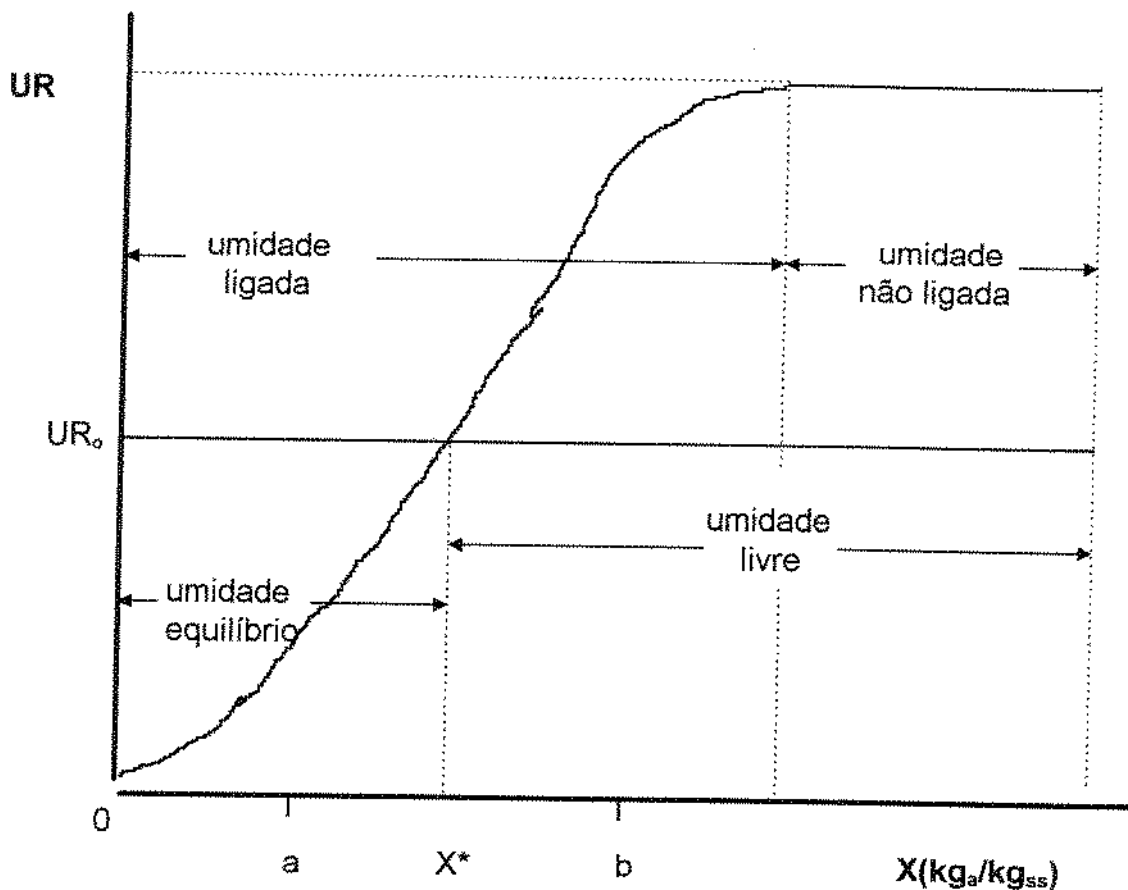


Figura 2.4: Curva de dessorção típica e tipos de umidade.

LABUZA *et al.* (1970) explicam a união entre a água e os sólidos, nos alimentos, da seguinte forma: na região "0-a" da Figura (2.4) a água está aderida em monocamadas; na faixa de umidade de "a" até "b", a água está aderida em multicamadas; finalmente numa região de condensação, acima de "b", a água encontra-se condensada nos poros da estrutura. DĂSCĂLESCU (1969) apresenta quatro formas diferentes de união entre a água e os sólidos porosos: forças capilares, adsorção, osmose e tensão mecânica.

A isoterma pode ser dividida em três regiões, dependendo do estado em que se encontra a água presente no alimento. A primeira região, a qual cobre a faixa de a_w de 0 até cerca de 0,35, representa a adsorção de um filme monomolecular de água. A segunda região, entre 0,35 - 0,60 representa a adsorção de camadas adicionais de água sobre a monocamada. Finalmente a

terceira região, acima de 0,60 de a_w , representa a região onde a água se condensa nos poros do material e solubiliza compostos solúveis presentes.

Muitos dos dados de sorção da literatura foram obtidos somente em uma temperatura, representando as condições normais de estocagem. Entretanto, propriedades de sorção através de uma extensa faixa de temperatura são essenciais para modelar os processos de desidratação e reidratação, bem como a estabilidade de estocagem de alimentos desidratados.

A variação do potencial químico da água no alimento em relação à água pura, pode ser calculado em função da atividade de água (a_w), como:

$$a_w = \frac{p}{p_0} \quad (2.10)$$

onde:

p = pressão de vapor de água no alimento, à uma determinada temperatura;

p_0 = pressão da água pura na mesma temperatura.

2.6.1.1. Modelos Empíricos de Isotermas

Diversos modelos para descrever o comportamento das isotermas de sorção de umidade têm sido publicados, fornecendo equações cujas constantes podem ser determinadas para cada tipo de alimento estudado (BOKI & OHNO, 1991).

Um determinado modelo de isoterma pode se considerado mais adequado do que outro, principalmente quando descreve com maior precisão o fenômeno de adsorção ou dessorção para uma ampla faixa de atividade de água. Uma outra característica importante é a possibilidade destes modelos fornecerem informações importantes acerca do fenômeno de sorção, tais como, a água adsorvida na monocamada ou o calor de sorção para a primeira e para as camadas subsequentes (IGLESIAS & CHIRIFE, 1983).

Várias teorias e equações empíricas têm sido sugeridas na literatura para descrever a relação entre atividade de água e conteúdo de umidade.

SARAVACOS *et al.* (1986) estudando o efeito da temperatura nas isotermas de adsorção de água em passas, com a utilização do método estático das soluções salinas, obtiveram uma boa interpretação dos dados experimentais. Dentre as equações utilizadas para ajustar os dados, estão as equações de Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB) e Halsey modificada.

De acordo com os resultados de SARAVACOS *et al.*, (1986), o modelo GAB descreveu bem os dados, porém, tornou-se menos satisfatório para altas temperaturas e atividades de água. A equação de Halsey se ajustou melhor aos dados experimentais numa larga faixa de temperatura e atividades de água, quando comparado ao primeiro modelo.

As equações utilizadas neste trabalho para descrever o comportamento das curvas de dessorção de umidade das uvas variedade Itália, estão relacionadas a seguir:

Equação de BET (Brunauer, Emmett e Teller, 1938): é a mais utilizada e fornece um bom ajuste para uma variedade de alimentos sobre a região de atividade de água entre 0,05 e 0,45, sendo expressa da seguinte forma (RIZVI, 1986):

$$X = \frac{X_m C a_w}{(1 - a_w)(1 + (C - 1)a_w)} \quad (2.11)$$

onde:

X = teor de umidade (b.s.)

a_w = atividade de água

X_m = teor de umidade da monocamada (b.s.)

C = constante de BET relacionada ao calor de sorção, sendo,

$$C = k \exp\left(\frac{\Delta H_{BET}}{RT}\right) \quad (2.12)$$

onde:

k = constante da equação

ΔH_{BET} = calor de sorção total do modelo

R = constante universal dos gases

T = temperatura (K)

O conceito do teor de umidade da monocamada (X_m) tem sido bastante estudado em alimentos, devido à sua relação com a estabilidade química e física de alimentos desidratados.

Equação de Halsey Modificada (1948): foi desenvolvida supondo-se que a condensação ocorre em multicamadas, assumindo que o potencial de energia da molécula varia inversamente com a distância radial (r) da superfície. Sua forma linearizada é dada por (RIZVI, 1986):

$$X = \left(\frac{k}{\ln c / a_w} \right)^{1/r} \quad (2.13)$$

onde:

k , c e r são constantes do modelo modificado de Halsey.

Equação de GAB (Guggenheim-Anderson-deBoer): é um modelo de três parâmetros, fisicamente significativos, que têm sido sugerido como o modelo matemático mais versátil para a sorção de alimentos. É expressa da seguinte forma (RIZVI, 1986):

$$X = \frac{(C-1)K a_w X_m}{1 + (C-1)K a_w} + \frac{K a_w X_m}{1 - K a_w} \quad (2.14)$$

onde:

X_m = conteúdo de água na camada monomolecular (b.s.)

C = constante de Guggenheim

$$C = c \exp\left(\frac{(H_m - H_n)}{RT}\right) \quad (2.15)$$

onde:

H_m = calor total de sorção da primeira camada

H_n = calor total de sorção das multicamadas

R = constante universal dos gases

T = temperatura (K)

K = constante da equação

$$K = k_o \exp\left(\frac{(\lambda - H_n)}{RT}\right) \quad (2.16)$$

onde:

k_o = constante da equação

λ = calor de condensação da água pura

H_n = calor total de sorção das multicamadas

As vantagens encontradas para esta equação são a viabilidade de conhecimentos teóricos, a descrição da sorção abrangendo uma faixa de atividade de água entre 0 e 0,9, a forma matemática simples, com parâmetros que possuem significado físico e a capacidade de descrever alguns efeitos da temperatura (VAN DEN BERG, 1984).

2.6.1.2. Métodos de Medida

O levantamento das relações entre a atividade de água e o teor de umidade em equilíbrio de um produto, em condições de temperatura constante, pode ser realizado através de diversos métodos, diretos e indiretos (NOREÑA *et al.*, 1996). Entre os métodos diretos, destaca-se o gravimétrico, que além de fornecer informações completas da curva de sorção do produto, é de simples aplicação.

O método gravimétrico, consiste em colocar o material seco (adsorção) ou "in natura" (dessorção), em contato com diversas umidades relativas conhecidas, até atingir o equilíbrio e subsequente, determinar-se a umidade das amostras, através do método padrão recomendado para cada produto (JOWITT *et al.*, 1983).

As várias umidades relativas são obtidas com soluções salinas saturadas, com atividade de água entre 0,1 até 0,9, utilizando-se sais que mudam pouco sua solubilidade com a temperatura (NOREÑA *et al.*, 1996).

As soluções saturadas são colocadas em pequenos potes, vedados, sob vácuo ou não. Os potes contendo as amostras são colocados em câmaras de temperatura constante (estufa de convecção forçada) ou banhos termostáticos, por um período de tempo previamente determinado, até atingir a umidade de equilíbrio, o que é verificado pela constância de peso das amostras. O controle da temperatura deve ser rigoroso, para evitar problemas de condensação de água na amostra (NOREÑA *et al.*, 1996).

Este método é amplamente utilizado, apesar de ser demorado, já que os tempos para se atingir o equilíbrio podem estar na faixa de 2 a 5 semanas. O pré-tratamento das amostras com radiação ultravioleta e o uso de solução de formalina na limpeza dos recipientes utilizados como dessecadores podem ser necessários em a_w superiores a 0,80, para evitar a deterioração da amostra (NOREÑA *et al.*, 1996).

2.6.1.3. Calor Isostérico de Sorção

O calor isostérico de sorção (Q_{st}) é um parâmetro termodinâmico, obtido a partir de dados de equilíbrio de sorção e representa a quantidade de energia necessária para adsorver ou dessorver a água dos alimentos. Seu valor é geralmente calculado através da aplicação da equação de Clausius-Clapeyron. A equação pode ser expressa da seguinte forma (RIZVI, 1986):

$$\left. \frac{\partial \ln(p/p_0)}{\partial (1/T)} \right|_X = \left. \frac{\partial \ln(a_w)}{\partial (1/T)} \right|_X = -\frac{Q_{st} - \lambda}{R} \quad (2.17)$$

onde:

R = constante universal dos gases

T = temperatura absoluta

p = pressão de equilíbrio

p_0 = pressão de vapor da água pura

λ = calor de vaporização da água pura

Integrando esta equação entre as temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente, obtém-se:

$$\ln \left(\frac{a_{w2}}{a_{w1}} \right) \Big|_X = -\frac{q_{st}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2.18)$$

onde q_{st} é o excesso de calor de sorção, ou seja,

$$q_{st} = Q_{st} - \lambda \quad (2.19)$$

Para obter estimativas precisas de q_{st} é necessário construir isotermas de sorção a diversas temperaturas, na faixa de interesse, sendo necessárias no mínimo 2 temperaturas diferentes. Isto se deve às considerações que são feitas na aplicação da equação de Clausius-Clapeyron. Em primeiro, o calor de

vaporização da água pura e o excesso de calor de sorção não devem variar com a temperatura, e, segundo, a equação é aplicada apenas quando o teor de umidade do sistema permanece constante.

Para o caso de alimentos, que são sistemas complexos, a extrapolação para temperaturas muito altas, invalidaria as considerações acima, devido a mudanças irreversíveis nas propriedades da água do sistema (RIZVI, 1986). De acordo com ZHANG *et al.* (1996) que estudaram isotermas de dessorção de umidade de alguns vegetais nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C, o calor isostérico de sorção pode ser usado para estimar a energia requerida no processo de desidratação de alimentos.

Para TSAMI *et al.* (1990) o conhecimento da dependência do calor de sorção da água em função do teor de umidade é essencial no estudo de vários processos envolvendo alimentos, podendo ser usado para estimar as necessidades energéticas do processo de secagem, além de fornecer dados importantes sobre o estado da água nos produtos alimentícios.

Quando se grafica a isosteres de sorção como o logaritmo natural da atividade de água contra o inverso da temperatura absoluta, para determinados valores de umidade da amostra, obtém-se o coeficiente angular correspondente à $-q_{st}/R$ (ZHANG *et al.*, 1996). Desta forma, pode-se calcular o valor de q_{st} .

TSAMI *et al.* (1990) utilizaram a seguinte relação exponencial empírica entre o calor de sorção e o teor de umidade para algumas frutas secas, proposta na seguinte forma:

$$q_{st} = q_0 \exp \left(-X_{eq}/X_0 \right) \quad (2.20)$$

onde:

q_0 = calor isostérico de sorção da primeira molécula de água

X_{eq} = teor de umidade de equilíbrio

X_0 = conteúdo de umidade característico do material alimentício

2.6.2. Propriedades Físicas

De uma forma geral, produtos biológicos encolhem durante a secagem causando variação da área superficial, do raio, da densidade e da porosidade dos sólidos. DĂSCĂLESCU (1969) cita três classes de deformação: contração, formação de fendas e alterações estruturais causadas pela temperatura.

A densidade aparente é definida como a razão entre a massa e o volume aparente do material, isto é, o volume incluindo todos os poros internos. A densidade da partícula é a razão entre a massa e o seu volume, descontando o volume dos poros internos. A porosidade do material é uma relação entre a densidade aparente e a densidade da partícula e é dependente da quantidade de água inicial, da composição e do tamanho do material alimentício, do tipo de secagem e suas condições tais como: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar (MADAMBA *et al.*, 1994). Medidas experimentais são essenciais para expressar essas propriedades como funções do conteúdo de umidade.

LOZANO *et al.* (1983) estudaram a deformação durante a secagem de cenoura, alho, pêra, batata e batata doce, cortados em cilindro e observaram que esses produtos tiveram o volume reduzido em 70%-90% do volume original, e que o volume obedeceu uma função linear da umidade, para valores de X/X_0 acima de 0,15, enquanto que para valores menores, o volume seguiu uma função exponencial. Tal comportamento, porém, não foi observado no estudo da densidade aparente e da porosidade.

GUSTAFSON & HALL (1972) citam autores que observaram que a densidade aparente aumenta e a porosidade diminui durante a secagem de milho com ar ambiente. Esses autores encontraram uma relação linear entre a densidade aparente e a umidade mas, quanto à porosidade, observaram haver um mínimo. TUOHY (1980), fabricando proteínas texturizadas com microondas, observou que a densidade aparente do produto permanecia constante durante o processo, porque a perda de peso causada pela secagem, era compensada pela redução de volume.

DAUDIN (1983) verificou uma correlação exponencial entre o volume e o tempo de secagem. KEEY (1975) sustenta uma relação linear entre o volume e a umidade das partículas, mas considera que materiais porosos com capilares alinhados, e materiais extrusados com cadeias de macromoléculas parcialmente alinhados, podem mostrar um encolhimento anisotrópico. O autor cita dois fatores, de ação contrária, que influenciam o encolhimento: o encolhimento aumenta com o aumento da temperatura e diminui com o aumento da taxa de secagem.

WANG & BRENNAN (1995) observaram que o encolhimento afeta as propriedades físicas dos materiais, como a densidade e a porosidade. Durante a secagem de batata, eles verificaram algumas mudanças na estrutura deste produto (com auxílio de microscópio), assim como na densidade e porosidade. A densidade, num dado teor de umidade, decresce com o aumento da temperatura de secagem. O volume durante a secagem do produto decresce linearmente com o conteúdo de umidade.

ZOGZAS *et al.* (1994) determinaram experimentalmente a densidade aparente, a densidade da partícula, o encolhimento e a porosidade durante a secagem de maçã, cenoura e batata (cubos) para vários conteúdos de umidade. Neste trabalho, assumiram que a massa total do material úmido consiste de sólidos secos, água e ar, de onde obtiveram as definições a seguir.

Densidade aparente do material úmido (ρ_b):

$$\rho_b = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_w + V_a} \quad (2.21)$$

Densidade da partícula (ρ_p):

$$\rho_p = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_w} \quad (2.22)$$

onde:

m_s e m_w = massas do sólido seco e da água respectivamente.

V_S , V_W e V_a = volumes do sólido seco, da água e dos poros de ar respectivamente.

Densidade do sólido seco (ρ_S) e da água (ρ_W):

$$\rho_S = \frac{m_S}{V_S} \quad (2.23)$$

$$\rho_W = \frac{m_W}{V_W} \quad (2.24)$$

Porosidade (ε):

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_S + V_W + V_a} \quad (2.25)$$

Volume específico da amostra (v):

$$v = \frac{V_S + V_W + V_a}{m_S} \quad (2.26)$$

Coefficiente de encolhimento do volume (β):

$$\frac{v}{v_0} = 1 + \beta X \quad (2.27)$$

onde:

v = volume específico do material no conteúdo de umidade X

v_0 = volume específico em $X = 0$

Conteúdo de umidade do material em base seca:

$$X = \frac{m_W}{m_S} \quad (2.28)$$

Combinando as Eqs. (2.22), (2.23), (2.24) e (2.28) os autores obtiveram a seguinte equação:

$$\rho_p = \frac{1 + X}{\frac{1}{\rho_s} + \frac{X}{\rho_w}} \quad (2.29)$$

Além disso, combinando as Eqs. (2.21), (2.26), (2.27) e (2.28) eles obtiveram:

$$\rho_b = \frac{\rho_{bo}(1 + X)}{1 + \beta X} \quad (2.30)$$

onde:

ρ_{bo} = densidade aparente do sólido seco ($X=0$).

As porosidades dos gêneros alimentícios considerados pelos autores, puderam ser preditas através de correlações adequadas. Eles utilizaram uma equação para estimar a porosidade em função do conteúdo de umidade na forma:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (2.31)$$

VAGENAS *et al.* (1990b) examinaram as propriedades de transporte da uva passa e propuseram um modelo simples para expressar a densidade da partícula como uma função do conteúdo de umidade:

$$\rho_b = (1 - \varepsilon) \frac{\rho_{bo} \rho_w}{\rho_w + (\rho_{bo} - \rho_w) X_w} \quad (2.32)$$

Segundo VAN ARSDEL *et al.* (1973) as células vivas de origem animal ou vegetal exibem um determinado comportamento, denominado "turgor", onde o

líquido distende a parede celular e esta por sua vez comprime o líquido nela contido. Durante a secagem, com a saída da água, diminui a tensão que o líquido exerce contra a membrana celular, o que provoca o encolhimento do material. SARAVALOS & RAOUZEOS (1986), estudando a secagem de passas de uvas, determinaram que o volume decresceu linearmente, até cerca de 75% do valor inicial, com o conteúdo de umidade, o qual também reduziu-se nesta mesma faixa.

2.7. PERMEABILIDADE DA CASCA

Uvas são materiais multifásicos, então, para predizer a cinética de secagem com todas as barreiras, é necessário descrever em termos matemáticos, o fenômeno de transferência de calor e de massa que ocorre em cada fase durante a desidratação. Dessa forma, deve-se: 1) escrever os balanços de massa e energia relativa a cada fase; 2) adotar modelos fenomenológicos apropriados para descrever a transferência de calor e massa dentro de cada fase e 3) selecionar as condições de contorno e iniciais adequadas. Isto requer informações às quais não são facilmente disponíveis (RIVA & MASI, 1986).

Uma conveniente aproximação para vencer parte destes problemas, é supor que a resistência à transferência de massa é devido à casca. Portanto, supõe-se que, a cinética de secagem das uvas é governada pelo processo de permeação da água através da casca e a taxa de secagem é igual à taxa de permeação.

Na desidratação de frutas inteiras, como é o caso da uva, a permeabilidade da casca atua como uma membrana semipermeável que controla a taxa de transferência de água do interior do fruto para o meio externo.

RIVA & MASI (1986), estudando a influência das condições de secagem, bem como dos pré-tratamentos químicos, sobre a permeabilidade da casca da uva Itália ao vapor de água, obtiveram resultados significativos para a

otimização do processo de secagem. A predição da permeabilidade das membranas geralmente não é possível, requerendo-se para isto valores experimentais.

A permeabilidade intrínseca da membrana ao vapor de água (DH), pode ser obtida através de uma curva de evaporação, de acordo com a relação (CRANK, 1975):

$$DH = \frac{dE}{dt} \frac{L}{A} \frac{1}{(p_1 - p_2)} \quad (2.33)$$

onde:

dE/dt = taxa de evaporação

L = espessura da casca

A = área da parte exposta da casca da uva

p_1 = pressão parcial da água na solução

p_2 = pressão parcial da água no ar

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATÉRIA-PRIMA E LOCAL DE TRABALHO

Este trabalho foi realizado no Departamento de Engenharia de Alimentos da FEA/UNICAMP e no Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos da UNESP - Campus de S. J. do Rio Preto-SP, com apoio da EMBRAPA (Jales-SP, Rio de Janeiro-RJ) e da Cooperativa Frupeg de Jales-SP.

A matéria-prima utilizada foram as uvas de mesa (*Vitis vinifera*) da variedade Itália, produzidas na região de Jales-SP, das safras de Junho/Novembro de 1996 e Junho/Novembro de 1997. As uvas encontravam-se em seu estágio de maturação completa, polpa firme, casca verde ou levemente amarelada e com um peso médio de $9,47 \pm 1,00\text{g}$. No intervalo entre a colheita e a realização dos experimentos, as frutas foram conservadas em câmara frigorífica a 7°C.

Em todos os experimentos realizados, as uvas que estavam fora do padrão de maturação, bem como as que apresentavam manchas, doenças e injúrias mecânicas foram descartadas.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

As características da uva Itália, foram determinadas de acordo com as seguintes análises: pectina, açúcares (totais e redutores), fibra, umidade, sólidos (solúveis, insolúveis, totais), cinzas, acidez titulável e °Brix.

A determinação da pectina baseou-se na neutralização das cargas dos resíduos de ácidos urônicos livres pelos íons cálcio, provocando a geleificação da pectina e sua precipitação (RANGANA, 1977).

Os açúcares redutores foram determinados por método de titulação de oxidação e os açúcares totais obtidos após a inversão da sacarose (ácido clorídrico a 68-70°C) (AOAC, 1970).

Com relação à quantidade de fibras, analisou-se apenas a porcentagem de fibra bruta (insolúvel) existente na uva (ASP *et al.*, 1983). A análise de umidade foi realizada em estufa à vácuo a 60°C até peso constante (RANGANA, 1977).

A determinação dos sólidos baseou-se na filtração da amostra dissolvida em água quente, retenção dos sólidos insolúveis em papel de filtro e evaporação do filtrado que contém os sólidos solúveis (AOAC, 1970).

A quantidade de cinzas e ácido tartárico foi baseada na metodologia da AOAC (1984) e (1995) respectivamente. Utilizou-se um refratômetro para a leitura do grau Brix.

3.3. ISOTERMAS DE SORÇÃO

A construção das isotermas de dessorção e adsorção de umidade, foi baseada no método estático gravimétrico (JOWITT *et al.*, 1983). A uva foi submetida a um pré-tratamento químico descrito no item 3.5.1 (0,5% p/v de NaOH e 1,5% p/v de Oleato de Etila) e em seguida removida sua casca. Desta forma, determinaram-se as isotermas da casca e da polpa da uva, separadamente.

As várias umidades relativas foram obtidas com soluções salinas saturadas, ou calculadas através das equações de regressão, determinadas por LABUZA *et al.* (1985) e YOUNG (1967). Os sais escolhidos com suas respectivas umidades relativas e as equações de regressão encontram-se nas Tabelas 3.1 e 3.2 respectivamente.

Tabela 3.1: Variação da Umidade Relativa de Equilíbrio com a Temperatura

Sais	Temp	Umidade Relativa (%)					
		35°C	40°C	50°C	60°C	70°C	75°C
NaOH		6,8	6,6	5,9	4,5	2,0	0,3
LiCl		11,1	11,1	11,0	11,0	11,0	11,1
KC ₂ H ₃ O ₂		21,6	20,6	18,9	17,5	16,2	15,6
MgCl ₂		32,1	31,9	31,4	30,7	29,4	28,6
K ₂ CO ₃		43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2
Mg(NO ₃) ₂		51,6	50,6	48,9	47,3	45,8	45,1
NaNO ₂		62,5	61,5	59,9	59,0	58,7	58,5
NaCl		75,5	75,3	74,6	74,0	73,9	73,9
KCl		82,7	82,0	80,9	80,0	79,5	79,3
BaCl ₂		89,7	89,3	88,4	87,6	87,0	86,7
CuSO ₄		96,6	96,1	94,9	93,6	92,4	92,0

Tabela 3.2: Equações para Determinar Unidade Relativa de Equilíbrio em Função da Temperatura (25 a 65°C)

Sais	Equações para a Determinação de UR ou a_w	r^2	Referência
NaOH	$UR = 0,081 - 1,128 \times 10^{-3}T + 3,929 \times 10^{-5}T^2 - 5,092 \times 10^{-7}T^3$	0,998	Young, J.F., 1967
LiCl	$UR = 0,113 + 3,200 \times 10^{-5}T - 3,570 \times 10^{-6}T^2 + 3,704 \times 10^{-8}T^3$	0,845	Young, J.F., 1967
KC ₂ H ₃ O ₂	$UR = \left(0,013 \exp\left(\frac{861,39}{T + 273}\right) \right) \times 100$	1,000	Labuza <i>et al.</i> , 1985
MgCl ₂	$UR = 0,365 - 2,523 \times 10^{-3}T + 5,071 \times 10^{-5}T^2 - 4,166 \times 10^{-7}T^3$	0,963	Young, J.F., 1967
K ₂ CO ₃	$UR = \left(0,272 \exp\left(\frac{145,0}{T + 273}\right) \right) \times 100$	1,000	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Mg(NO ₃) ₂	$UR = \left(0,162 \exp\left(\frac{356,6}{T + 273}\right) \right) \times 100$	1,000	Labuza <i>et al.</i> , 1985
NaNO ₂	$UR = 0,687 - 1,028 \times 10^{-3}T - 3,750 \times 10^{-5}T^2 + 4,629 \times 10^{-7}T^3$	0,999	Young, J.F., 1967
NaCl	$UR = 0,714 + 3,56 \times 10^{-5}T - 9,107 \times 10^{-5}T^2 + 6,481 \times 10^{-7}T^3$	0,965	Young, J.F., 1967
KCl	$UR = 0,900 - 2,781 \times 10^{-3}T + 2,143 \times 10^{-5}T^2 - 4,629 \times 10^{-8}T^3$	0,999	Young, J.F., 1967
BaCl ₂	$UR = 0,908 + 4,011 \times 10^{-4}T - 2,786 \times 10^{-5}T^2 + 2,037 \times 10^{-7}T^3$	0,997	Young, J.F., 1967
CuSO ₄	$UR = 0,954 + 1,989 \times 10^{-3}T - 5,964 \times 10^{-5}T^2 + 3,611 \times 10^{-7}T^3$	0,996	Young, J.F., 1967

Para um adequado estudo do processo de secagem da uva Itália, uma ampla faixa de temperatura foi utilizada na determinação das isotermas de dessorção de umidade (35, 40, 50, 60, 70 e 75°C). Quanto à isoterma de adsorção, esta foi realizada apenas à 60°C, com a finalidade de se construir a curva de histerese, ao menos em uma das temperaturas do processo de secagem. A umidade de equilíbrio atingida para cada uma dessas temperaturas estudadas, foi o resultado da média entre 2 amostras.

Utilizaram-se potes herméticos de plástico de 200 ml, possuindo internamente um tripé construído em acrílico, que serviu de suporte para os recipientes de plástico onde foram colocadas as amostras. Primeiramente, os potes e os recipientes de plástico foram limpos com algodão embebido em formol comercial a 40%, a fim de evitar ou mesmo retardar possíveis contaminações da amostra.

Para as isotermas de dessorção, a casca foi retirada cuidadosamente da uva, a polpa foi cortada em fatias de espessura uniforme e as sementes descartadas. No caso das isotermas de adsorção, essas amostras foram congeladas e submetidas à liofilização, utilizando-se o equipamento Heto Freeze Dryer tipo FD3. Cada pote recebeu cerca de 40 ml de solução salina saturada com 3 gotas de formol e em seu interior foi colocado um tripé devidamente limpo, para sustentar os recipientes plásticos com as amostras. Estes potes foram deixados numa estufa com circulação de ar e temperatura controlada, realizando-se pesagens semanais em balança analítica, até as amostras atingirem peso constante.

À medida que as amostras foram sendo liberadas, ou seja, atingiram o peso constante, foi realizada uma análise de umidade. Desta forma, foram obtidos os valores de umidade de equilíbrio, tanto da casca quanto da polpa da uva, que foram correlacionados com a umidade relativa ou atividade de água do ambiente onde as amostras foram equilibradas, constituindo as isotermas de sorção.

Os ajustes das curvas de sorção foram realizados com o software gráfico Origin versão 3.5 (Microcal Software, 1994). A avaliação dos melhores ajustes

foi efetuada através da análise do chi-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação do ajuste (R^2) fornecidos pelo programa.

3.3.1. Calores de Sorção

A partir das isotermas de dessorção construídas para a casca e polpa da uva Itália e ajustadas pela equação de GAB, determinou-se o excesso do calor isostérico de sorção em função da umidade da uva em base seca. A finalidade deste estudo foi analisar parâmetros energéticos da atividade da água na matéria-prima, podendo ser usado para estimar a energia requerida no processo de secagem.

Para umidades fixas entre 0,05 e 0,25 foram calculadas as atividades de água, utilizando as equações de regressão de GAB. Uma regressão linear dos dados do logaritmo natural das atividades de água versus o inverso da temperatura foi realizada a diferentes umidades, onde o valor do calor de sorção corresponde ao coeficiente angular de cada reta, multiplicada pela constante universal dos gases.

Deste modo, baseando-se nos cálculos para a construção das isotermas, e utilizando a Equação (2.18), determinaram-se os valores de q_{st} . Os dados de calor de sorção e teor de umidade foram ajustados de acordo com a Equação (2.20) com o auxílio do software Origin versão 3.5, e calculados os parâmetros para a casca e polpa da uva Itália.

3.4. PERMEABILIDADE

A permeabilidade foi determinada experimentalmente com base na Equação (2.33), empregando as células descritas a seguir.

3.4.1. Células de Medida

As medidas da permeabilidade foram realizadas por meio de duas células, representadas esquematicamente na Figura 3.1. Cada célula consistiu de um recipiente de vidro pirex de 13,7 e 12,7 cm de altura, respectivamente, e 1,76 e 1,10 cm de diâmetro interno, fechados com tampas de plástico resistentes à altas temperaturas. Estas tampas possuíam um furo circular com área interna de 2,44 cm² e 0,96 cm². O interior dos recipientes cilíndricos foi preenchido com uma solução de glucose que é um dos principais açúcares presentes na polpa da uva (BELITZ & GROSCH, 1985) em concentração semelhante à da fruta.

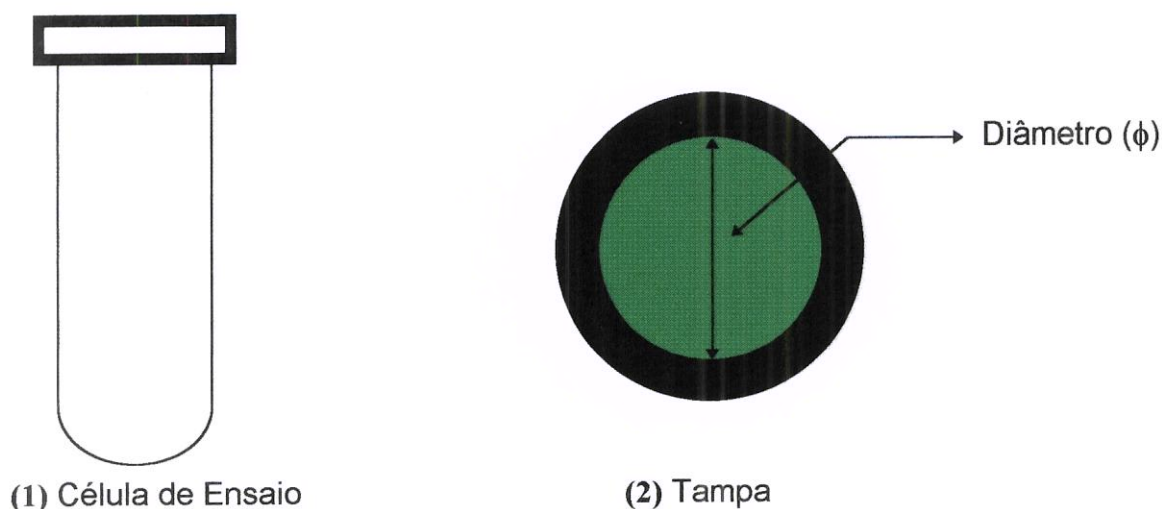


Fig.3.1: Célula para medida de permeabilidade.

As cascas, cuidadosamente removidas das bagas, foram introduzidas entre as células e as tampas, sendo fixadas através do rosqueamento das mesmas. Durante os experimentos, a tampa suportando a membrana foi colocada perpendicularmente ao escoamento de ar (convecção forçada) num gabinete à temperatura constante e aproximadamente 12% de umidade relativa. As células foram colocadas na posição invertida, de forma que a superfície

interna da casca fosse mantida em contato com a solução de glicose e a superfície externa ficasse exposta ao ar.

Os equipamentos adicionais utilizados nos ensaios para medir a permeabilidade, são representados nas Figuras 3.2 e 3.3.

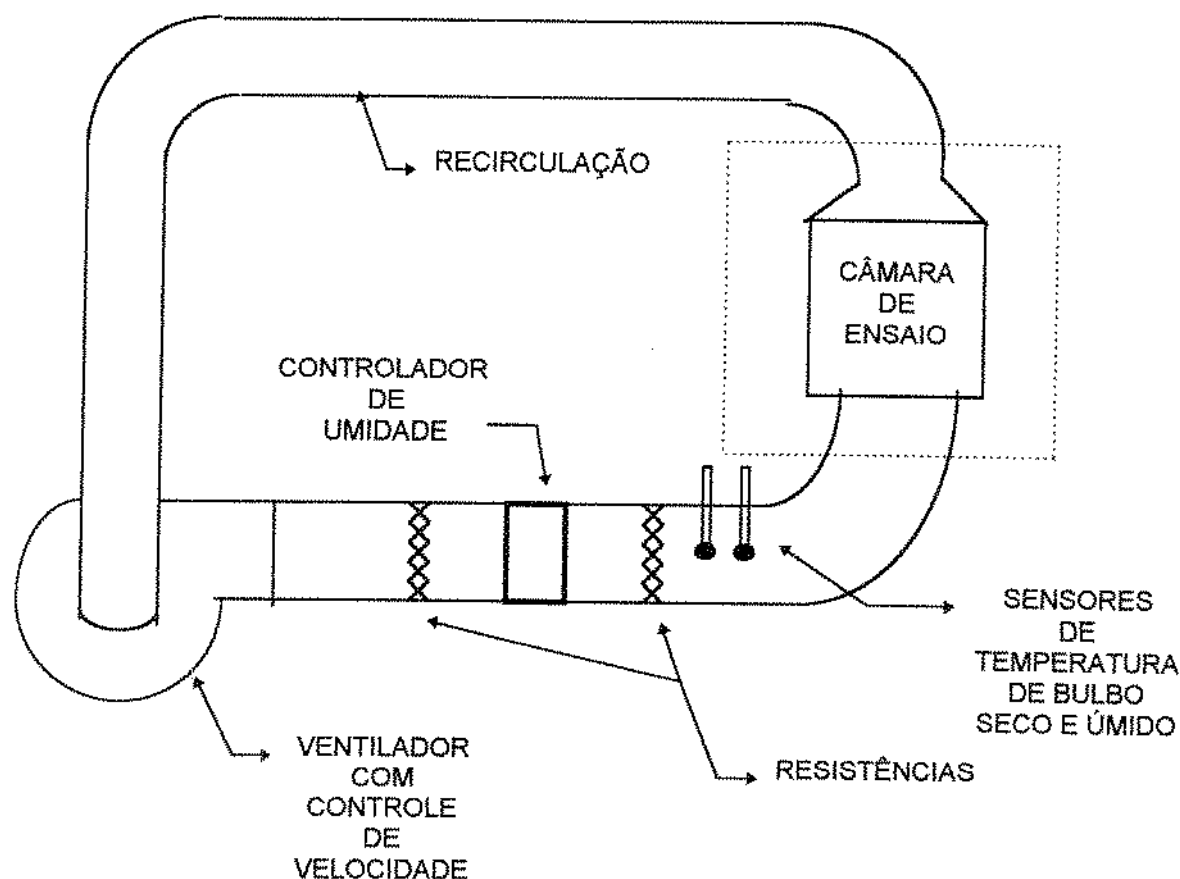


Figura 3.2: Secador (marca Degem com controle de UR) utilizado nos ensaios de permeabilidade.

No início de cada experimento, as células foram pesadas e posicionadas na câmara de ensaio. A partir deste ponto ($t=0$), as amostras foram pesadas em intervalos de 6 horas. Com os dados obtidos, construiu-se a curva de evaporação correspondente, na forma de um gráfico de massa de água evaporada em função do tempo. A inclinação dessa curva forneceu o valor de $\frac{dE}{dt}$, utilizado na equação (2.33).

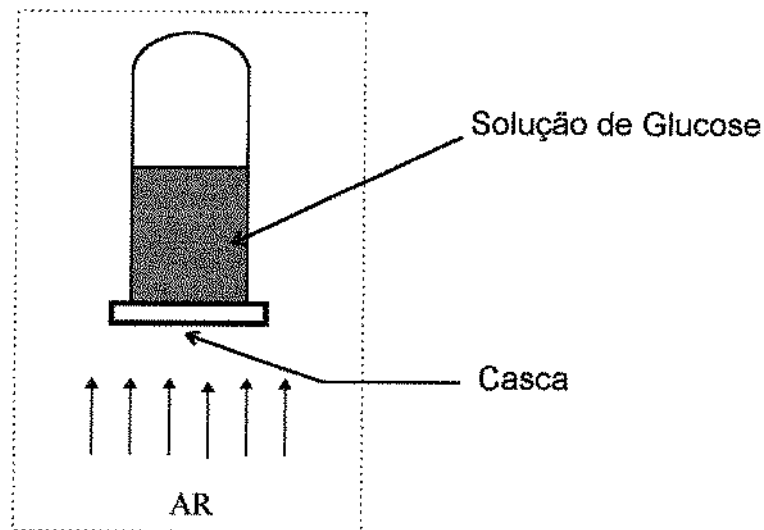


Figura 3.3: Câmara de ensaio

3.4.2. Espessura da Casca (L)

As medidas de espessura da casca foram realizadas, utilizando-se duas lâminas de vidro e um micrômetro, de acordo com a Figura 3.4. A técnica consistia no:

- congelamento das uvas;
- retirada da casca;
- lavagem da casca com benzeno-tolueno para a retirada de restos de polpa;
- medida da espessura dos dois vidros juntos, com o auxílio do micrômetro;
- medida da espessura do conjunto formado pela casca colocada entre os dois vidros.

Para o estudo da influência da espessura da casca sobre a permeabilidade, foram utilizadas outras variedades de uva além da Itália, ou seja, uvas Rubi, Red Globe e Thompson, obtendo-se deste modo, quatro diferentes espessuras.

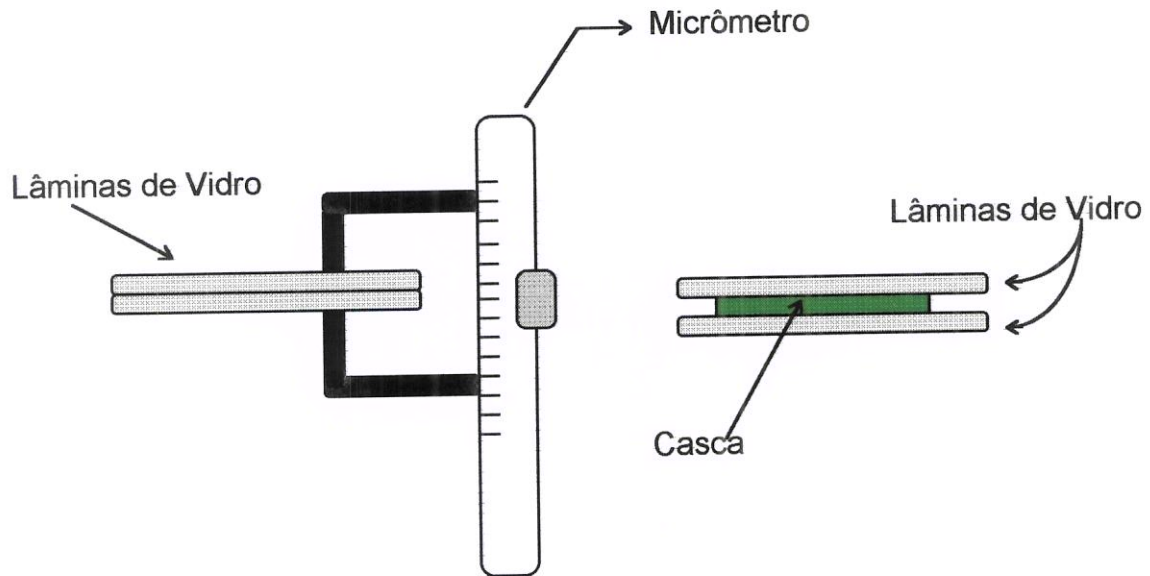


Fig.3.4: Material utilizado na medida da espessura da casca das uvas.

3.4.3. Pressões Parciais P_1 e P_2

A atividade de água da solução de glucose foi determinada utilizando-se a equação de Norrish, descrita por CHIRIFE *et al.* (1980):

$$a_w = X_1 \exp(-KX_2^2) \quad (3.1)$$

onde X_1 e X_2 são as frações molares da água e do soluto na solução, respectivamente, e K é a constante de correlação, que no caso da glucose, é 2,25 (CHIRIFE *et al.*, 1980).

Através da a_w e com os valores tabelados de pressão de vapor da água pura nas temperaturas utilizadas, calculou-se a pressão parcial da água na solução de glucose (p_1) de acordo com a equação (3.2).

$$p_1 = a_w \times p_0 \quad (3.2)$$

onde:

a_w = atividade de água;

p_1 = pressão parcial da água na solução de glucose em atm

p_0 = pressão de vapor da água pura na temperatura de medida.

Utilizando-se as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido lidas durante os ensaios, determinou-se a umidade relativa do ar. Dessa forma, a pressão parcial da água no ar (p_2) foi calculada com o auxílio da equação (3.3).

$$p_2 = UR \times p_0 \quad (3.3)$$

onde:

UR = umidade relativa do ar

p_2 = pressão parcial da água no ar

p_0 = pressão de vapor da água pura na mesma temperatura.

3.4.4. Correção da Concentração da Solução de Glucose

Durante a realização das medidas de permeabilidade, devido à evaporação da água, a concentração da solução de glucose sofria uma certa variação, de forma que a pressão parcial da água nessa solução (p_1) não era constante. Para considerar essa variação, foi efetuada uma correção, de acordo com o procedimento descrito a seguir:

1) a cada pesagem da célula, determinava-se a massa de água evaporada, possibilitando o cálculo das novas frações molares de água (X_1) e glucose (X_2) da solução, dadas por:

$$X_2 = \frac{n_{G_0}}{n_{G_0} + \left(n_{A_0} - \frac{E}{18} \right)} \quad (3.4)$$

$$X_1 = 1 - X_2 \quad (3.5)$$

onde:

n_{G_0} = número de moles de glucose presentes na solução inicial;

n_{A_0} = número de moles de água presentes na solução inicial;

E = massa de água evaporada;

2) com os novos valores de X_2 e X_1 determinava-se a nova pressão parcial p_1 .

Desta forma, foi possível determinar a influência da variação do gradiente de concentração ($p_1 - p_2$) na permeabilidade.

3.5. SECAGEM EM LEITO FIXO

3.5.1. Pré-Tratamento Químico das Uvas

No pré-tratamento químico da fruta, foi utilizado como agente ativo o oleato de etila ($C_{20}H_{38}O_2$) de grau técnico 99%, marca Sigma, misturado ao carbonato de cálcio ($CaCO_3$). As concentrações do oleato de etila foram de 0, 1, 2 e 3% (p/v), mantendo-se a concentração do carbonato de cálcio fixa em 2% (p/v). Dissolveu-se a quantidade pré-determinada de oleato de etila em 2% da solução alcalina, adicionando lentamente o óleo sob agitação mecânica. O pré-tratamento das uvas consistiu em imersão durante 30 segundos na emulsão correspondente, mantida a 50°C, sendo em seguida, lavadas em água corrente. Os efeitos dos pré-tratamentos são observados pela determinação das curvas de secagem, obtidas através de pesagens periódicas ao longo do processo de desidratação.

3.5.2. Descrição do Equipamento

Nos ensaios de secagem, utilizou-se o secador mostrado na Figura 3.5, que consiste de:

- Coluna de 1,02 m de altura, de secção quadrada, com lado igual a 40 cm, que pode ser dividida em quatro ou em duas partes.
- Ventilador centrífugo, ligado a um motor elétrico monofásico de 220V, 1/3 HP e 1750 rpm. Este ventilador é ligado ao equipamento por meio de canos de alumínio. O perfil de velocidade do ar tende a se uniformizar na medida em que este percorre a tubulação. Na saída do ventilador foi instalado um controlador de velocidade do ar. A velocidade foi determinada por meio de um anemômetro. O ventilador é ligado ao leito por um duto retangular.
- Sistema de aquecimento do ar composto por 8 resistências elétricas independentes, instaladas no interior do duto, pouco antes da curva de 90 ° que antecede a entrada do leito. As resistências são de fio de níquel-cromo de resistividade 2,122 ohm/m. Para aquecer o ar numa vazão fixa, ligam-se sete resistências diretamente na fonte de 110 V ou de 220 V, dependendo da temperatura desejada e da vazão do ar e a última é ligada a um variador de voltagem, tipo Variac, permitindo um ajuste de temperatura. As paredes do secador são isoladas com poliestireno expandido.

O secador tem um sistema de medição de temperatura e de pressão. O sistema de medição de temperatura é composto por dois termopares tipo T ligados a um indicador de temperatura digital, marca Engro, modelo 2000, com menor divisão de 0,1 °C. Um termopar é ligado logo abaixo da amostra para se obter a temperatura do ar de secagem na entrada da bandeja. O segundo é instalado a 2,5 cm acima da amostra, obtendo-se, portanto, a temperatura de saída do ar de secagem. O sistema termopar-indicador foi calibrado em um banho de água, com um termômetro padrão.

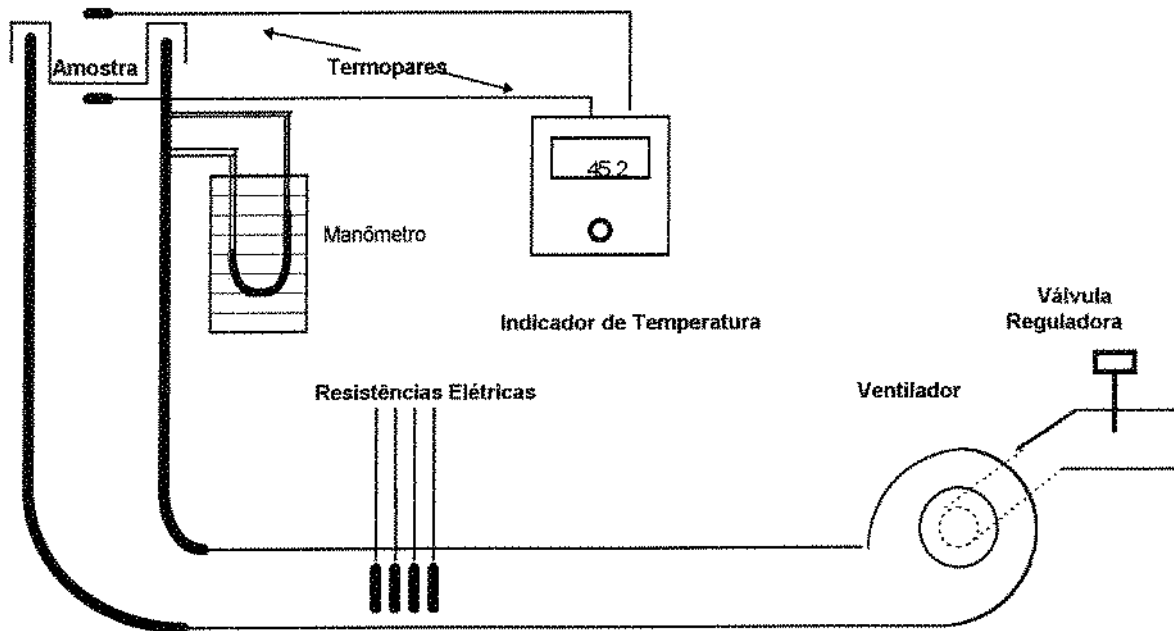


Figura 3.5: Secador de Leito Fixo

O sistema de medida de pressão consiste de tomadas piezométricas localizadas imediatamente abaixo e acima do leito.

3.5.3. Operação do Equipamento

Antes do início de cada ensaio, o equipamento foi colocado em funcionamento nas condições de secagem. A vazão foi regulada através da válvula, observando-se o manômetro ligado ao bocal. O sistema de aquecimento foi ligado combinando-se as três resistências para atingir a temperatura exigida, na vazão dada. As frutas, previamente tratadas, foram adicionadas numa bandeja previamente tarada, em cargas de aproximadamente 1000 g. Desse material retiraram-se duas amostras para determinação da umidade inicial.

O controle da temperatura de secagem foi realizado observando-se a temperatura de entrada do ar. E a temperatura de saída, lida como um dado importante do ensaio, para o esclarecimento do processo. Anotações das

temperaturas foram feitas de 10 em 10 minutos, nas primeiras 2 horas, e de 30 em 30 minutos, no tempo restante. As temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido, também foram lidas freqüentemente, na entrada da linha de sucção.

O acompanhamento da umidade das amostras ao longo da secagem foi realizado por pesagem da bandeja de 30 em 30 minutos ou de hora em hora, de acordo com ensaios preliminares. A pesagem pôde ser completada em menos de 30 segundos, evitando-se que a retirada do secador alterasse a temperatura e a umidade das amostras. De posse desses dados e da umidade inicial, foram calculadas as respectivas umidades por balanço de massa. Ao final da secagem, o produto foi conservado em sacos de polietileno para análises posteriores.

3.5.4. Determinação da Taxa de Secagem

A partir do software origin versão 3.5, todas as curvas de umidade residual contra o tempo foram ajustadas por mínimos quadrados com polinômios de grau 6, de acordo com a Equação (3.6), obtendo-se coeficientes de determinação próximos a 1.

$$\frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = C_0 + C_1t + C_2t^2 + C_3t^3 + C_4t^4 + C_5t^5 + C_6t^6 \quad (3.6)$$

Este tipo de equação não é útil no projeto de secadores ou no estudo do fenômeno da secagem, mas resulta de grande utilidade na determinação da taxa de secagem a partir do cálculo da derivada (Equação 3.7):

$$\frac{\partial \left(\frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} \right)}{\partial t} = C_1 + 2C_2t + 3C_3t^2 + 4C_4t^3 + 5C_5t^4 + 6C_6t^5 \quad (3.7)$$

3.6. ESTUDO DA VARIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DURANTE A SECAGEM

O coeficiente de encolhimento e a densidade aparente foram determinados em função da umidade das amostras. Realizaram-se os experimentos nas temperaturas de 40, 50, 60 70 e 80°C com a utilização apenas da solução de CaCO_3 na concentração fixa de 2% (p/v) como pré-tratamento químico, e para 60°C com pré-tratamentos de CaCO_3 (2%, p/v) e $\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2$ nas concentrações de 1, 2 e 3% (v/v). O procedimento foi o mesmo do item 3.5.1 realizado no processo de secagem das uvas em leito fixo. Cada ensaio foi realizado com aproximadamente 140 uvas, das quais 8 delas foram retiradas periodicamente do secador, para determinação do volume, sendo pesadas periodicamente.

Para a realização dessas medidas, o método escolhido foi o do deslocamento de fluido, num aparelho semelhante ao desenvolvido por ZOGZAS *et al.* (1994). Este aparelho, mostrado na Figura 3.6, consiste de um compartimento A, onde a amostra foi colocada, e de uma bureta com escala de de 0,05 ml. O compartimento A é fechado hermeticamente por uma peça "C", confeccionada em vinil. Para a determinação do volume deslocado pela uva, o aparelho foi invertido, e a leitura feita na escala da bureta.

O coeficiente de encolhimento pôde ser determinado de duas formas diferentes. A primeira com o auxílio da Equação 2.27, realizando-se uma regressão linear dos valores de v/v_0 versus x . E a segunda, através de um ajuste dos valores experimentais de ρ_b versus x , com a Equação 2.30, onde o encolhimento e a densidade aparente do sólido seco, são parâmetros desta equação. O volume final da uva ($x = 0$) foi encontrado por extrapolação da regressão linear de V versus x , com um intervalo de confiança de 95%. A partir disso, realizou-se novamente uma regressão linear dos dados de v/v_t versus x em base seca, determinando-se o coeficiente linear, conhecido como coeficiente de encolhimento (β), (Equação 2.27). A densidade aparente da uva Itália foi

determinada a partir da Equação 2.21, ou seja, da massa e do volume das amostras em vários conteúdos de umidade.

O estudo da variação do encolhimento da uva com a temperatura, foi realizado de acordo com a equação de Arrhenius:

$$\beta = P_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.8)$$

onde: P_0 = constante da equação

E_a = energia de ativação do processo de encolhimento

R = constante dos gases

T = temperatura absoluta

3.7. DETERMINAÇÃO DE UMIDADE DAS AMOSTRAS

Para a determinação da umidade inicial das amostras para secagem em leito fixo, bem como das amostras coletadas no secador, foram empregados pesa-filtros de vidro pirex de 30 e 50 ml, com tampa esmerilhada. Os pesa-filtros foram lavados e guardados em estufa a 105°C e, antes de cada ensaio, retirados da estufa e colocados em dessecadores para esfriar. Depois de frios, foram tarados numa balança analítica Mettler H34 com menor divisão de 0,0001 g.

As umidades foram determinadas colocando-se as amostras para secar em estufa à 70°C até peso constante, o que ocorreu após 24 horas. Todas as amostras foram pesadas em balança analítica e através do peso inicial e final das mesmas, determinou-se a umidade. Todas as amostras iniciais tiveram a umidade determinada em duplicata.

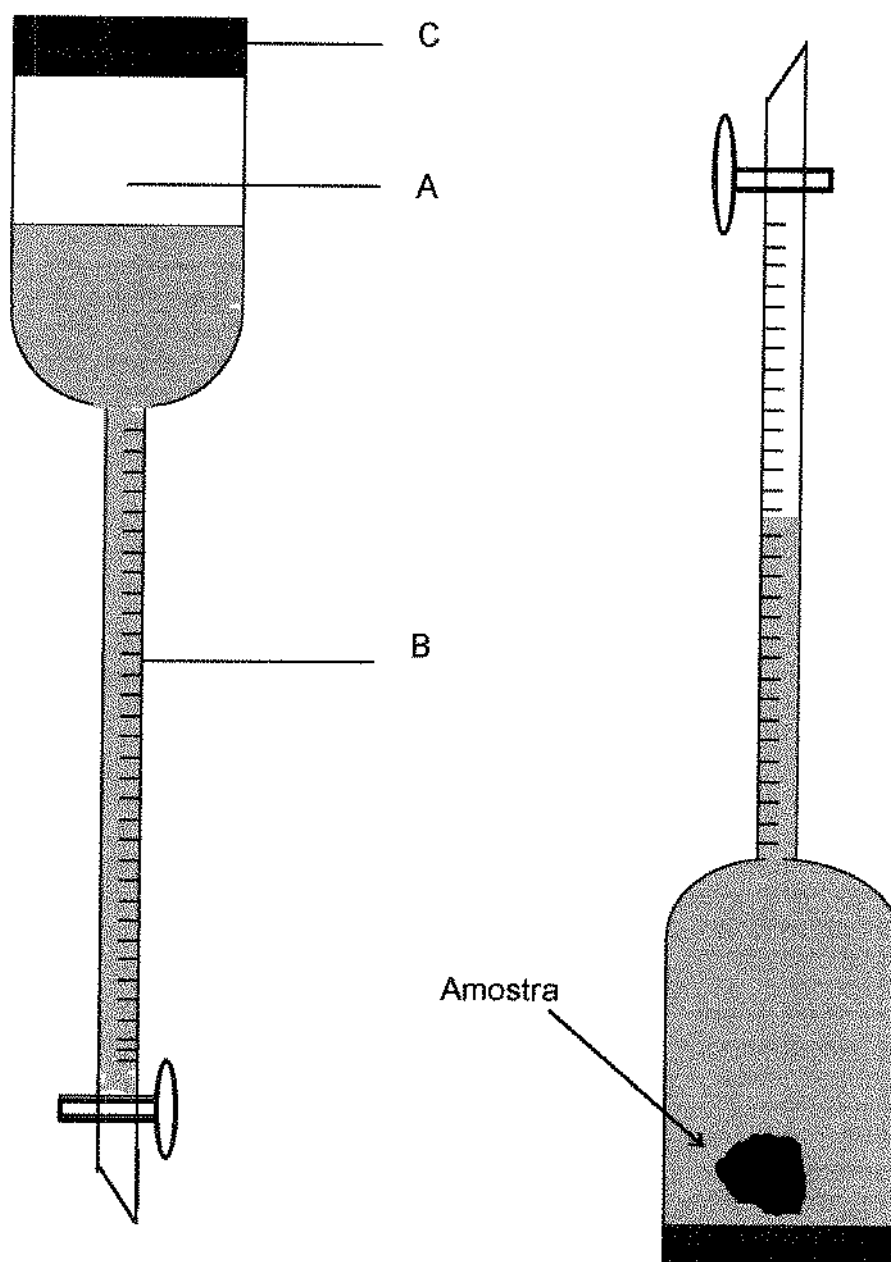


Figura 3.6: Aparelho utilizado para determinação do volume individual de uvas com diferentes teores de umidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERÍSTICAS DA MATÉRIA-PRIMA

Os resultados da caracterização da uva Itália feita realizando-se análises de pectina, açúcares (totais e redutores), fibra, umidade, sólidos (solúveis, insolúveis, totais), cinzas, acidez e °Brix, estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Caracterização química da uva Itália utilizada nos experimentos.

Análises	Característica
Pectina	0,57% p/v
Açúcares - Totais	11,1% p/p
- Redutores	11,65% p/p
Fibra	1,70% p/p
Umidade	83,89% (b.u.)
Sólidos - Insolúveis	1,29% p/p
- Solúveis	13,27% p/p
- Totais	14,56% p/p
Cinzas	0,35% p/p
Acidez (expressa em ác. Tartárico)	0,64%
°Brix	14,0

Observa-se que a quantidade de açúcar total é aproximadamente igual a de açúcar redutor, indicando que não há a presença de sacarose na uva. De acordo com BELITZ & GROSH (1985) a composição química aproximada da uva, em % do peso fresco da porção comestível é de: extrato seco: 17,3; açúcares totais: 14,8; ácidos totais: 0,4 (expresso como ácido tartárico); cinzas: 0,5; glucose: 8,2; frutose: 8,0; sacarose: 0,0.

4.2. ISOTERMAS DE SORÇÃO

4.2.1. Curvas de Dessorção de Umidade

Os dados relacionados às curvas de dessorção de umidade para as temperaturas de 35, 40, 50, 60, 70 e 75°C estão apresentados no Apêndice A correspondendo às Tabelas A.1 e A.2 para casca e polpa da uva Itália, respectivamente. Estes dados encontram-se graficados nas Figuras 4.1 e 4.2.

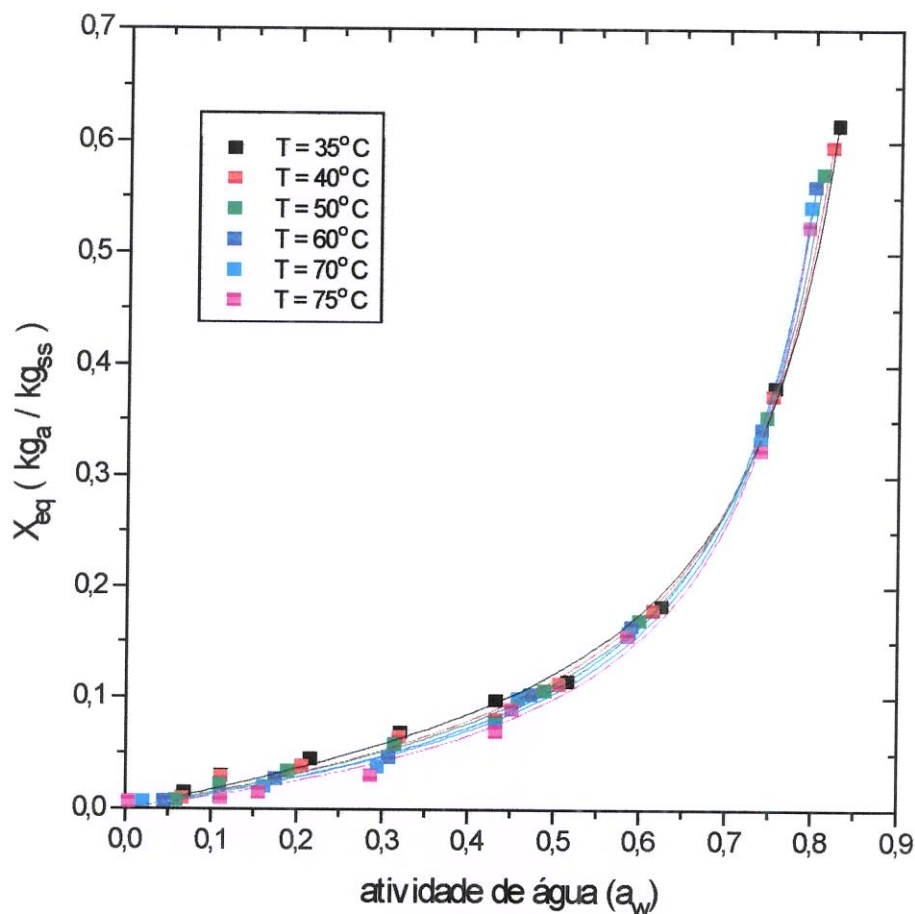


Figura 4.1: Isotermas de dessorção da casca da uva Itália à diferentes temperaturas.

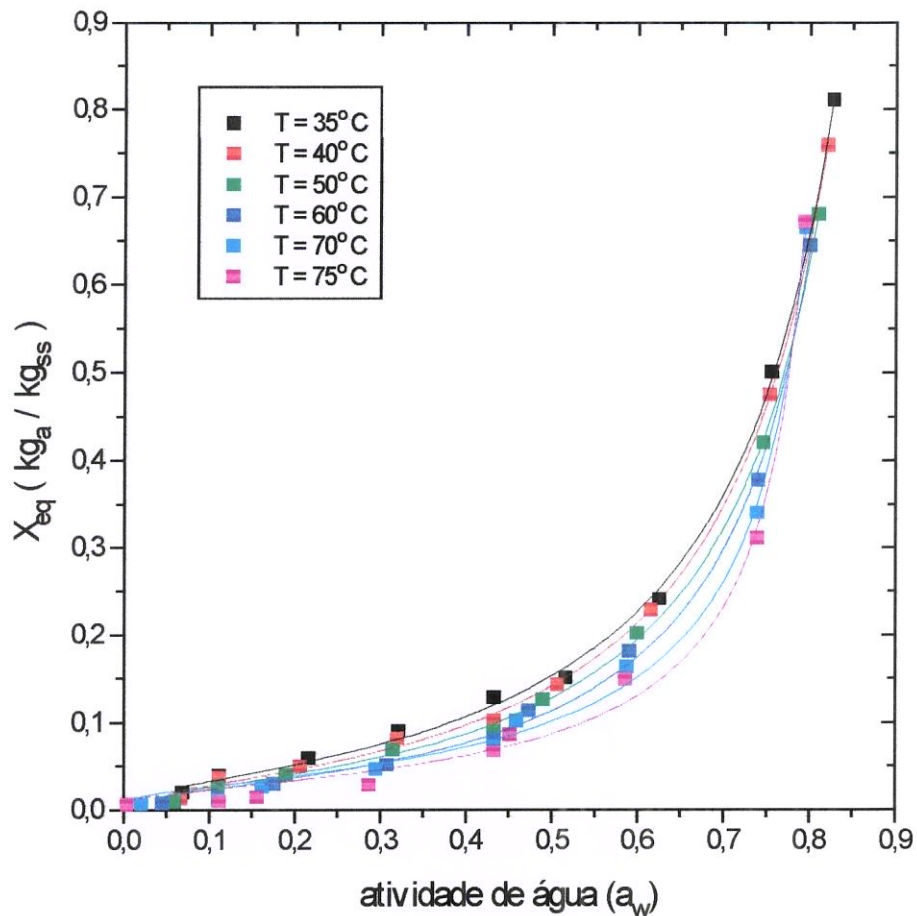


Figura 4.2: Isotermas de dessorção da polpa da uva Itália à diferentes temperaturas.

Pode-se observar que as curvas de sorção apresentaram um comportamento típico de curva tipo II, na classificação de BET. Nota-se o efeito da temperatura nas isotermas de dessorção de umidade, sobretudo, para valores de atividade de água menores que 0,75. A umidade aumenta à uma dada umidade relativa, com o decréscimo da temperatura.

De acordo com RIZVI (1986), este comportamento é geralmente atribuído à uma redução no número de sítios ativos, devido a mudanças químicas e físicas

provocadas pela temperatura. A extensão do decréscimo, entretanto, depende da natureza ou constituição do alimento.

Para valores de atividade de água maiores que 0,75 observa-se uma tendência à inversão da dependência da temperatura, ou seja, a uva desorveu mais umidade em temperaturas mais altas. Isto pode ser explicado, devido à dissolução dos açúcares da fruta, que aumenta significativamente quando a temperatura é aumentada.

SÁ & SERENO (1993) explicaram este cruzamento das isotermas, não só pela quantidade de açúcar presente, mas também pela proporção de cada tipo de açúcar. A presença de outros polissacarídeos adicionados para melhorar as propriedades reológicas ou textura do produto, pode também influenciar na posição do cruzamento. Resultados semelhantes foram obtidos por MAZZA & LEMAGUER (1978) para isotermas de adsorção e dessorção de cebola desidratada; por SARAVACOS *et al.* (1986) para isotermas de adsorção de uva passa e por AYRANCI *et al.* (1990) no estudo de isotermas de frutas secas (damasco, figo e uva). ROMAN *et al.* (1982) encontraram um efeito normal da temperatura nas isotermas de dessorção de maçãs, ou seja, não houve cruzamento das isotermas em altas atividades de água, que se deveu à baixa porcentagem de monossacarídeos nas maçãs.

A dependência da temperatura é mais acentuada para a polpa, do que para a casca, como consequência, o conteúdo de umidade na monocamada decresceu mais para a polpa da uva conforme o aumento da temperatura. Isto pode ter ocorrido, devido às diferenças na composição de ambas. A casca contém celulose que é insolúvel em água.

Para uma melhor visualização da diferença entre as curvas de equilíbrio da casca e da polpa, ambas foram graficadas numa mesma Figura, em duas temperaturas distintas, como pode ser observado nas Figuras 4.3 e 4.4. Observa-se com clareza, que a polpa apresenta maior umidade que a casca, já que ambas contém diferenças em sua constituição.

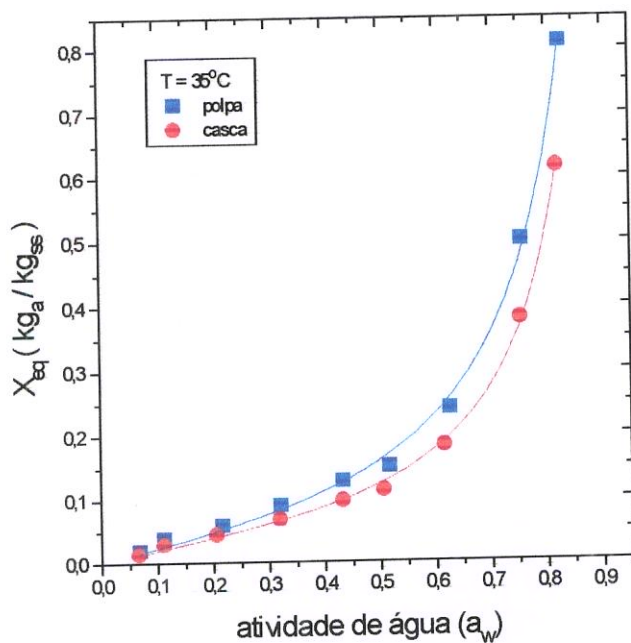


Figura 4.3: Isoterma de dessorção de umidade da casca e da polpa da uva, na temperatura de 35°C .

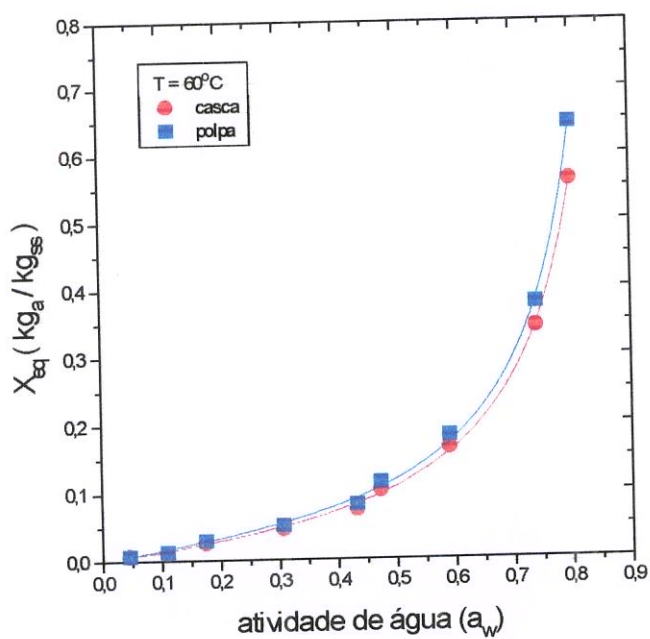


Figura 4.4: Isoterma de dessorção de umidade da casca e da polpa da uva, na temperatura de 60°C .

Alguns modelos matemáticos foram selecionados para ajustar os valores experimentais de equilíbrio da casca e da polpa da uva Itália a diversas temperaturas, baseando-se em estudos anteriores com alimentos que contêm açúcar: equação de BET (2.11); equação de Halsey modificado (2.13) e equação de GAB (2.14).

Os parâmetros calculados a partir desses modelos e os valores de chi-quadrado (χ^2) e coeficiente de determinação do ajuste (R^2), estão na Tabela 4.2 para isotermas de dessorção da casca da uva e na Tabela 4.3 para a polpa.

A partir dos resultados dos parâmetros estatísticos de ajuste das isotermas, pôde-se concluir que os modelos de melhor ajuste aos dados experimentais foram o de Halsey modificado e o de GAB. O ajuste com a equação de Halsey modificada, realmente não apresentou diferença quando comparado ao de GAB tanto para a casca quanto para a polpa da uva Itália. Isto pode ser verificado, por exemplo, na temperatura de 35°C para a casca e polpa da uva nas Figuras 4.5 e 4.6, onde as curvas de ajuste destes modelos são praticamente coincidentes em todo o intervalo de atividade de água estudado.

Tabela 4.2: Parâmetros dos modelos de GAB, Halsey Modificado e BET, χ^2 (χ^2) e coeficiente de determinação (R^2), calculados pelo ajuste das isotermas de dessorção da casca da uva Itália a diferentes condições de temperatura.

Modelo	T (°C)	Parâmetros do Modelo*			$\chi^2 (10^5)$	R^2
		X_m	C	K		
GAB	35	0,08	1,98	1,06	12,0	>0,99
	40	0,08	1,55	1,06	7,4	>0,99
	50	0,08	1,66	1,08	3,2	>0,99
	60	0,08	1,50	1,09	3,5	>0,99
	70	0,07	1,62	1,11	7,4	>0,99
	75	0,07	1,39	1,11	8,6	>0,99
		k	c	r		
Halsey M.	35	0,13	1,00	0,78	6,3	>0,99
	40	0,14	1,00	0,74	3,4	>0,99
	50	0,13	0,98	0,75	3,5	>0,99
	60	0,12	0,97	0,73	7,7	>0,99
	70	0,11	0,95	0,77	13,0	>0,99
	75	0,11	0,95	0,74	14,0	>0,99
		B	C			
BET	35	0,13	0,76		20,0	>0,99
	40	0,14	0,64		13,0	>0,99
	50	0,15	0,54		14,0	>0,99
	60	0,17	0,43		15,0	>0,99
	70	0,18	0,38		22,0	>0,99
	75	0,18	0,35		19,0	>0,99

* todos os ajustes apresentaram níveis de significância menores que 5%.

Tabela 4.3: Parâmetros dos modelos de GAB, Halsey Modificado e BET, χ^2 (χ^2) e coeficiente de determinação (R^2), calculados pelo ajuste das isotermas de dessecção da polpa da uva Itália a diferentes condições de temperatura.

Modelo	T (°C)	Parâmetros do Modelo*			$\chi^2 (10^5)$	R^2
		X_m	C	K		
GAB	35	0,11	1,98	1,06	21,0	>0,99
	40	0,11	1,55	1,06	12,0	>0,99
	50	0,09	1,66	1,08	4,5	>0,99
	60	0,08	1,76	1,11	5,4	>0,99
	70	0,05	3,51	1,16	14,0	>0,99
	75	0,04	3,38	1,18	23,0	>0,99
		k	c	r		
Halsey M.	35	0,16	1,00	0,78	11,0	>0,99
	40	0,17	1,00	0,74	5,5	>0,99
	50	0,14	0,98	0,75	5,0	>0,99
	60	0,11	0,94	0,79	12,0	>0,99
	70	0,05	0,86	1,02	5,04	>0,99
	75	0,04	0,84	1,06	28,0	>0,99
		B	C			
BET	35	0,18	0,76		35,0	>0,99
	40	0,18	0,64		22,0	>0,99
	50	0,18	0,54		19,0	>0,99
	60	0,21	0,35		30,0	>0,99
	70	0,46	0,10		92,0	>0,98
	75	623,98	6 (10^{-5})		114,0	>0,98

* todos os ajustes apresentaram níveis de significância menores que 5%.

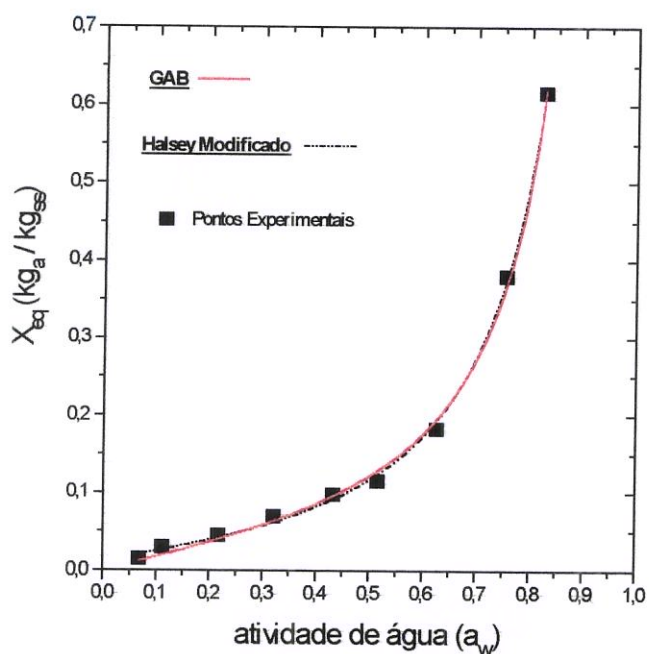


Figura 4.5: Isoterma de dessorção da casca da uva Itália, na temperatura de 35°C ajustada pelos modelos de GAB e Halsey modificado.

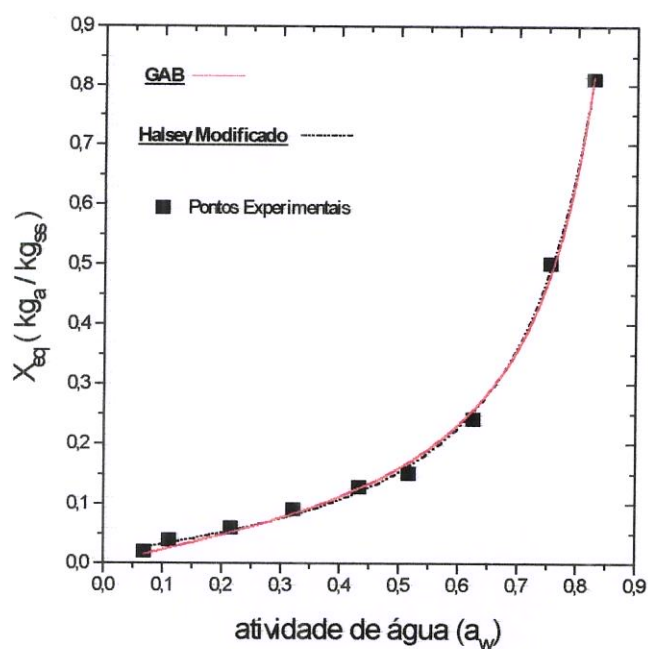


Figura 4.6: Isoterma de dessorção da polpa da uva Itália, na temperatura de 35°C ajustada pelos modelos de GAB e Halsey modificado.

Com relação à equação de BET, esta não se ajustou tão bem aos dados experimentais quando comparada às demais equações, como pode ser observado quantitativamente nas Tabelas (4.2) e (4.3). Isso ocorreu em toda a faixa de temperatura estudada, principalmente para a polpa da uva.

Dessa forma, a equação de GAB foi utilizada neste trabalho para ajustar as isotermas da casca e da polpa da uva Itália (Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4), pois como dito anteriormente, é amplamente usada para descrever o comportamento sorcional de vários materiais alimentícios.

4.2.2. Curva de Adsorção de Umidade e Histerese

As isotermas de absorção e dessorção, obtidas à 60°C, da polpa e casca da uva estão apresentadas nas Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.

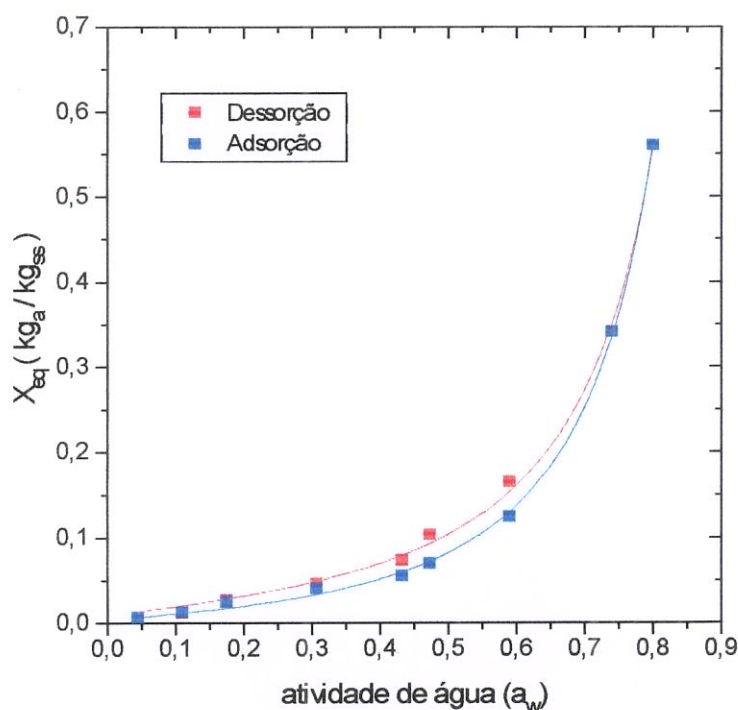


Figura 4.7: Fenômeno de histerese para a casca da uva Itália, na temperatura de 60°C ajustada pela Equação de GAB.

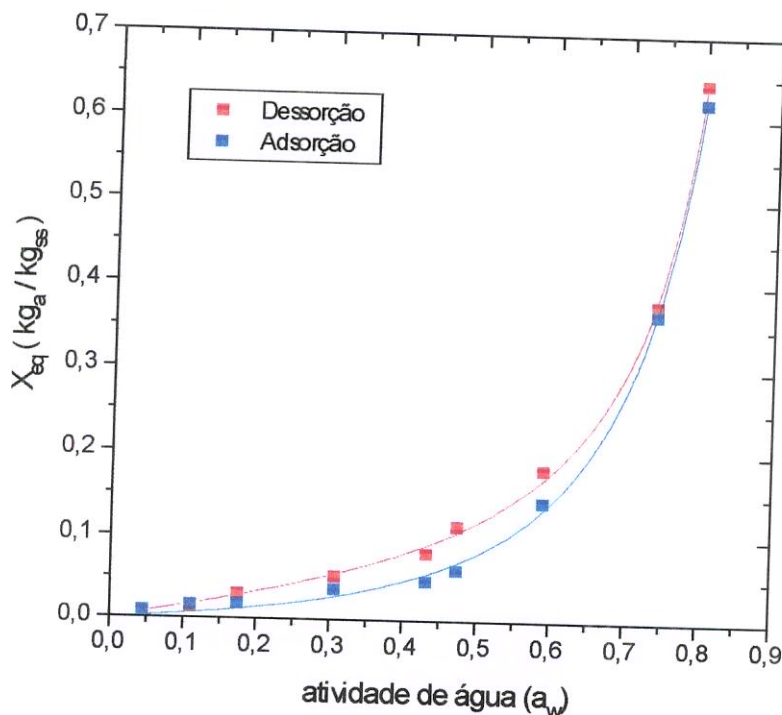


Figura 4.8: Fenômeno de histerese para a polpa da uva Itália, na temperatura de 60°C ajustada pela Equação de GAB.

Nota-se através das Figuras 4.7 e 4.8, que existe uma diferença entre as curvas de adsorção e dessorção de umidade, para uma ampla faixa de atividade de água, caracterizando a histerese. No presente caso, essa diferença das curvas pode ser considerada desprezível para a obtenção da umidade de equilíbrio, necessária ao cálculo da cinética de secagem da uva, já que se trata de baixas umidades e localizam-se na faixa de a_w de 0,006 a 0,07 onde as curvas apresentam diferença mínima.

MAZZA & LEMAGUER (1980) estudando as propriedades de sorção da cebola, obtiveram uma considerável histerese, que aumentou conforme o decréscimo da temperatura, principalmente em baixa atividade de água. Eles supuseram que este comportamento se deveu à combinação da condensação da água em capilares e mudanças estruturais ocorridas durante a adsorção ou dessorção de umidade deste produto.

4.2.3. Calor Isostérico de Sorção

O calor isostérico de sorção é calculado a partir das isosteres, que por sua vez é determinada a partir das isotermas.

As Figuras 4.9 e 4.10, contém dados de atividade de água em função da temperatura, na forma de isosteres. Nota-se nessas Figuras, a influência da temperatura nas curvas, ou seja, para baixos teores de umidade, a atividade de água aumentou com o aumento da temperatura.

Os resultados obtidos do calor de sorção estão apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12 , para a casca e polpa da uva Itália, respectivamente.

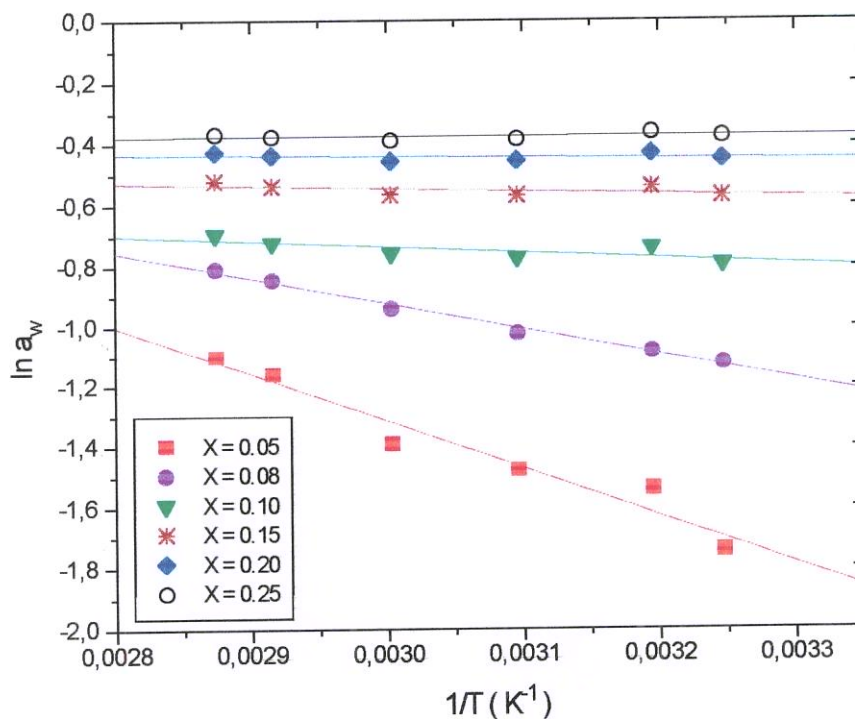


Figura 4.9: Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, para a casca da uva Itália.

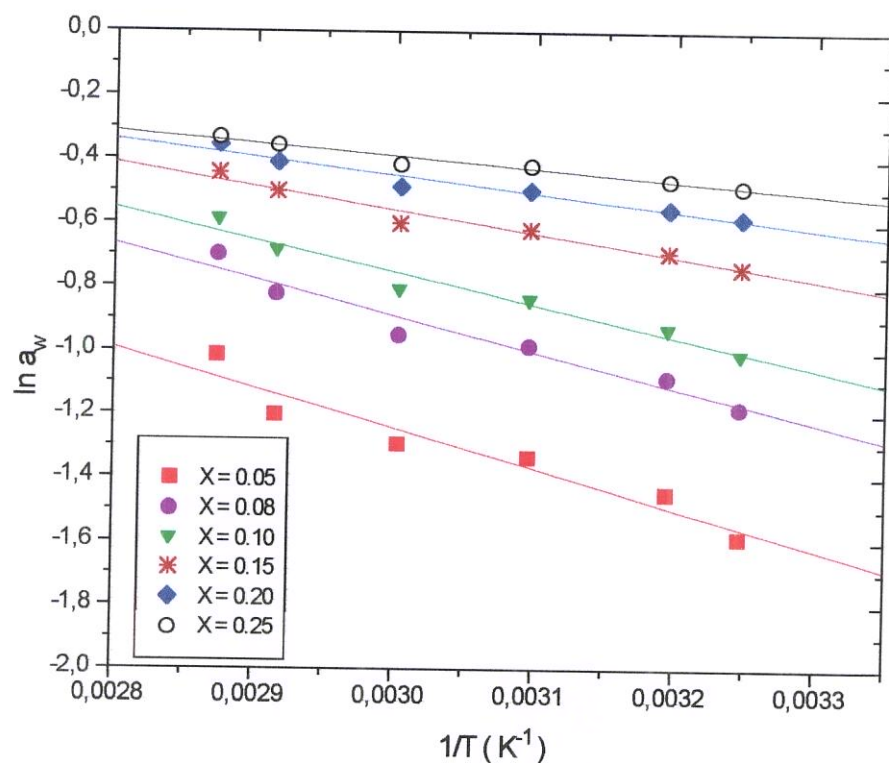


Figura 4.10: Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, para a polpa da uva Itália.

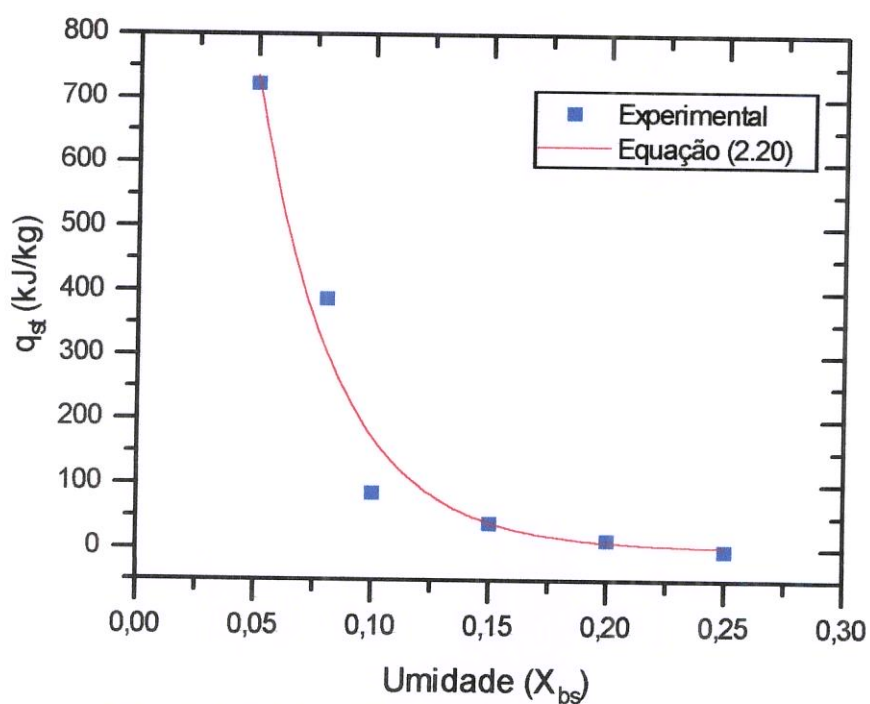


Figura 4.11: Influência da quantidade de umidade no calor de sorção da casca da uva Itália.

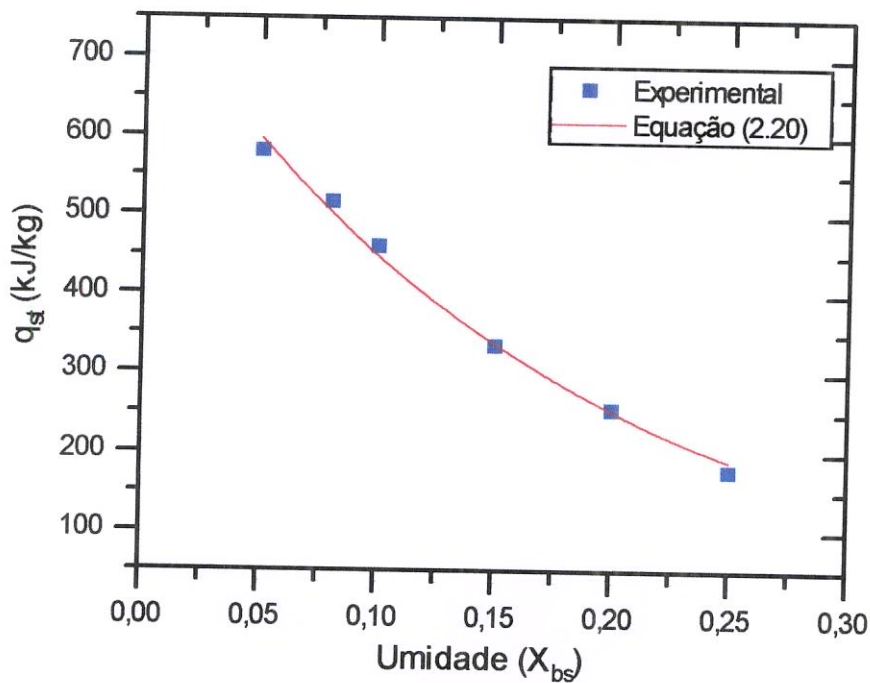


Figura 4.12: Influência da quantidade de umidade no calor de sorção da polpa da uva Itália.

Nota-se que o calor isostérico de sorção decresce com o aumento da umidade do produto. Este comportamento pode ser explicado considerando-se que, inicialmente a sorção ocorre no sítio disponível mais ativo, dando origem a uma alta energia de interação (MAZZA & LEMAGUER, 1978). Porém, ao longo do processo, a disponibilidade dos sítios de sorção decresce e o valor do calor total de sorção tende ao da água pura. Isto é supostamente devido à contribuição da dissolução endotérmica dos açúcares presentes.

Os dados experimentais do calor isostérico de sorção para a casca e polpa da uva em função do teor de umidade, foram ajustados através da equação exponencial empírica (2.20) aplicada por TSAMI *et al.* (1990), com parâmetros q_0 e X_0 . Os resultados deste ajuste estão descritos na Tabela 4.4 a seguir.

Tabela 4.4: Parâmetros (q_0 e X_0), coeficiente de determinação (R^2) e nível de significância (P) do ajuste da Equação de TSAMI *et al.* (1990), para os dados do calor isostérico de sorção (q_s) e da umidade (X) da casca e polpa da uva.

Uva Itália	q_0	X_0	R^2	P
casca	3157,27	29,14	0,96	<0,05
polpa	792,63	5,71	0,99	<0,05

4.3. PERMEABILIDADE DA CASCA DA UVA ITÁLIA AO VAPOR DE ÁGUA

O cálculo da permeabilidade da casca ao vapor de água foi realizado, determinando-se a influência da temperatura do ar, da concentração de glucose, dos pré-tratamentos químicos e da espessura da casca.

O açúcar escolhido neste estudo foi a glucose, pois de acordo com o resultado das características da matéria-prima (item 4.1), a uva possui apenas açúcar redutor em sua composição, não havendo a presença de sacarose. O tipo de pré-tratamento químico utilizado foi semelhante aos experimentos de secagem, onde para este caso, o carbonato de cálcio foi substituído pelo carbonato de sódio, porém sem qualquer mudança em seu efeito. As Tabelas que contém o estudo da influência da temperatura do ar, da concentração de glucose, dos pré-tratamentos químicos e da espessura da casca no cálculo da permeabilidade, se encontram no Apêndice B. Os resultados dos experimentos de acordo com estes parâmetros, estão relacionados a seguir.

A Figura 4.13 mostra uma típica curva de evaporação obtida no experimento de permeabilidade (item 3.4 de Materiais e Métodos), onde foi graficada a perda de massa (E) em função do tempo. Nota-se que a curva de evaporação não exibiu nenhuma região transiente.

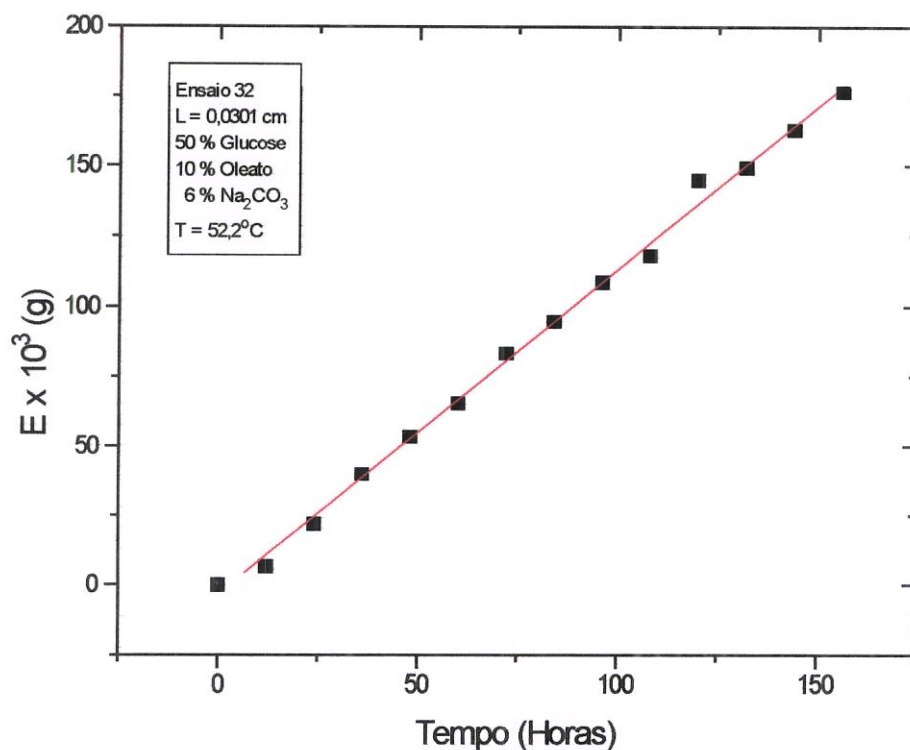


Figura 4.13: Curva de evaporação típica.

4.3.1. Efeito da Concentração de Glucose

A influência da concentração de glucose foi evidenciada, quando um aumento gradativo da mesma causou um decréscimo na permeabilidade da casca da uva. A Figura 4.14 comprova essa influência, já que a permeabilidade foi afetada pela concentração de glucose, principalmente quando a uva sofreu primeiramente um pré-tratamento químico, antes da realização dos ensaios. A partir da concentração mínima estudada (10%), até a máxima (70%), a permeabilidade diminuiu para menos da metade de seu valor inicial.

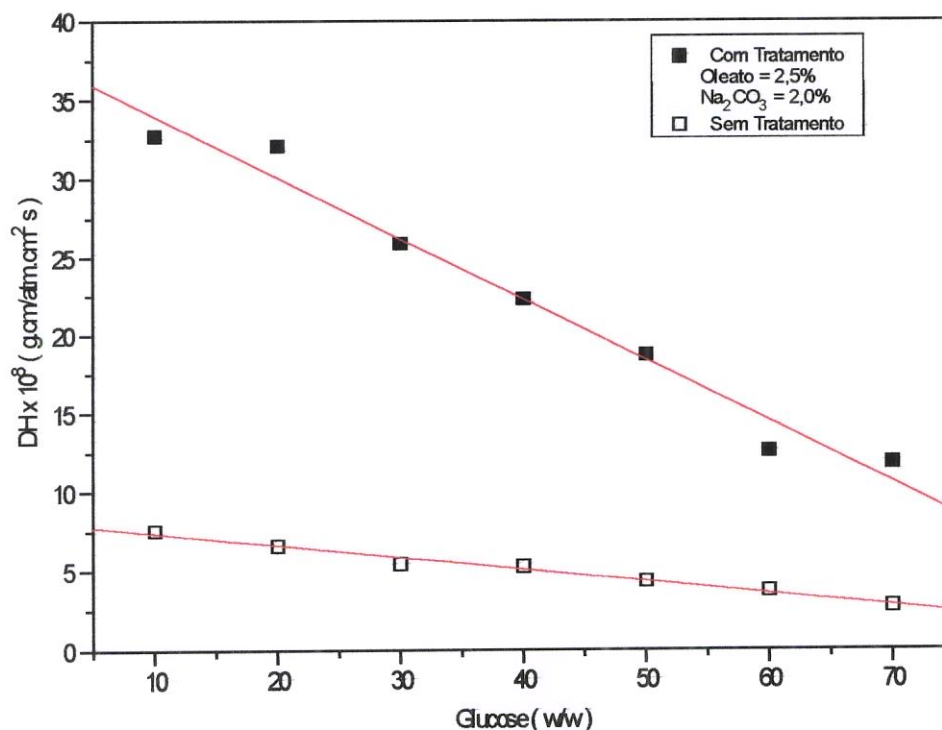


Figura 4.14: Efeito da Concentração de Glucose na Permeabilidade da Casca da Uva Itália ao Vapor de Água.

RIVA & MASI (1986), estudando o efeito da concentração de glucose na permeabilidade da casca da uva Itália, também obtiveram resultados semelhantes. De acordo com estes autores, a diminuição da permeabilidade ao vapor de água, com o aumento da concentração de glucose, se deveu ao aumento da viscosidade da fase líquida embebida ao suporte celular da casca. Eles chegaram a esta conclusão, supondo que no desenvolvimento do processo de permeação, além da difusão de vapor de água, ocorreu também a difusão de glucose na casca. Entretanto, pode existir uma resistência em série à transferência de massa na fase líquida, que depende da concentração de glucose da solução. Assim, a permeabilidade determinada é a global para o sistema. A permeabilidade real da casca poderia ser calculada somente através do estabelecimento de um modelo e do tratamento numérico dos dados.

4.3.2. Efeito do Pré-Tratamento Químico

Pode ser observado na Figura 4.15, que quanto maior a concentração de oleato no pré-tratamento das uvas, maior a permeabilidade da casca ao vapor de água, verificando que o comportamento a ser determinado posteriormente na cinética de secagem é devido a uma alteração da casca.

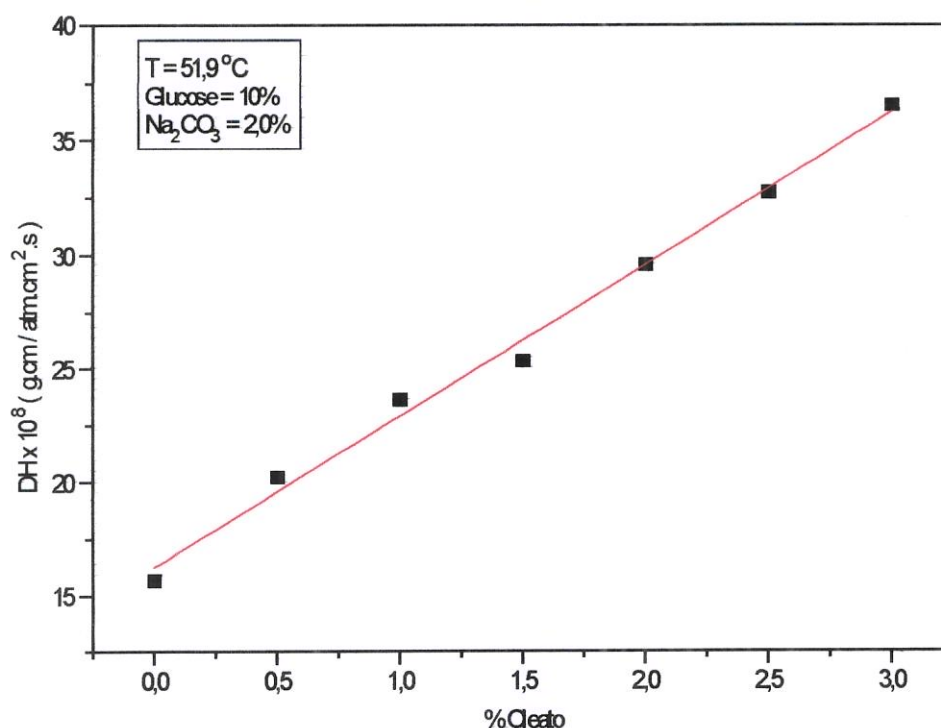


Figura 4.15: Efeito do Pré-Tratamento sobre a Permeabilidade da Casca da Uva Itália ao Vapor de Água.

Este comportamento segundo BARNETT (1980), se deve a uma modificação da estrutura da cera que cobre a uva, e não a uma retirada da mesma. Outros tipos de pré-tratamentos químicos são utilizados por RIVA & MASI, (1986), porém o oleato de etila aumentou a permeabilidade da casca ao vapor de água, mesmo quando utilizado em baixas concentrações. Assim seu uso é vantajoso na produção de passas de uva.

4.3.3. Efeito da Temperatura

O efeito da temperatura na permeabilidade da casca ao vapor de água, pode ser observado na Figura 4.16, que mostra a permeabilidade em função do inverso da temperatura absoluta (K), para as uvas tratadas e não tratadas. A permeabilidade ao vapor de água aumentou com o aumento da temperatura.

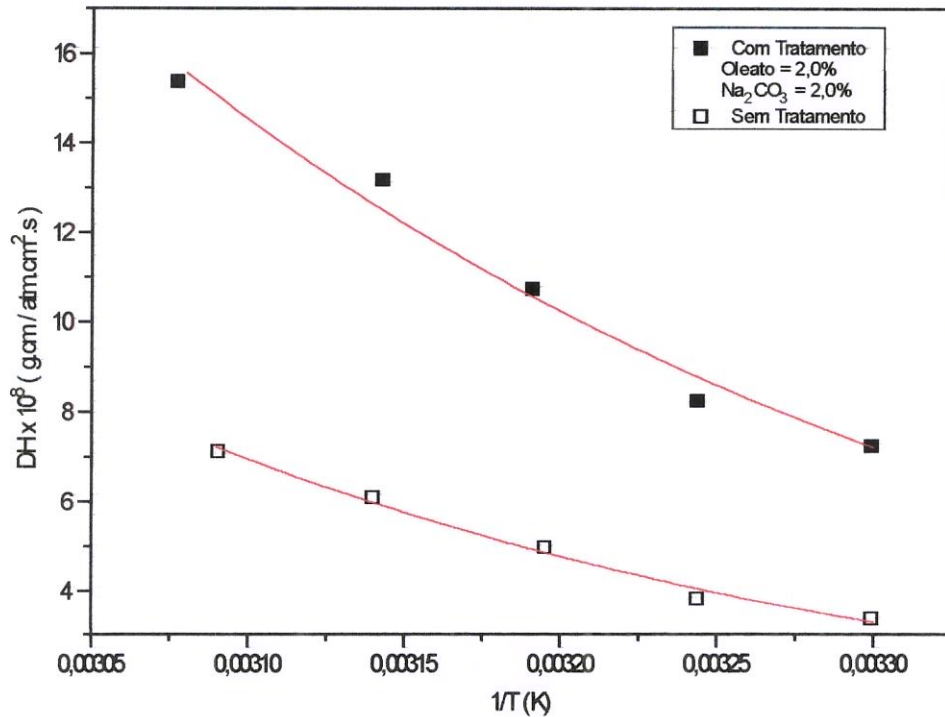


Figura 4.16: Efeito da temperatura sobre a permeabilidade da casca da uva Itália ao vapor de água.

O estudo da influência da temperatura na permeabilidade foi realizado, ajustando-se a equação de Arrhenius aos dados experimentais da Figura 4.16:

$$DH = P_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4.1)$$

onde: P_0 = constante da equação

E_a = a energia de ativação do processo de permeação,

R = constante dos gases

T = temperatura absoluta.

Para uvas com e sem pré-tratamento químico, foram calculados valores de energia de ativação de 6,94 Kcal/molK e 7,46 Kcal/molK respectivamente, com coeficientes de determinação do ajuste de 0,98 e 0,99, e níveis de significância menores que 5%.

RIVA & MASI (1986) estudaram o efeito da temperatura sobre a permeabilidade da uva Itália e obtiveram neste processo, uma energia de ativação de 4,51 Kcal/molK, para as uvas sem pré-tratamento químico.

A partir deste resultado, pode-se observar que a permeação do vapor de água através do tecido da casca da uva não tratada, requer uma energia de ativação um pouco maior para a uva com pré-tratamento.

4.3.4. Efeito da Espessura da Casca

A permeabilidade da casca da uva em função de sua espessura, sem pré-tratamento, porém em diferentes concentrações de glucose, pode ser observada na Figura 4.17.

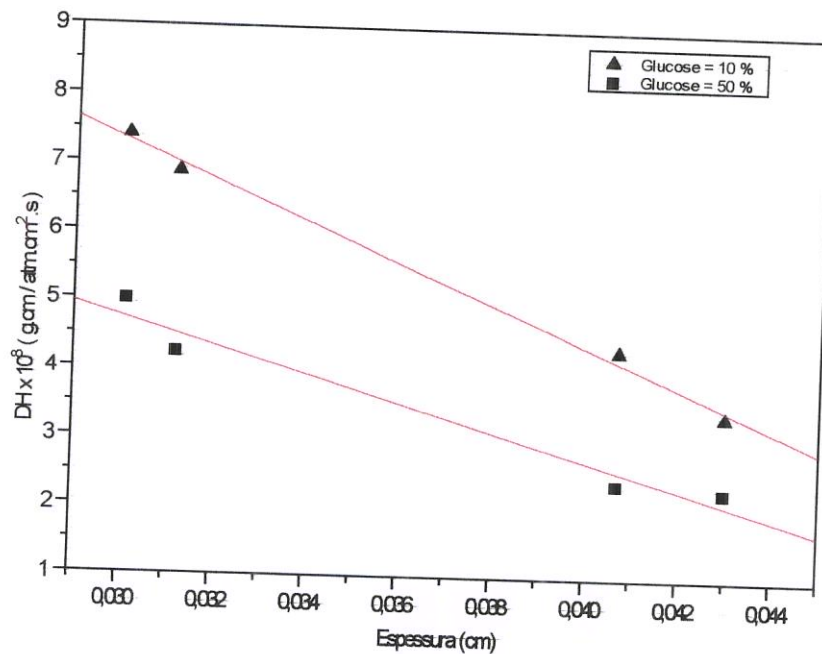


Figura 4.17: Efeito da Espessura sobre a Permeabilidade da Casca de Uva, sem Pré-Tratamento.

Nota-se que uma pequena diminuição da espessura, resultou no aumento da permeabilidade. Como dito anteriormente, as diferentes espessuras foram conseguidas com uvas de diferentes variedades, com camadas de cera de variada constituição. Portanto, tratando-se de uvas sem qualquer tipo de pré-tratamento químico, deve-se levar em consideração a existência dessas diferentes camadas de cera influenciando no processo de permeação.

O efeito da espessura sobre a permeabilidade para as uvas tratadas, nas diferentes concentrações de glucose, pode ser visto na Figura 4.18.

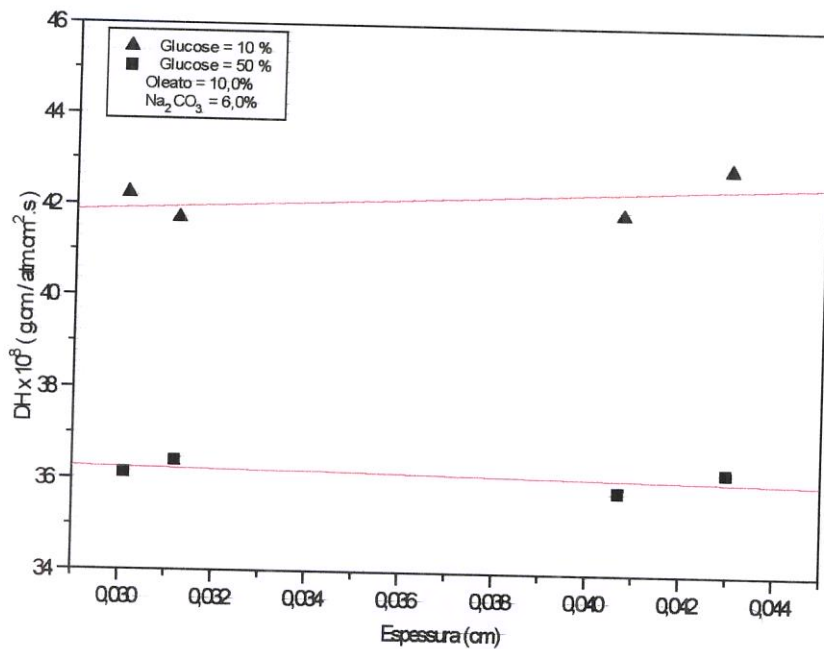


Figura 4.18: Efeito da Espessura sobre a Permeabilidade da Casca de Uva com Pré-Tratamento.

Observa-se que os valores de permeabilidade são praticamente constantes durante toda a faixa de espessura estudada, demonstrando que a espessura da casca da uva não teve influência sobre a permeabilidade e consequentemente foi independente de sua variedade. Segundo estudos realizados por RIVA & MASI (1986) a resistência à permeação é somente devido à cera, visto que a camada celular da membrana cuticular que sustenta essa cera, apresenta pouca resistência ao transporte de água.

A quantidade de cera contida na uva, pode variar de acordo com a safra, variedade, ou mesmo com o manuseio da fruta. Uma correta aplicação de pré-tratamentos químicos para cada caso, implicaria numa redução do tempo de secagem dessa fruta, viabilizando o processo como um todo, já que a cera provou ser uma barreira efetiva ao transporte de água.

Dessa forma, de acordo com os resultados obtidos, a permeabilidade das cascas ao vapor de água realmente foi influenciada pela temperatura do ar,

concentração de glucose e pré-tratamentos químicos, porém a espessura apresentou influência somente na ausência de pré-tratamentos.

4.4. COEFICIENTE DE ENCOLHIMENTO E DENSIDADE APARENTE

A determinação da densidade aparente (ρ_b) e coeficiente de encolhimento (β) em função da umidade da uva, foi realizada, analisando-se o efeito do pré-tratamento químico e da temperatura do ar de secagem.

Os valores experimentais necessários ao cálculo destes parâmetros físicos, se encontram na Tabela 4.5, que contém os resultados de apenas um dos ensaios realizados, os demais ensaios com os respectivos resultados experimentais encontram-se no Apêndice C.

Os dados do volume e da densidade aparente em função do conteúdo de umidade ($x_{b,s}$) contidos na Tabela 4.5, foram graficados nas Figuras 4.19 e 4.20 respectivamente. Os valores experimentais da Figura 4.20 foram ajustados de acordo com a Equação 2.30, obtendo-se os parâmetros ρ_{bo} e β . A avaliação do ajuste foi efetuada através da análise do chi-quadrado (χ^2) e do coeficiente de determinação (R^2).

O coeficiente de encolhimento determinado a partir da utilização da Equação 2.30, foi o mesmo obtido com a regressão linear de u/u_f versus x em base seca. Portanto, optou-se por utilizar a Equação 2.30 para correlacionar os dados de encolhimento da uva.

Tabela 4.5: Valores experimentais obtidos para o cálculo do encolhimento de secagem de uva Itália a 40°C, com pré-tratamento químico de $\text{CaCO}_3 = 2,0\%(p/v)$ e $\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2 = 0,0\%(v/v)$, onde U = umidade em base úmida; X = umidade em base seca; V_s , V_w e V_a são os volumes do sólido, da água e dos poros de ar; v/v_f = adimensional de volume específico e m_s e m_w = massa do sólido e da água.

U (b.u.) kg _a /kg _{su}	X (b.s.) kg _a /kg _{ss}	$V_s+V_w+V_a$ ml	$\frac{v}{v_f}$	m_s+m_w g	ρ_b g/cm ³
0,810	4,263	7,691	6,528	9,471	1,231
0,768	3,310	6,235	5,292	7,756	1,244
0,721	2,584	5,125	4,351	6,449	1,258
0,688	2,205	4,546	3,859	5,767	1,268
0,643	1,801	3,929	3,335	5,040	1,282
0,612	1,577	3,587	3,045	4,637	1,292
0,574	1,347	3,235	2,746	4,223	1,305
0,560	1,273	3,122	2,651	4,090	1,309
0,517	1,070	2,812	2,387	3,725	1,324
0,460	0,852	2,479	2,104	3,332	1,344
0,345	0,527	1,983	1,683	2,748	1,385
0,316	0,462	1,883	1,599	2,631	1,396
0,284	0,397	1,784	1,514	2,514	1,408
0,233	0,304	1,642	1,394	2,346	1,428
0,145	0,169	1,436	1,219	2,103	1,464
0,119	0,135	1,384	1,175	2,042	1,475
0,101	0,112	1,349	1,145	2,001	1,483
0,000	0,000	1,178 ^a		1,799 ^b	1,527 ^c

^a Valor extrapolado da regressão linear de V versus $0,112 < x < 4,263$.

^b Valor determinado em estufa à vácuo por 48 horas na temperatura de 60 °C

^c Valor obtido com m (final) determinada na estufa e V (final) extrapolado

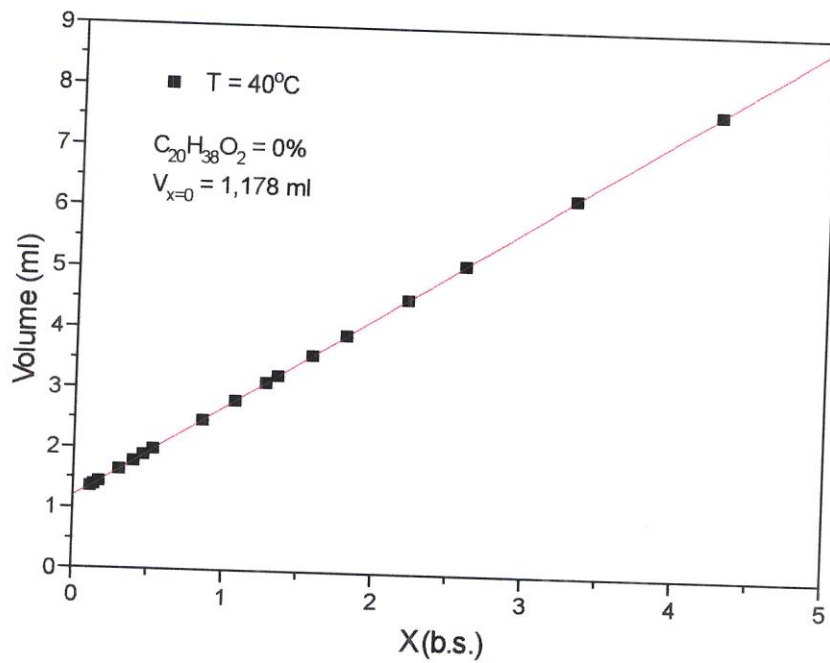


Figura 4.19: Perda de volume da uva com relação à perda de água na temperatura de 40°C .

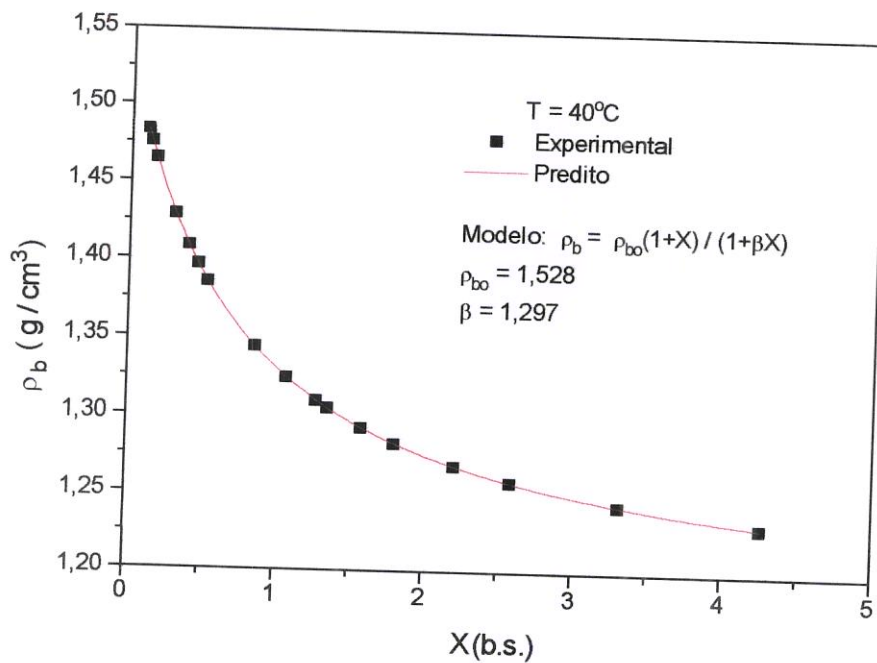


Figura 4.20: Comparação entre os valores da densidade aparente da uva Itália experimental e predito pela Eq.(2.30) a 40°C .

O mesmo procedimento foi adotado para os demais dados experimentais contidos no Apêndice C. Notou-se em todos ensaios, que a densidade aparente aumenta conforme a remoção da água presente na uva, na forma de uma hipérbole. Este comportamento é típico de produtos cujos componentes principais são sólidos solúveis, como as frutas. Neste caso, a perda de volume segue o princípio da aditividade de volume, pois não ocorre enrijecimento da estrutura, o que provocaria a formação de poros. O mesmo resultado foi obtido por LOZANO *et al.* (1983) no estudo da densidade aparente de alguns vegetais, onde a batata e a batata doce apresentam um valor máximo.

Este comportamento pode ser observado nas Figuras 4.21 e 4.22, que descrevem a densidade aparente em função do conteúdo de umidade, para diferentes concentrações de oleato de etila, e para diferentes temperaturas do ar de secagem respectivamente.

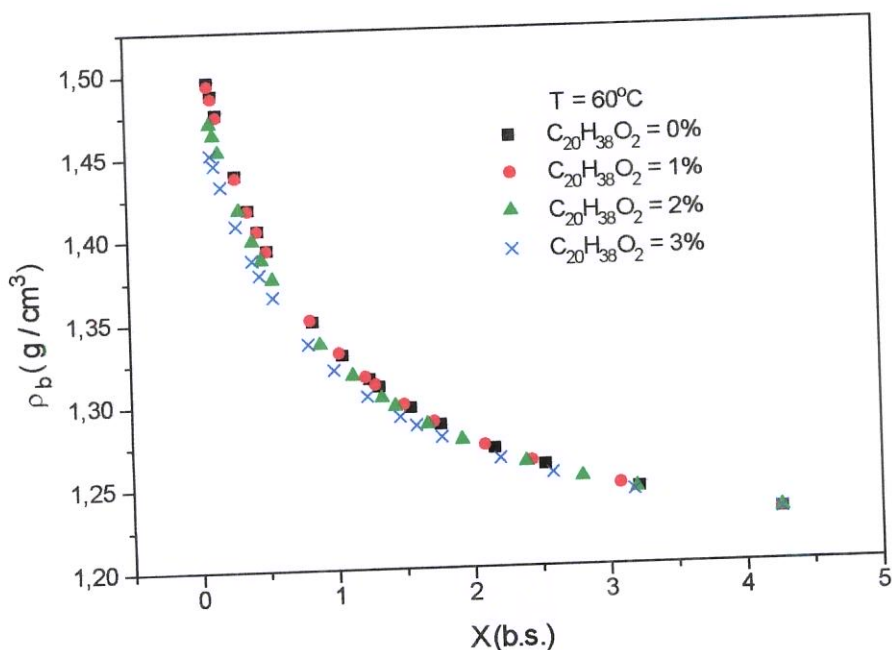


Figura 4.21: Comparação entre os valores experimentais da densidade aparente da uva Itália a 60°C , com pré-tratamento fixo em 2% (p/v) de CaCO_3 , variando-se as concentrações de $\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2$ (0 a 3%, v/v).

Observa-se na Figura 4.21, que o pré-tratamento químico com oleato, pouco afetou a densidade aparente da uva. Apesar do efeito ser pequeno, sabe-se que o pré-tratamento químico acelera a taxa de secagem da uva e em consequência, a estrutura da uva passa a ficar menos colapsada quando comparada a taxas menores, provocando um menor valor de densidade aparente.

A Tabela 4.6 contém os valores dos parâmetros obtidos com o ajuste dos experimentos da Figura 4.21. Pode ser observado, que o coeficiente de encolhimento sofreu um pequeno decréscimo com o aumento da concentração de oleato. Como discutido anteriormente, apesar de se tratar de diferenças bem pequenas, a manutenção da estrutura devido ao aumento na concentração do pré-tratamento químico, reduziu o encolhimento da uva.

Tabela 4.6: Valores de coeficiente de encolhimento (β), densidade aparente do sólido seco (ρ_{bo}), e parâmetros χ^2 (χ^2), coeficiente de determinação (R^2) e nível de significância (P) do ajuste, calculados pela Equação 2.30 na temperatura de 60°C.

$C_{20}H_{38}O_2$ (g/100g)	β	ρ_{bo} (g/cm ³)	χ^2 (10 ⁸)	R^2	P
0	1,312	1,543	1,99	0,998	< 0,05
1	1,310	1,541	2,23	0,998	< 0,05
2	1,285	1,516	95,07	0,999	< 0,05
3	1,263	1,494	1,16	0,999	< 0,05

Durante o processo de secagem da uva, a densidade aparente variou consideravelmente, porém houve uma pequena influência da temperatura como pode ser observado na Figura 4.22 e na Tabela 4.7 que mostra os parâmetros obtidos com o ajuste dos experimentos. A densidade aparente e o coeficiente de encolhimento sofreram um ligeiro aumento com a elevação da temperatura de 40° para 80°C.

Os resultados obtidos no estudo do encolhimento da uva, concordam com a afirmação de KEEY (1975), que relata a existência de dois fatores de ação contrária influenciando o encolhimento, ou seja, ele sofre um aumento com a temperatura e uma diminuição com a taxa de secagem.

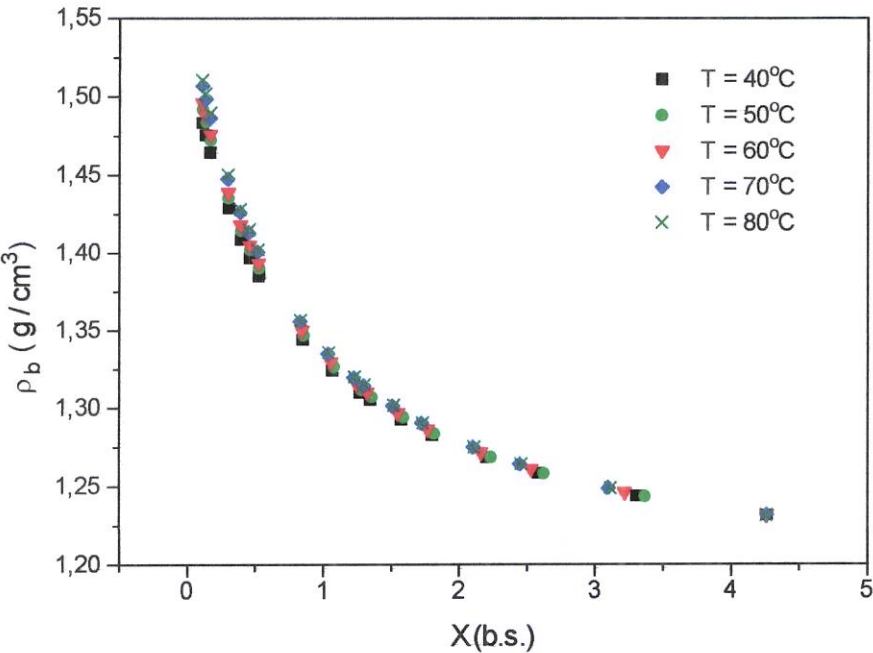


Figura 4.22: Comparação entre os valores experimentais da densidade aparente da uva Itália com pré-tratamento fixo em 2% de CaCO_3 .

Tabela 4.7: Valores de coeficiente de encolhimento (β), densidade aparente do sólido seco(ρ_{bo}), e parâmetros χ^2 (χ^2), coeficiente de determinação (R^2) e nível de significância (P) do ajuste calculados pela Equação 2.30 com pré-tratamento químico de 2% (p/v) de CaCO_3 (sem oleato).

T (°C)	β	ρ_{bo} (g/cm ³)	χ^2 (10 ⁸)	R^2	P
40	1,297	1,528	1,18	0,999	< 0,05
50	1,308	1,539	1,10	0,998	< 0,05
60	1,312	1,543	1,99	0,998	< 0,05
70	1,325	1,556	83,79	0,999	< 0,05
80	1,330	1,561	2,19	0,999	< 0,05

Estudando as propriedades de alguns vegetais, ZOGZAS *et al.* (1994) também observaram que a densidade aparente aumentou com a diminuição do conteúdo de umidade para batata e cenoura, porém, descobriram um efeito contrário no caso da maçã, já que sua densidade aparente diminuiu quando a água foi removida. Este efeito foi ocasionado pela alta porosidade da fruta, quando da eliminação de água da mesma, resultando num coeficiente de encolhimento menor que 1.

O coeficiente de encolhimento da uva variou com a temperatura, de acordo com a Equação (3.8). Como visto em resultados anteriores, este coeficiente aumentou com a elevação da temperatura e pode ser visto na Figura 4.23 descrita a seguir.

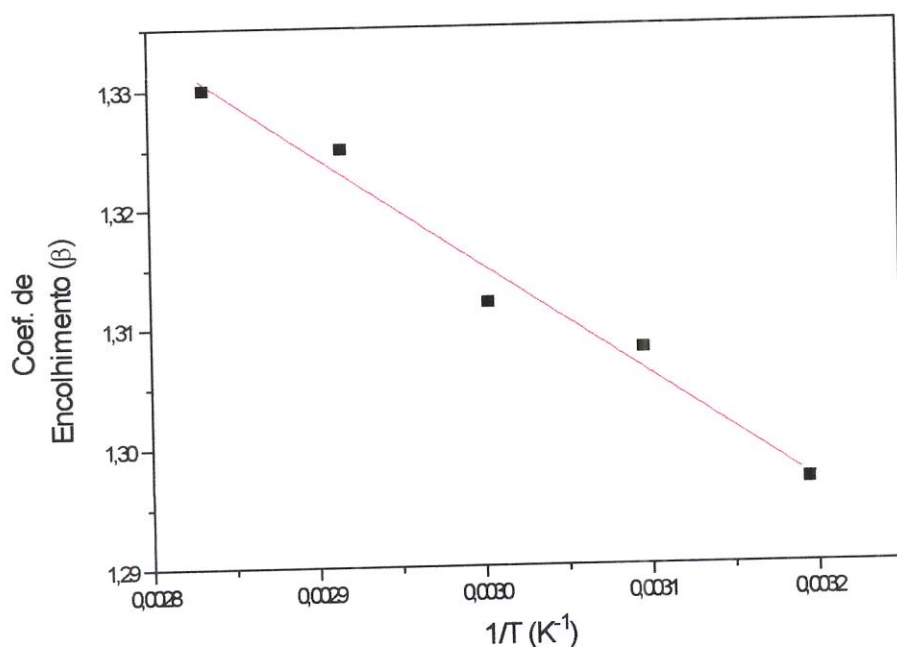


Figura 4.23: Efeito da temperatura no coeficiente de encolhimento da uva Itália.

Para as uvas com pré-tratamento químico de 2% (p/v) de CaCO_3 (sem oleato), o valor obtido de energia de ativação foi de 0,1387 Kcal/mol K.

De acordo com RATTI (1994), pequenos efeitos da temperatura no encolhimento, observados experimentalmente, podem ser atribuídos à dependência das propriedades mecânicas e elásticas com a temperatura.

O estudo do coeficiente de encolhimento e densidade aparente da uva é útil para uma modelagem matemática e simulação do processo de secagem, que possibilitariam uma otimização dos parâmetros de operação, bem como das condições do processo. A temperatura do ar e o pré-tratamento químico não apresentaram considerável influência no encolhimento da uva, porém, quando comparados entre si, o efeito do pré-tratamento foi um pouco mais acentuado.

4.5. CINÉTICA DE SECAGEM

Estudou-se a cinética de secagem da uva Itália, em camada fina, analisando-se a influência dos pré-tratamentos químicos e da temperatura do ar de secagem. As tabelas contendo os dados experimentais dos ensaios realizados encontram-se no apêndice D.

Nota-se nos dados a serem apresentados a seguir (Figuras 4.24 e 4.26) que não houve o período de secagem a taxa constante bem definido, ocorrendo somente o período decrescente. Isto demonstra que a difusão é provavelmente o mecanismo físico que governa o movimento de umidade desta fruta, ou seja, a velocidade de secagem é controlada pela velocidade de difusão do líquido através do sólido da polpa e da casca, desprezando-se a resistência externa. Verifica-se que mesmo em umidades muito altas, não existiu o período de taxa constante, devido à presença de sólidos solúveis que decrescem a atividade de água para toda a faixa de umidade utilizada (Figuras 4.3 e 4.4). Assim, mesmo no valor máximo de umidade, a atividade de água devido a estes sólidos solúveis é menor que 1.

De acordo com KEEY (1975), a ausência do período constante de secagem, pode ter ocorrido por causa da natureza da umidade, pois mesmo havendo umidade superficial livre, a água estava na forma de suspensão de

células e de solução (açúcares e outras moléculas), apresentando uma pressão de vapor abaixo da pressão de vapor da água pura. Por outro lado, RIVA & PERI, (1986) constataram períodos constantes de secagem em uvas das variedades Rubi, Thompson e Esmeralda com secagem solar e convectiva, em baixas vazões de ar.

4.5.1. Efeito da Temperatura do ar

A influência da temperatura pode ser vista na Figura 4.24, que descreve as curvas da taxa de secagem em função da variação do conteúdo de umidade das amostras na mesma velocidade do ar, e com o mesmo pré-tratamento.

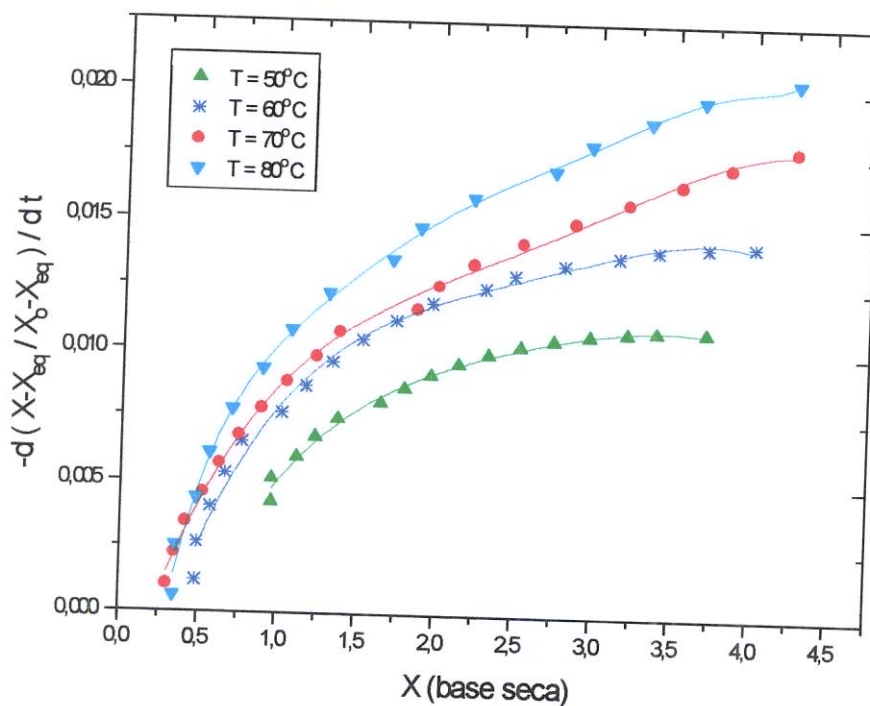


Figura 4.24: Efeito da temperatura do ar na cinética de secagem da uva Itália.

Nota-se que o aumento da temperatura favoreceu a secagem, devido ao aumento do coeficiente convectivo de transferência de calor. De acordo com ensaios preliminares, a concentração de carbonato de cálcio no pré-tratamento

químico foi estabelecida em 2% (p/v), já que concentrações maiores causaram fissuras indesejáveis na casca da uva.

Um estudo anterior sobre o efeito da temperatura na permeabilidade da casca da uva ao vapor de água, mostrou que a permeabilidade também aumenta com a temperatura. Neste caso, como suposto anteriormente, a transferência interna de massa controla o processo e, conseqüentemente, aumenta com aumento da difusividade interna da polpa com a temperatura.

No estudo do comportamento da secagem para diversas variedades de uva, VAZQUEZ *et al.* (1997) atribuíram o aumento da taxa de secagem à difusão de água através da casca da uva, que é bastante favorecida com temperaturas elevadas. SIMAL *et al.* (1996) estudando a cinética de secagem de uvas, obtiveram resultados semelhantes, porém utilizaram outro tipo de pré-tratamento químico.

Na Figura 4.25 estão graficadas, as umidades residuais de água livre das amostras (M), em função do tempo (t). As umidades de equilíbrio, utilizadas no cálculo da umidade residual e indicadas nessa Figura, foram obtidas a partir das isotermas de sorção da polpa da uva, ajustadas pela equação de GAB, que se encontram no Apêndice A e pelas condições da umidade relativa do ar aquecido. Considerou-se a isoterma de sorção à 75°C para a obtenção da umidade de equilíbrio na temperatura do ar de secagem à 80°C.

Uma correlação empírica foi utilizada para representar as curvas de secagem, a fim de poder compará-las com outros resultados, ou utilizá-las na simulação para projetos de secadores industriais. Optou-se pela utilização da equação de Page (Equação 2.7) que representa de forma satisfatória os dados de secagem de alimentos.

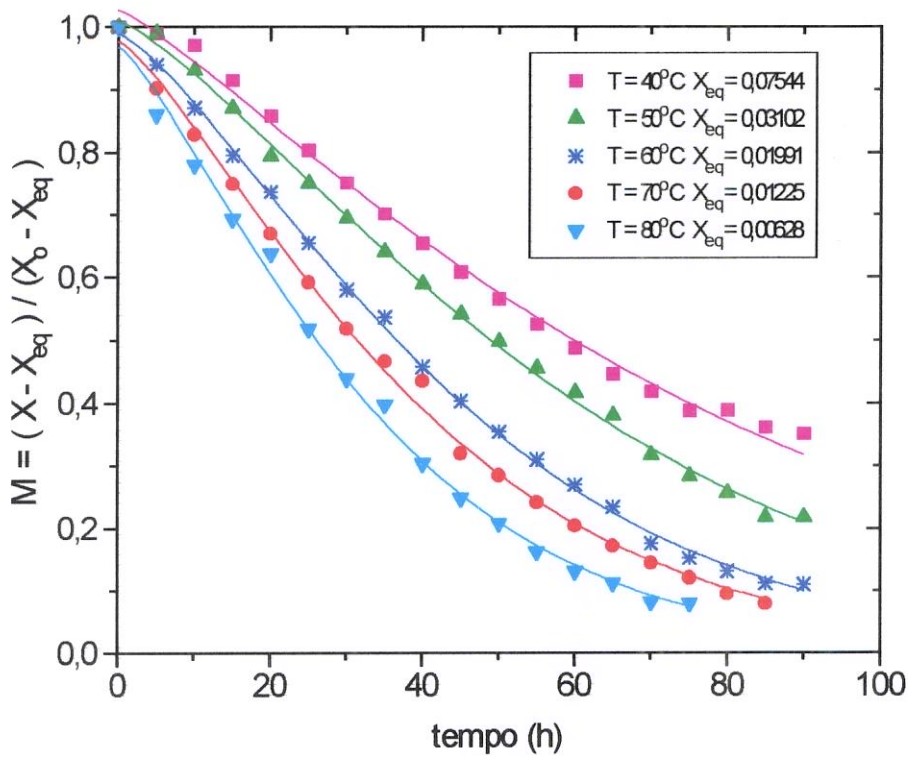


Figura 4.25: Curvas de secagem da uva Itália.

As constantes “C”, “K” e “n” da Equação de Page obtidas por regressão não linear, encontram-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Parâmetros do modelo de Page, χ^2 (χ^2) e coeficiente de determinação (R^2), calculados por regressão dos dados experimentais da cinética de secagem da uva Itália sem pré-tratamento de oleato e a diferentes temperaturas.

T (°C)	Parâmetros do Modelo			χ^2 (10^5)	R^2
	C	K (10^3)	n		
40	1,028	5,29	1,20	30,0	> 0,99
50	1,008	4,11	1,32	13,0	> 0,99
60	0,989	5,35	1,35	9,7	> 0,99
70	0,979	7,82	1,29	24,0	> 0,99
80	0,970	10,10	1,28	38,0	> 0,99

*todos os ajustes apresentaram níveis de significância menores que 5%.

Pode-se observar que a Equação de Page se ajustou bem aos dados experimentais, com coeficientes de determinação próximos de 1, podendo portanto, ser utilizada na representação das curvas de cinética de secagem da uva. Nota-se que os valores de "K" obtidos neste processo, sofreram um aumento com a elevação da temperatura do ar, variando de acordo com a equação:

$$K = -1,46 \times 10^{-3} + 1,3 \times 10^{-4} T \quad (4.2)$$

onde T é a temperatura (°C). Este ajuste foi obtido com um coeficiente de determinação igual a 0,87 e nível de significância menor que 5%.

4.5.2. Efeito do Pré-tratamento Químico

Secagens realizadas em temperaturas acima de 70°C, provocaram a caramelização dos açúcares presentes na fruta, causando um maior escurecimento das amostras, que é um efeito indesejável, pois afeta a aceitação do produto. Processos realizados a temperaturas abaixo de 60°C, levaram longos períodos de secagem. Portanto, optou-se por utilizar a temperatura de 60°C no estudo da influência do pré-tratamento químico para a cinética de secagem da uva.

A análise do efeito da concentração de oleato de etila sobre a permeabilidade da casca, auxiliou no estudo da cinética de secagem da uva pois, baseando-se nesses resultados, pôde-se adotar concentrações semelhantes para a realização dos experimentos de secagem. Este efeito pode ser visto na Figura 4.26, que descreve as taxas de secagem com a variação do conteúdo de umidade das amostras.

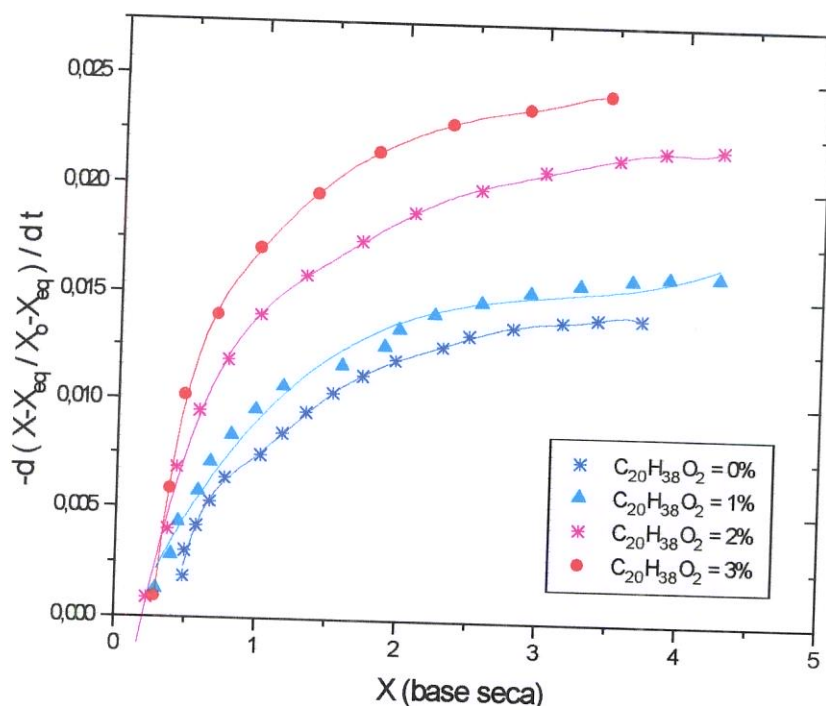


Figura 4.26: Efeito do pré-tratamento químico na cinética de secagem da uva Itália com ar a 60°C.

Nota-se que a taxa de secagem aumentou com a concentração de oleato no pré-tratamento químico. A partir de um valor de umidade de 3,5 kg_a/kg_{ss} , para as uvas sem tratamento e com pré-tratamento de 1% de oleato, houve um aumento na taxa de secagem de 11,7%. Entretanto, quando se utilizou concentrações de oleato de 2 e 3%, o aumento na taxa foi de 51,6% e 71,3% respectivamente. Dessa forma, observa-se que o aumento da evaporação de água nas uvas é mais acentuado com concentrações de 2 e 3%, levando à afirmação de que um ótimo processo de secagem, pode ser realizado empregando-se um pré-tratamento químico com uma concentração de oleato em torno de 2%.

Do ponto de vista econômico, este resultado provoca uma considerável redução no consumo de energia, além de melhorar o rendimento do processo, principalmente nos períodos de safra.

VAZQUEZ *et al.* (1997) estudando o efeito do pré-tratamento químico para 3 variedades de uvas, incluindo a variedade Itália, utilizaram uma concentração de 7% (p/p) de carbonato de potássio, misturado com 0,4% (v/v) de óleo de oliva na temperatura de 50°C, e também obtiveram uma queda na taxa de secagem, quando comparada com uva tratada apenas com carbonato de potássio. De acordo com estes autores, os pré-tratamentos não só influenciam a taxa de secagem, mas também inibem de forma significativa o processo de escurecimento do produto final.

A Figura 4.27 apresenta a umidade residual em função do tempo de secagem, utilizando como visto no item anterior, as umidades de equilíbrio obtidas a partir das isotermas de sorção da polpa da uva.

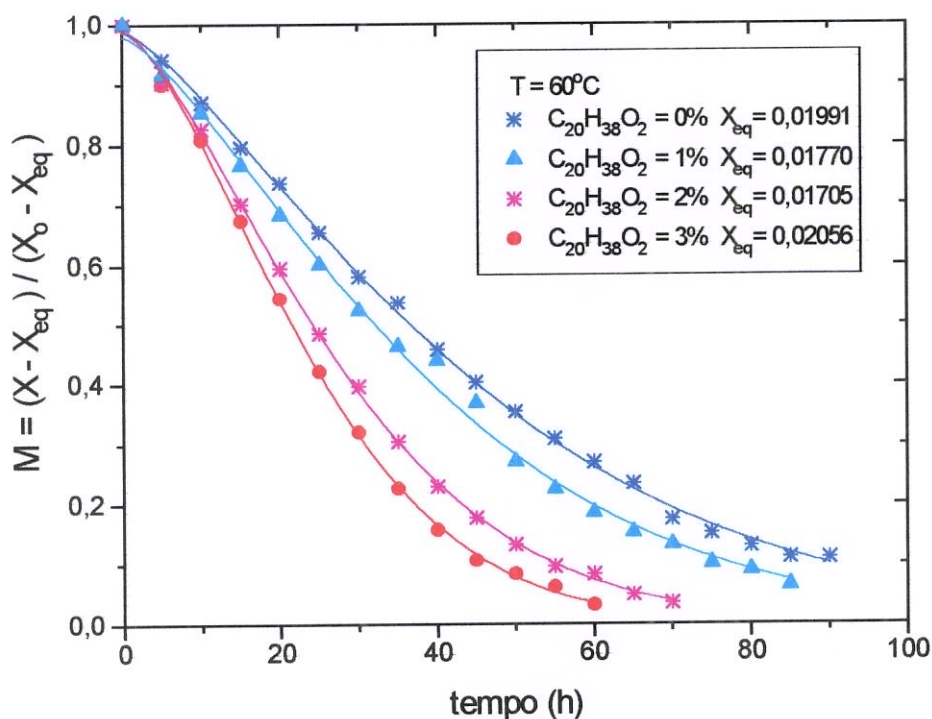


Figura 4.27: Curvas de secagem da uva Itália na temperatura de 60°C.

Os parâmetros obtidos realizando-se um ajuste dessas curvas com a equação de Page, encontram-se na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Parâmetros do modelo de Page, χ^2 (χ^2) e coeficiente de determinação (R^2), calculados pelo ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem da uva Itália à 60°C, em diferentes concentrações de oleato de etila ($C_{20}H_{38}O_2$).

$C_{20}H_{38}O_2$ (% v/v)	Parâmetros do Modelo			$\chi^2 (10^5)$	R^2
	C	K (10^3)	n		
0	0,989	5,35	1,35	9,7	>0,99
1	0,979	5,50	1,38	33,0	>0,99
2	0,987	6,20	1,47	7,8	>0,99
3	0,987	5,65	1,56	9,8	>0,99

*todos os ajustes apresentaram níveis de significância menores que 5%.

Uma análise da Tabela 4.9, mostra que os dados experimentais foram novamente bem ajustados com a utilização da equação de Page. Nota-se que a constante "K" é proporcional à concentração de oleato de etila. Quanto à constante "n", esta varia de acordo com a equação

$$n = 1,33 + 0,07 C \quad (4.3)$$

onde C é a concentração de oleato de etila em porcentagem. Obteve-se com este ajuste, um coeficiente de determinação igual a 0,98 e um nível de significância da correlação menor que 5%.

5. CONCLUSÕES

1. O estudo da permeabilidade da casca da uva Itália ao vapor de água, permitiu a constatação de que a película de cera, consiste numa grande resistência à transferência de massa.
2. A influência do pré-tratamento químico sobre a permeabilidade da casca da uva Itália ao vapor de água, foi maior que o efeito produzido pela temperatura do ar. Pode-se concluir a nível industrial, que seria mais aconselhável a utilização de pré-tratamentos químicos à base de oleato do que a utilização de altas temperaturas.
3. O estudo do efeito do pré-tratamento químico sobre a permeabilidade da casca da uva (separada mecanicamente), permitiu a confirmação de que a película de cera que a recobre é a principal barreira à transferência de massa no processo de secagem dessa fruta.
4. Constatou-se um decréscimo linear do volume em função da umidade. Ocorreu um ténue aumento de 2,5% no coeficiente de encolhimento na faixa de temperatura entre 40 a 80°C, enquanto que com o aumento da concentração de oleato o coeficiente de encolhimento teve uma diminuição em torno de 3,8%.
5. A equação de GAB representou bem as curvas de equilíbrio experimentais para a casca e polpa da uva nas diversas temperaturas.
6. Ocorreu uma diferença entre as isotermas de dessorção da casca e da polpa nas diferentes temperaturas estudadas. No estudo da secagem optou-se pela utilização das isotermas da polpa, já que se supõe ser esta a que controla o processo quando a barreira de cera à transferência de massa é eliminada.
7. Constatou-se a existência de histerese entre as isotermas de adsorção e dessorção da polpa a 60°C. Porém para o estudo do processo de secagem, onde faixas de pequena atividade de água são importantes para a determinação das umidades de equilíbrio, não foi observada histerese.

8. A Equação de Page se ajustou bem aos dados experimentais, representando satisfatoriamente as curvas de secagem.

9. Encontrou-se uma dependência linear do parâmetro "K" da Equação de Page com a temperatura e do parâmetro "n" com a concentração de oleato no pré-tratamento químico.

10. Como resultado da mudança da permeabilidade da casca, os pré-tratamentos químicos aumentaram as taxas de secagem reduzindo o consumo de energia para a produção de passas.

11. Como sugestões para trabalhos futuros, poderiam ser realizados:

- a) Estudo da permeabilidade da casca a umidades relativas menores.
- b) Modelagem matemática dos experimentos de determinação da permeabilidade da casca, com o objetivo de analisar a influência da fase líquida.
- c) Análise microscópica da casca em função das condições de pré-tratamento químico.
- d) Modelagem da cinética de secagem com contração, considerando o efeito adicional da resistência da casca.
- e) Análise química e sensorial do produto final em função das condições de processo (temperatura e pré-tratamentos).
- f) Simulação de secadores.
- g) Otimização econômica do processo.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AGUERRE,R.J.; GABITO,J.F. & CHIRIFE, J. Utilization of Fick's second law for the evaluation of diffusion coefficients in food process controlled by internal diffusion. **Journal Food Technology**, **20**: 623-629, 1985.
- AGUERRE,R.J.; SUAREZ,C. & VIOLLAZ,P.E. Drying Kinetics of Rough Rice Grain. **Journal of Food Technology**, **17**: 679-686, 1982.
- ALZAMORA,S.M.; CHIRIFE,J. & VIOLLAZ,P.A. A simplified model for predicting the temperatures of foods during air dehydration. **Journal Food Technology**, **14**: 369-380, 1979.
- A.O.A.C. (Association of Official Analytical Chemists). **Official methods of analysis**, Washington D.C., 11 th ed.-31.030 (1970); 14 th ed.-14.006 (1984).
- A.O.A.C. (Association of Official Analytical Chemists). **Official methods of analysis**: 942.15: p.10 (1995).
- ASP,N.G.; JOHANSSON,C.G.; HALLMER,H. & SILJESTROM,M. Rapid enzymatic assay of insoluble dietary fiber. **Journal of Agriculture Chemical**, **31**: 476 - 482, 1983.
- AYRANCI,E.; AYRANCI,G. & ZAFER,D. Moisture sorption isotherms of dried apricot, fig and raisin at 20°C and 36°C. **Journal of Food Science**, **55**: n6, 1990.
- BARNETT,D. Dried Grapes - The Involvement of Lipids in their Production. **CSIRO Food Research Quaterly**, **40(1)**, 16-22, 1980.
- BELITZ, H.D. & GROSH,W. **Química de Los Alimentos**. Editorial Acribia S.A., p.644, 1985.

- BOKI,K. & OHNO,S. Equilibrium isotherm equations to represent moisture sorption on starch. **Journal of Food Science**, **56**: n.4, 1106-1110, 1991.
- BRUIN,S. & LUYBEN,K.C.A.M. Drying of food materials: a review of recent developments. In: **Advances in Drying**, ed. Arum S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, v.1,155-215, 1980.
- CARBONELL,J.V.; PIÑAGA,F.; YUSÁ,V.; PEÑA,J.L. The dehydration of Paprika with ambient and heated air and the kinetics of colour degradation during storage. **Journal of Food Science**, **5**: 179-193, 1986.
- CARSLAW,H.S. & JAEGER,J.C. **Conduction of Heat in Solids**. Clarendon Press, Oxford, 2d. edition, 1959.
- CHAMBERS,T.C. & POSSIGHAM,J.V. (1963) - Studies of the fine structure of the waxy layer of sultana grapes. *Austr. J. Biol. Sci.*, **16**: 818-825.
- CHIANG,W-C. & PETERSEN,J.N. Thin Layer Air Drying of French Fried Potatoes, **Journal of Food Technology**, **20**: 67-78, 1985.
- CHIRIFE,J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: **Advances in Drying**, ed. Arum S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation. Washington, 73 - 102, 1983.
- CHIRIFE,J.; FERRO FONTAN,C. & BENMERGUI,E.A. The prediction of water activity in aqueous solutions in connection with intermediate moisture foods IV. A_w prediction in aqueous non electrolyte solutions. **Journal Food Technology**, **15**: p. 59-70, 1980.
- CRANK,J., **The mathematics of diffusion**, Pergamon Press, Oxford, 1975.
- CRUESS,W.V., **Produtos industriais de frutas e hortaliças**, Ed. Edgard Blücher Ltda., vol. II, 555-596, 1973.

- DĂSCĂLESCU, A. **Le sechage et ses Applications Industrielles**, Traduit par A. PANAITESCO, DUNOD, Paris, France, 1969.
- DAUDIN, J.D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. **Sciences des Aliments**, **3(1)**: p.1-36, 1983.
- DUDMAN, W.F. & GRNCAREVIC, M. Determination of the surface waxy substances of grapes. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, **13 (4)**: 221-224, 1962.
- FOHR, J.P. & ARNAUD, G., Grape drying: from sample behaviour to the drier project, **Drying Technology**, **10(2)**: 445-465, 1992.
- FRUPEG, Comunicação pessoal, 1996.
- GABITTO, J.F. & AGUERRE, R.J. Solucion Numerica del Processo de Secado com Cambio de Volumen. **Revista Latinoam. Transf. Cal. Mat.**, **9**: 231-240, 1985.
- GRNCAREVIC, M. Effect of various dipping treatments on the drying rate of grapes for raisins. **American Journal of Enology and Viticulture**, **14 (4)**: 230-234, 1963.
- GRNCAREVIC, M.; RADLER, F. & POSSIGHAM, J.V. The dipping effect causing increased drying of grapes demonstrated with an artificial cuticle. **American Journal of Enology and Viticulture**, **19**: 27-29, 1968.
- GUSTAFSON, R.J. & HALL, G.E. Density and Porosity changes of shelled corn during drying. **Transactions of the ASAE**, **15(3)**: 523-525, 1972.
- HOLDSWORTH, S.D. Dehydration of food products. A review. **Journal of Food Technology**, **6**: 331- 370, 1971.

- HSU,C.F.; SPARROW,E.M. & PATANKAR,S.V. Numerical solution of moving boundary problems by boundary immobilization and a control-volume-based finite difference scheme. **Int. J. Heat and Mass Transfer**, 24(8), 1335-1343, 1981.
- ICHIKAWA,Y. & KIKUCHI,N. A one phase multidimensional Stefan problem by the method of variational inequalities. **Ind. J. Num. Meth. Engineering**, 14, 1191-1195, 1978.
- IGLESIAS,H.A. & CHIRIFE,J. **Handbook of Food Isotherms**: Water sorption parameters for food and food components. Academic Press, Orlando, 1983.
- JOWITT,R.; ESCHER,F.; HALLSTOM,B.; MEFFERT,H.F.T.; SPIESS,W.E.L. & VOS,G. **Physical Properties of Foods**. Applied Science Publishers, London and New York, 1983.
- KEEY,R.B. **Drying: Principles and Practice**, First Edition Reprinted, Pergamon Press, GB, 1975.
- KERRIDGE,G.H. & GRNCAREVIC,M. Production of dark coloured sultanas by sun-drying in Australia. **Food Technology of Australia**, 17 (6): 328-331, 1965.
- LABUZA,T.P., TANNENBAUM,S.R. & KAREL,M. Water content and stability of low-moisture and intermediate-moisture foods. **Food Technology**, 24: 35-41, 1970.
- LABUZA,T.P., KAAANANE,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.
- LOZANO,J.E., ROTSTEIN,E. & URBICAIN,M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. **Journal of Food Science**, 48: 1497-1502, 1983.

- MADAMBA,P.S., DRISCOLL,R.H. & BUCKLE,K.A. Shrinkage, density and porosity of garlic during drying. **Journal of Food Engineering**, **23**: 309-319, 1994.
- MAZZA,G. & LEMAGUER,M. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. **Journal of Food Technology**,**15**: 181-194, 1980.
- MC CORMICK,P.Y. Solids drying fundamentals. In: PERRY,R.H. and CHILTON,C.H., **Chemical engineer's handbook**. Mc Graw-Hill Co. 5ed. sec.20-4, 1983.
- MISRA,M.K. & BROOKER,D.B. Thin Layer Drying and Rewetting Equations for Shelled Yellow Corn. **Transactions of the ASAE**, **23(5)**: 1254-1260, 1980.
- MURRAY,W.D. & LANDIS,F.L. Numerical and Machine Solutions of transient heat conduction problems involving melting or freezing. **J. Heat Transfer**, **106**, 1959.
- NOREÑA,C.Z., HUBINGER,M.D. & MENEGALLI,F.C. (1996) - Técnicas básicas de determinação de atividade de água: uma revisão. **Boletim SBCTA**, **30(1)**: 91-96, 1996.
- PARRY,J.L. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review, **Journal of Agricultural Engineering Researches**, **32**: 1-29, 1985.
- PARTI,M. & DUGMANICS,I. Diffusion coefficient for corn drying. **Transactions of the ASAE**, **v.33**: n.5, 1652-1656, 1990.
- PATHAK,P.K., AGRAWAL,Y. & SINGH,B.P. Thin-layer drying model for rapeseed. **Transactions of the ASAE**, **v.34**: n.6, 2505-2508, 1991.
- PETRUCCI,V.; CANATA,N.; BOLIN,H.R. FULLER,G. & STAFFORD,A.E. Use of oleic acid derivatives to accelerate drying of Thompson seedless grapes **JAOCs**, **51(3)**: 77 - 80, 1974.

- POINTING, J.D. & MC BEAN, D.M. Temperature and dipping treatment effects on drying times of grapes, prunes and other waxy fruits. **Food Technology**, **24(12)C**: 1403 - 1406, 1970.
- RADLER, F. The prevention of browning during drying by the cold dipping treatment of Sultana grapes. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, **15 (12)**: 864-869, 1964.
- RANGANA, S. **Central Food Technological Research Institute Mysore**. McGraw-Hill Publishing Company Limited - New Delhi, p. 2-3, 1977.
- RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, **23**: 91-105, 1994.
- RIVA, M. & MASI, P. The influence of drying conditions and pretreatments on permeability to water of grape skin. **Drying 86 - Proceedings of the Fifth International Symposium on Drying**, vol.1: 454-460, 1986.
- RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. **Engineering Properties of Foods**, (M.A. Rao e S.S.H. Rizvi, eds.) pp. 155-165, Academic Press, New York, 1986.
- ROLPH, W.D. & BATHE, K.J. An efficient algorithm for analysis of non-linear heat transfer with phase changes. **In. J. Num. Meth. Engineering**, **18**, 119-134, 1980.
- ROMAN, G.N.; URBICAIN, M.J. & ROTSTEIN E. Moisture equilibrium in apples data and theoretical considerations. **Journal of Food Science**, **v.47**: p.1484-1488 e 1507, 1982.
- SÁ, M.M. & SERENO, A.M. Effect of temperature on sorption isotherms and heats of sorption of quince jam. **International Journal of Food Science and Technology**, **28**: 241-248, 1993.

- SANJUÁN,N.; BERMEJO,M.V.; VIVANCO,D.; CAÑELLAS,J. & MULET,A. Drying Kinetics of Moscatel Grapes. **Drying'96 - Proceedings of the 10th International Drying Symposium**, vol B, 1069-1076, 1996.
- SARAVACOS,G.D. & RAOUZEOS,G.S. Diffusivity of moisture in air drying of raisins. In: **Drying 86**, ed. Arum S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation, v.2: 486-491, 1986.
- SARAVACOS,G.D., TSIOURVAS & TSAMI,E., Effect of Temperature on the Water Adsorption Isotherms of Sultana Raisins. **Journal of Food Science**, vol. 51, n.2, p.381-383 e 387, 1986.
- SIMAL,S., MULET,A.,CATALÁ,P.J., CAÑELLAS,J & ROSSELLO,C. Moving boundary model for simulating moisture movement in grapes. **Journal of Food Science**, v.61, n.1, p.157-160, 1996.
- SOMOGYI,L.P. & LUH,B.S.: Dehydration of fruits, in **Commercial Fruit Processing**, ed. Woodroof, J.G. & B.S. Luh, AVI Publish. Co., 2nd ed., Westport, 397-398, 1986.
- SUAREZ,C., VIOLLAZ,P.A. & CHIRIFE,J. Diffusional analysis of air drying of grain sorghum. **Journal of Food Technology**, 15: 523-531, 1980.
- SUAREZ,C. & VIOLLAZ,P.A. Shrinkage on drying behavior of potato slabs. **Journal of Food Engineering**, 13: 103-104, 1991.
- TOBINAGA,S. & PINTO,L.A.A. Secagem de materiais fibrosos: Músculos de peixes. In: **Tópicos Especiais em Secagem**, editado por J.T. Freire e D.J.M. Sartori, UFSCar, v.1, 211-251, 1992.
- TORRANO,A.D.M. & OKADA,M. Processamento do cação salgado e seco. **Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos**, 54: 153-166, nov/dez, 1977.

- TSAMI,E., MAROULIS,Z.B., MARINOS-KOURIS,D. & SARAVACOS,G.D. Heat of sorption of water in dried fruits. **International Journal of Food Science and Technology**, **25**: 350-359, 1990.
- TUOHY,J.J. Physical properties of textured whey protein. II. Bulk density, water binding capacity and protein solubility. **Journal of Food Science Technology**, **4(2)**: 111-123, 1980.
- VACAREZZA,L.M., LOMBARDI,J.L. & CHIRIFE,J. Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. **Journal of Food Technology**, **9**: 317-327, 1974.
- VAGENAS,G.K., MARINOS-KOURIS,D. & SARAVACOS,G.D. An analysis of mass transfer in air-drying of foods. **Drying Technology**, **v.8**, n.2, 323-342, 1990a.
- VAGENAS,G.K., MARINOS-KOURIS,D. & SARAVACOS,G.D. Thermal properties of raisins. **Journal of Food Engineering**, **v.11**: 147-158, 1990b.
- VAN ARSDEL,W.B., COPLEY,M.J. & MORGAN,A.I. **Food Dehydration, Second Edition,v.2**, The AVI Publishing Company, Inc., Westport, USA, 1973.
- VAN DEN BERG,C. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the G.A.B. model of sorption. In **Engineering and Food, v.1: Engineering Sciences in the Food Industry**, B.M. McKenna (Ed.). Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, 1984.
- VAN DEN BERG,C. & BRUIN,S. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In: **Water activity: Influences on Food Quality**. Ed. L.B. Rockland and G.F. Stewart, Academic Press, 1981.
- VÁZQUEZ,G., CHENLO,F., MOREIRA,R & CRUZ,E. Grape drying in a pilot plant with a heat pump. In **Drying Technology**, **15(3&4)**, 899-920, 1997.

- WANG,N. & BRENNAN,J.G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 24: 61-76, 1995.
- YOUNG,J.F. Humidity control in the laboratory using salt solutions: A review. **Journal of Applied Chemistry**, v.17: n.9, p.241-245, 1967.
- YUSHENY,Z. & POULSEN,K.P. Diffusion in potato drying. **Journal of Food Engineering**, 7: 249-262, 1988.
- ZHANG,X.; LIU,X.; GU,D.; ZHOU,W.; WANG,R. & LIU,P. Desorption isotherms of some vegetables. **Journal of the Science and Food Agriculture**, 70: 303-306, 1996.
- 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.

APÊNDICE A

ISOTERMAS DE SORÇÃO DA CASCA E DA POLPA DA UVA ITÁLIA (Pré-Tratamento químico: 0,5% NaOH e 1,5% Oleato de Etila)

Tabela A.1: Teor de umidade de equilíbrio da casca de uvas var. Itália, em base seca (X, b.s.) e seus respectivos valores de atividade de água (a_w) a diferentes temperaturas.

Solução	T = 35°C		T = 40°C		T = 50°C		T = 60°C		T = 70°C		T = 75°C	
Salina	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)
NaOH	0,068	0,0150	0,066	0,0099	0,059	0,0076	0,045	0,0070	0,020	0,0067	0,003	0,0062
LiCl	0,111	0,0300	0,111	0,0290	0,110	0,0220	0,110	0,0120	0,110	0,0110	0,111	0,0100
KC ₂ H ₃ O ₂	0,216	*	0,206	*	0,189	*	0,175	*	0,162	0,0200	0,156	0,0150
MgCl ₂	0,321	0,0690	0,319	0,0650	0,314	0,0580	0,307	0,0468	0,294	0,0380	0,286	0,0300
K ₂ CO ₃	0,432	0,0980	0,432	0,0806	0,432	0,0764	0,432	0,0740	0,432	0,0715	0,432	0,0699
MgNO ₃	0,516	0,1148	0,506	0,1125	0,489	0,1067	0,473	0,1034	0,458	0,0999	0,451	0,0901
NaNO ₂	0,625	0,1832	0,615	0,1796	0,599	0,1702	0,590	0,1649	0,587	0,1594	0,585	0,1557
NaCl	0,755	*	0,753	0,3731	0,746	0,3537	0,740	0,3426	0,739	*	0,739	*
KCl	0,827	0,6160	0,820	0,5963	0,809	0,5721	0,800	0,5609	0,795	0,5422	0,793	0,5244
BaCl ₂	0,897	*	0,893	*	0,884	*	0,876	*	0,870	*	0,867	*
CuSO ₄	0,966	*	0,961	*	0,949	*	0,936	*	0,925	*	0,920	*

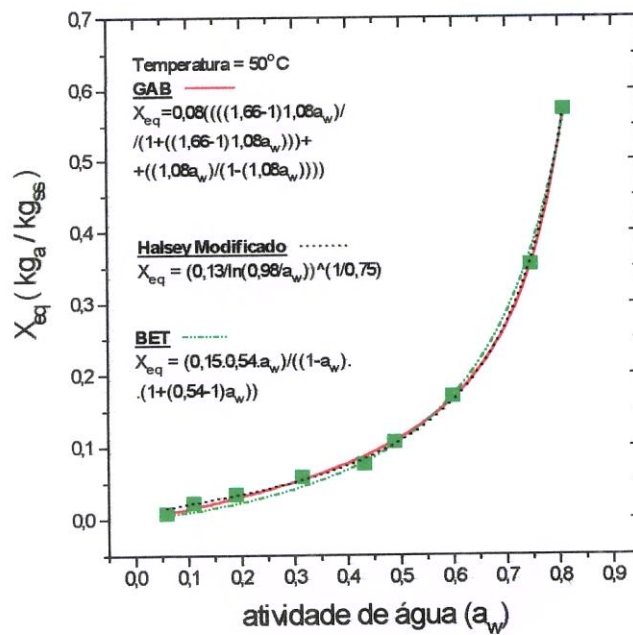
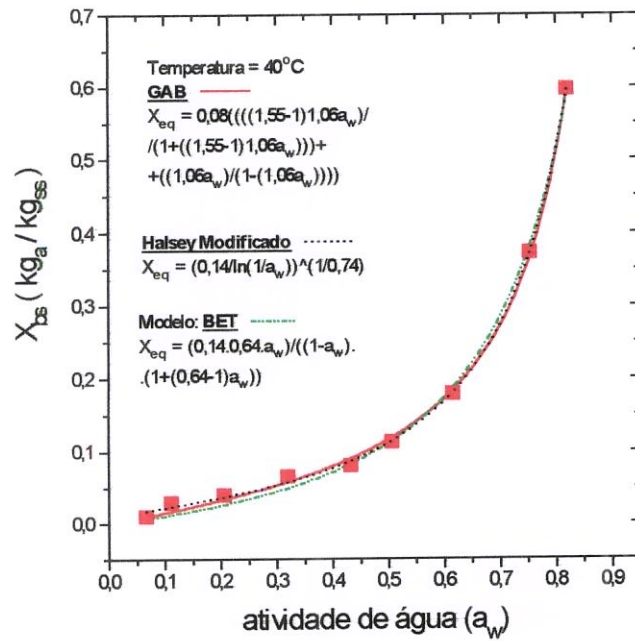
* amostras deterioradas

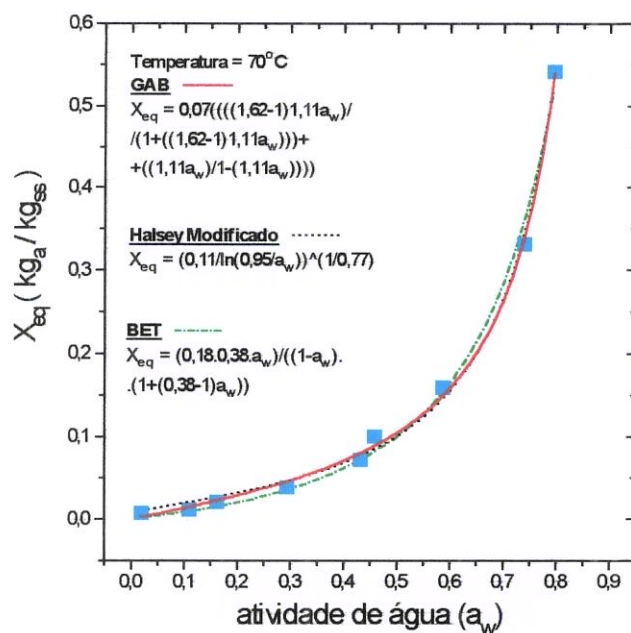
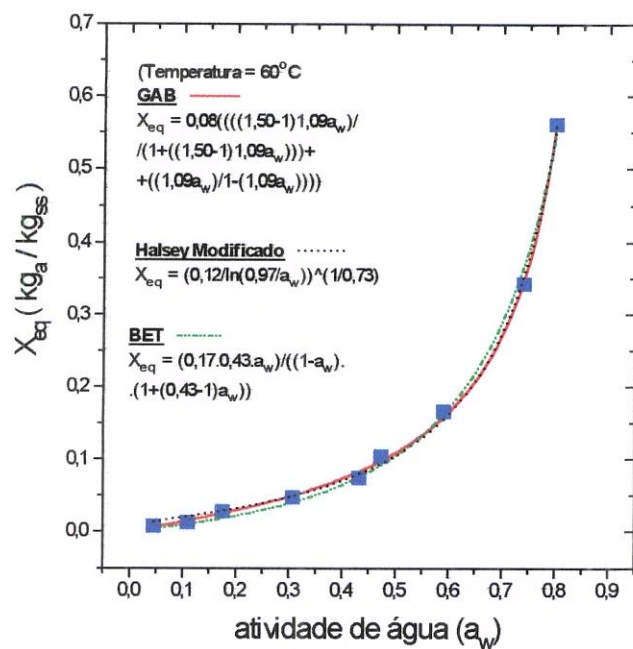
Tabela A.2: Teor de umidade de equilíbrio da polpa de uvas var. Itália, em base seca (X, b.s.) e seus respectivos valores de atividade de água (a_w) a diferentes temperaturas.

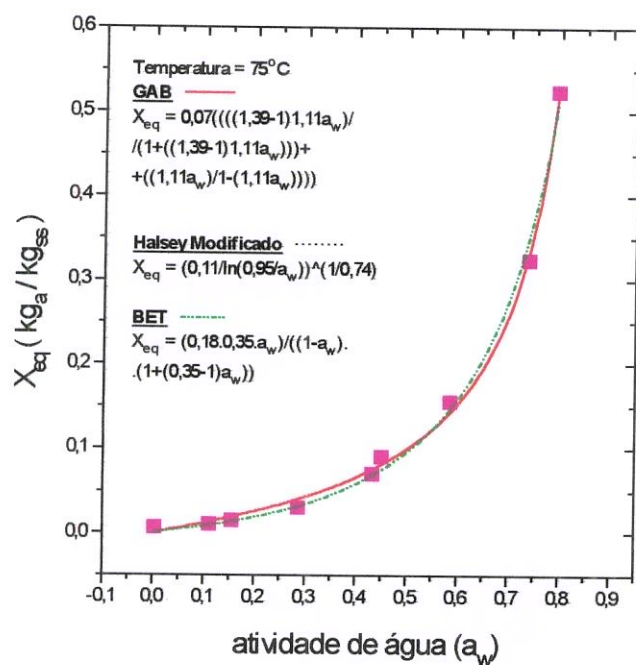
Solução	T = 35°C			T = 40°C			T = 50°C			T = 60°C			T = 70°C			T = 75°C		
Salina	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)	a_w	X(b.s.)
NaOH	0,068	0,0197	0,066	0,0126	0,059	0,0090	0,045	0,0077	0,020	0,0069	0,003	0,0059	0,020	0,0069	0,003	0,0059	0,020	0,0069
LiCl	0,111	0,0395	0,111	0,0369	0,110	0,0262	0,110	*	0,110	*	0,111	0,0096	0,110	*	0,111	0,0096	0,111	0,0096
KC ₂ H ₃ O ₂	0,216	*	0,206	*	0,189	*	0,175	0,0298	0,162	0,0269	0,156	0,0144	0,162	0,0269	0,156	0,0144	0,162	0,0269
MgCl ₂	0,321	0,0909	0,319	0,0828	0,314	0,0689	0,307	0,0517	0,294	*	0,286	0,0288	0,294	*	0,286	0,0288	0,294	*
K ₂ CO ₃	0,432	*	0,432	0,1026	0,432	0,0908	0,432	0,0816	0,432	0,0736	0,432	0,0672	0,432	0,0736	0,432	0,0672	0,432	0,0736
MgNO ₃	0,516	0,1513	0,506	0,1434	0,489	0,1269	0,473	0,1140	0,458	0,1029	0,451	0,0866	0,458	0,1029	0,451	0,0866	0,458	0,1029
NaNO ₂	0,625	*	0,615	0,2288	0,599	0,2025	0,590	*	0,587	0,1642	0,585	0,1498	0,587	0,1642	0,585	0,1498	0,587	0,1642
NaCl	0,755	0,5015	0,753	0,4754	0,746	0,4207	0,740	0,3779	0,739	0,3411	0,739	0,3112	0,739	0,3411	0,739	0,3112	0,739	0,3411
KCl	0,827	0,8115	0,820	0,7597	0,809	0,6805	0,800	0,6450	0,795	0,6650	0,793	0,6720	0,795	0,6650	0,793	0,6720	0,795	0,6650
BaCl ₂	0,897	*	0,893	*	0,884	*	0,876	*	0,870	*	0,867	*	0,870	*	0,867	*	0,870	*
CuSO ₄	0,966	*	0,961	*	0,949	*	0,936	*	0,924	*	0,920	*	0,924	*	0,920	*	0,924	*

* amostras deterioradas

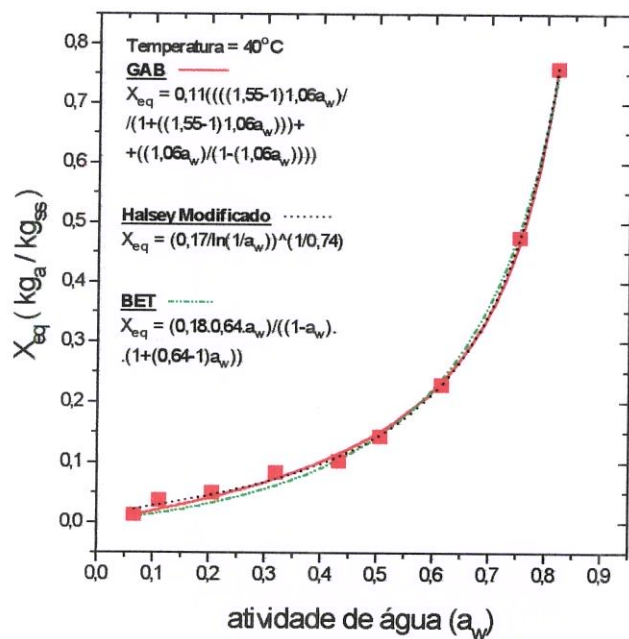
A.1. Curvas de Equilíbrio da Casca da Uva

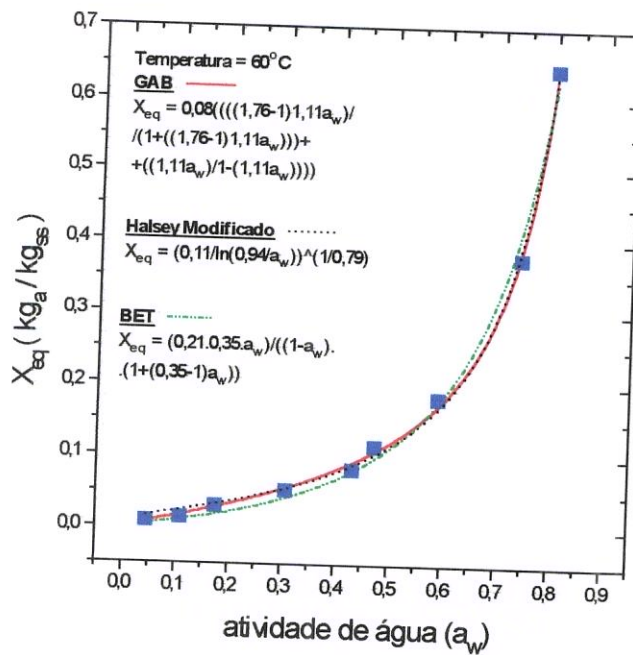
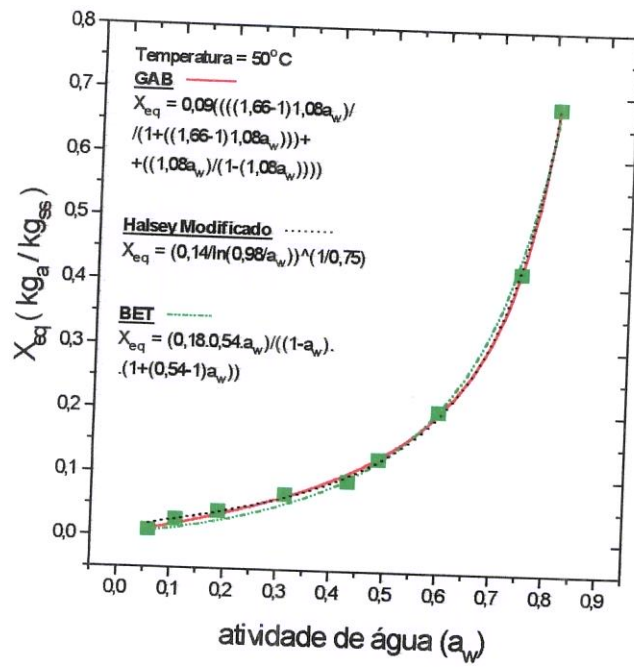






A.2. Curvas de Equilíbrio da Polpa da Uva





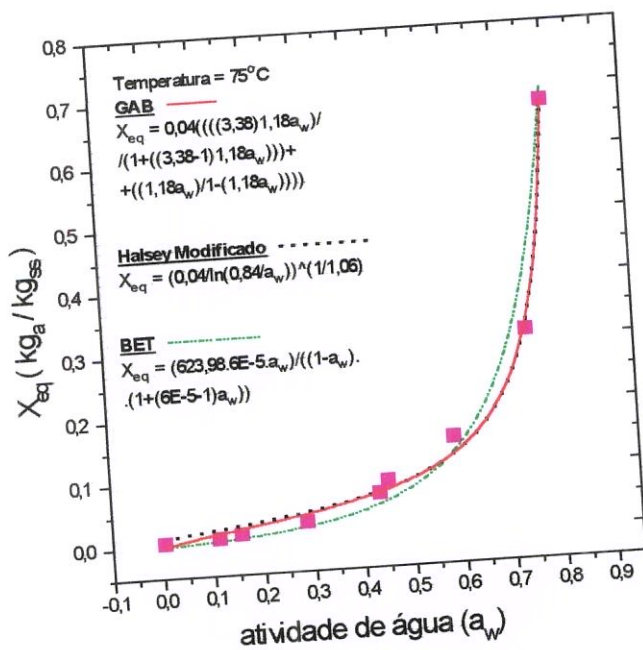
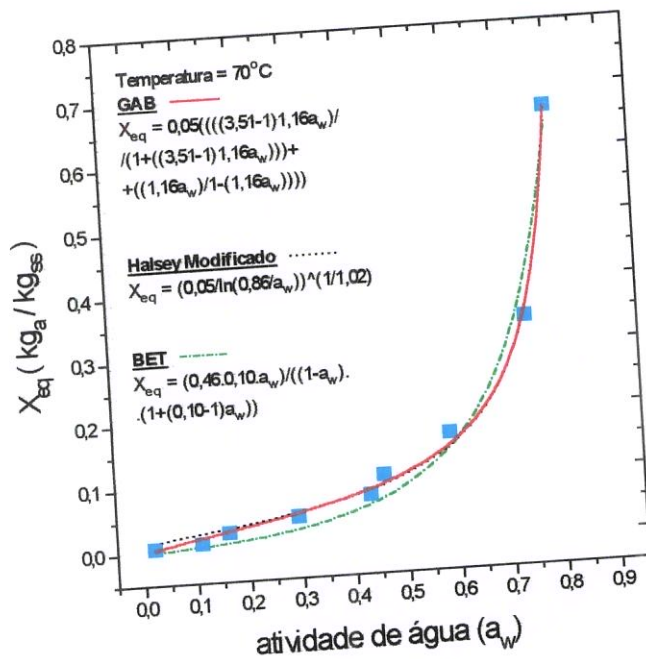


Tabela A.3: Teor de umidade de equilíbrio de adsorção e dessorção, em base seca (X , b.s.) e seus respectivos valores de a_w para a casca.

$T = 60^{\circ}\text{C}$			
Solução	a_w	$X(\text{b.s.})$	$X(\text{b.s.})$
Salina		Dessorção	Adsorção
NaOH	0,045	0,0150	0,0099
LiCl	0,110	0,0300	*
$\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$	0,175	0,0452	0,0390
MgCl_2	0,307	0,0690	0,0650
K_2CO_3	0,432	0,0980	0,0806
MgNO_3	0,473	0,1148	0,1125
NaNO_2	0,590	0,1832	0,1796
NaCl	0,740	0,3807	0,3731
KCl	0,800	0,6160	0,5963

* amostra deteriorada

Tabela A.4: Teor de umidade de equilíbrio de adsorção e dessorção, em base seca (X , b.s.) e seus respectivos valores de a_w para a polpa.

$T = 60^{\circ}\text{C}$			
Solução	a_w	$X(\text{b.s.})$	$X(\text{b.s.})$
Salina		Dessorção	Adsorção
NaOH	0,045	0,0089	0,0077
LiCl	0,110	0,0156	0,0132
$\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$	0,175	0,0179	*
MgCl_2	0,307	0,0362	0,0517
K_2CO_3	0,432	0,0473	*
MgNO_3	0,473	0,0610	0,1140
NaNO_2	0,590	0,1430	0,1819
NaCl	0,740	0,3670	0,3779
KCl	0,800	0,6210	0,6450

* amostras deterioradas

APÊNDICE B

ESTUDO DA PERMEABILIDADE DA CASCA DA UVA ITÁLIA

Tabela B.1: Condições da concentração de glucose (C_G), em vários ensaios, para o cálculo da permeabilidade da casca da uva Itália com e sem pré-tratamento químico, onde C_O = conc oleato; C_S = conc. Na_2CO_3 ; UR = umidade relativa; T = temperatura e v = velocidade.

Nº de Ensaio	C_G (p/p) Glucose	UR(%) Ar	T (°C) Ar	v (m/s) Ar	C_O (p/p) Oleato	C_S (p/p) Na_2CO_3
1	10	12	52,3	0,5	2,5	2,0
2	20	12	52,0	0,5	2,5	2,0
3	30	12	52,2	0,5	2,5	2,0
4	40	12	52,0	0,5	2,5	2,0
5	50	12	52,4	0,5	2,5	2,0
6	60	12	52,6	0,5	2,5	2,0
7	70	12	52,3	0,5	2,5	2,0
8	10	11	50,6	0,5	0	0
9	20	11	50,3	0,5	0	0
10	30	11	51,0	0,5	0	0
11	40	11	50,1	0,5	0	0
12	50	11	50,1	0,5	0	0
13	60	11	50,2	0,5	0	0
14	70	11	50,7	0,5	0	0

Tabela B.1.1: Efeito da concentração de glucose no cálculo da permeabilidade da casca da uva Itália, onde dE/dt = taxa de evaporação, L = espessura da casca, p_1 = pressão parcial da água na solução de glucose, p_2 = pressão parcial da água no ar, DH = permeabilidade e P_D = permeabilidade difusiva.

Nº de Ensaio	$\frac{dE}{dt} \times 10^7$ ($\frac{g}{s}$)	L (cm)	A (cm^2)	p_1 (atm) (Glucose)	p_2 (atm) (Ar)	$DH (10^8)$ ($\frac{g \cdot cm}{atm \cdot cm^2 \cdot s}$)	$P_D \times 10^{11}$ ($\frac{cm}{s}$)
1	31,521	0,0301	2,4467	0,13482	0,01636	32,735	32,735
2	29,990	0,0301	2,4467	0,13105	0,01612	32,101	32,101
3	23,951	0,0301	2,4467	0,13008	0,01628	25,891	25,891
4	19,900	0,0301	2,4467	0,12593	0,01612	22,294	22,294
5	16,438	0,0301	2,4467	0,12452	0,01644	18,710	18,710
6	10,600	0,0301	2,4467	0,12025	0,01659	12,580	12,580
7	9,054	0,0301	2,4467	0,11053	0,01636	11,828	11,828
8	6,777	0,0301	2,4467	0,12405	0,01350	7,541	7,541
9	5,710	0,0301	2,4467	0,12056	0,01360	6,568	6,568
10	5,262	0,0301	2,4467	0,12264	0,01410	5,410	5,410
11	4,305	0,0301	2,4467	0,11469	0,01350	5,234	5,234
12	2,829	0,0301	2,4467	0,11122	0,01350	4,310	4,310
13	2,667	0,0301	2,4467	0,10692	0,01350	3,700	3,700
14	1,956	0,0301	2,4467	0,10220	0,01390	2,725	2,725

Tabela B.2: Condições do pré-tratamento químico em vários ensaios, para o cálculo da permeabilidade da casca da uva Itália, onde C_G = conc. glucose, C_O = conc. oleato; C_S = conc. Na_2CO_3 ; UR = umidade relativa; T = temperatura e v = velocidade.

Nº de Ensaio	C_G (p/p) Glucose	UR(%) Ar	T (°C) Ar	v (m/s) Ar	C_O (p/p) Oleato	C_S (p/p) Na_2CO_3
15	10	12	52,1	0,5	0	2,0
16	10	12	51,0	0,5	0,5	2,0
17	10	12	51,2	0,5	1,0	2,0
18	10	12	52,7	0,5	1,5	2,0
19	10	12	52,1	0,5	2,0	2,0
20	10	12	52,3	0,5	2,5	2,0
21	10	12	52,1	0,5	3,0	2,0

Tabela B.2.1: Efeito do pré-tratamento químico no cálculo da permeabilidade da casca da uva Itália, onde dE/dt = taxa de evaporação, L = espessura da casca, p_1 = pressão parcial da água na solução de glucose, p_2 = pressão parcial da água no ar, DH = permeabilidade e P_D = permeabilidade difusiva.

Nº de Ensaio	$\frac{dE}{dt} \times 10^7$ ($\frac{g}{s}$)	L (cm)	A (cm^2)	p_1 (atm) (Glucose)	p_2 (atm) (Ar)	DH (10^6) ($\frac{g \text{ cm}}{\text{atm cm}^2 \text{ s}}$)	$P_D \times 10^{11}$ ($\frac{\text{cm}}{\text{s}}$)
15	14,965	0,0301	2,4467	0,13351	0,01620	15,694	15,694
16	18,276	0,0301	2,4467	0,12649	0,01535	20,230	20,230
17	21,587	0,0301	2,4467	0,12779	0,01551	23,651	23,651
18	24,898	0,0301	2,4467	0,13749	0,01668	25,355	25,355
19	28,209	0,0301	2,4467	0,13351	0,01620	29,582	29,582
20	31,521	0,0301	2,4467	0,13482	0,01636	32,735	32,735
21	34,832	0,0301	2,4467	0,13351	0,01620	36,528	36,528

Tabela B.3: Condições de temperatura do ar em vários ensaios, para o cálculo da permeabilidade da casca da uva Itália com e sem pré-tratamento químico, onde C_G = conc. glucose; C_O = conc oleato; C_S = conc. Na_2CO_3 ; UR = umidade relativa; T = temperatura e v = velocidade.

Nº de Ensaio	C_G (p/p) Glucose	UR(%) Ar	T (°C) Ar	v (m/s) Ar	C_O (p/p) Oleato	C_S (p/p) Na_2CO_3
22	30,0	12	30,1	0,5	2,0	2,0
23	30,0	12	35,3	0,5	2,0	2,0
24	30,0	12	40,4	0,5	2,0	2,0
25	30,0	12	45,2	0,5	2,0	2,0
26	30,0	12	52,0	0,5	2,0	2,0
27	10,0	11	30,1	0,5	0	0
28	10,0	11	35,3	0,5	0	0
29	10,0	11	40,0	0,5	0	0
30	10,0	11	45,5	0,5	0	0
31	10,0	11	50,6	0,5	0	0

Tabela B.3.1: Efeito da temperatura do ar no cálculo da permeabilidade da casca da uva Itália, com e sem pré-tratamento químico, onde dE/dt = taxa de evaporação, L = espessura da casca, p_1 = pressão parcial da água na solução de glucose, p_2 = pressão parcial da água no ar, DH = permeabilidade e P_D = permeabilidade difusiva.

Nº de Ensaio	$\frac{dE}{dt} \times 10^7$ $\left(\frac{g}{s}\right)$	L (cm)	A (cm ²)	p_1 (atm) (Glucose)	p_2 (atm) (Ar)	$DH (10^8)$ $\left(\frac{g \text{ cm}}{\text{atm cm}^2 \text{ s}}\right)$	$P_D \times 10^{11}$ $\left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)$
22	1,959	0,0301	2,4467	0,03829	0,00505	7,253	7,253
23	2,985	0,0301	2,4467	0,05129	0,00677	8,249	8,249
24	5,118	0,0301	2,4467	0,06760	0,00892	10,730	10,730
25	8,075	0,0301	2,4467	0,08687	0,01147	13,175	13,175
26	13,250	0,0301	2,4467	0,12212	0,01612	15,378	15,378
27	1,012	0,0301	2,4467	0,04165	0,00460	3,360	3,360
28	1,541	0,0301	2,4467	0,05580	0,00620	3,822	3,822
29	2,586	0,0301	2,4467	0,07199	0,00800	4,971	4,971
30	4,230	0,0301	2,4467	0,09596	0,01070	6,104	6,104
31	6,402	0,0301	2,4467	0,12405	0,01350	7,124	7,124

Tabela B.4: Condições da espessura em vários ensaios, para o cálculo da permeabilidade da casca da uva Itália com e sem pré-tratamento químico, onde C_G = conc. glucose; C_O = conc oleato; C_S = conc. Na_2CO_3 ; UR = umidade relativa; T = temperatura e v = velocidade.

Nº de Ensaio	C_G (p/p) Glucose	UR(%) Ar	T (°C) Ar	v (m/s) Ar	C_O (p/p) Oleato	C_S (p/p) Na_2CO_3
32	50,0	12	52,2	0,5	10,0	6,0
33	50,0	12	52,5	0,5	10,0	6,0
34	50,0	12	52,2	0,5	10,0	6,0
35	50,0	12	52,1	0,5	10,0	6,0
36	50,0	12	52,0	0,5	0,0	0,0
37	50,0	12	52,1	0,5	0,0	0,0
38	50,0	12	52,0	0,5	0,0	0,0
39	50,0	12	52,0	0,5	0,0	0,0

Tabela B.4.1: Efeito da espessura no cálculo da permeabilidade da casca da uva Itália, com e sem pré-tratamento químico, onde dE/dt = taxa de evaporação, L = espessura da casca, p_1 = pressão parcial da água na solução de glucose, p_2 = pressão parcial da água no ar, DH = permeabilidade e P_D = permeabilidade difusiva.

Nº de Ensaio	$\frac{dE}{dt} \times 10^7$ $\left(\frac{lg}{s}\right)$	L (cm)	A (cm ²)	p_1 (atm) (Glucose)	p_2 (atm) (Ar)	DH (10 ⁸) $\left(\frac{g\ cm}{atm\ cm^2\ s}\right)$	$P_D \times 10^{11}$ $\left(\frac{cm}{s}\right)$
32	31,442	Itália 0,0301	2,4467	0,12333	0,01628	36,135	36,135
33	31,001	Rubi 0,0312	2,4467	0,12512	0,01652	36,399	36,399
34	23,046	Red Glob 0,0407	2,4467	0,12333	0,01628	35,813	35,813
35	8,620	Thomp -son 0,0430	0,96	0,12272	0,0162	36,245	36,245
36	4,305	Itália 0,0301	2,4467	0,12212	0,01612	4,997	4,997
37	3,532	Rubi 0,0312	2,4467	0,12272	0,0162	4,228	4,228
38	1,516	Red Glob 0,0407	2,4467	0,12212	0,01612	2,378	2,378
39	0,540	Thomp -son 0,0430	0,96	0,12212	0,01612	2,282	2,282

Tabela B.4.2: Condições da espessura em vários ensaios, para o cálculo da permeabilidade da casca da uva Itália com e sem pré-tratamento químico, onde C_G = conc. glucose; C_O = conc oleato; C_S = conc. Na_2CO_3 ; UR = umidade relativa; T = temperatura e v = velocidade.

Nº de Ensaio	C_G (p/p) Glucose	UR(%) Ar	T (°C) Ar	v (m/s) Ar	C_O (p/p) Oleato	C_S (p/p) Na_2CO_3
40	10,0	11	52,2	0,5	10,0	6,0
41	10,0	11	52,5	0,5	10,0	6,0
42	10,0	11	52,2	0,5	10,0	6,0
43	10,0	11	52,1	0,5	10,0	6,0
44	10,0	11	52,0	0,5	0,0	0,0
45	10,0	11	52,1	0,5	0,0	0,0
46	10,0	11	52,0	0,5	0,0	0,0
47	10,0	11	52,0	0,5	0,0	0,0

Tabela B.4.3: Efeito da espessura no cálculo da permeabilidade da casca da uva Itália, com e sem pré-tratamento químico, onde dE/dt = taxa de evaporação, L = espessura da casca, p_1 = pressão parcial da água na solução de glucose, p_2 = pressão parcial da água no ar, DH = permeabilidade e P_D = permeabilidade difusiva.

Nº de Ensaio	$\frac{dE}{dt} \times 10^7$ ($\frac{g}{s}$)	L (cm)	A (cm ²)	p_1 (atm) (Glucose)	p_2 (atm) (Ar)	DH (10 ⁸) $\left(\frac{g \text{ cm}}{\text{atm cm}^2 \text{ s}}\right)$	$P_D \times 10^{11}$ $\left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)$
40	38,594	Itália 0,0301	2,4467	0,12649	0,01407	42,234	42,234
41	38,499	Rubi 0,0312	2,4467	0,12779	0,01421	41,700	41,700
42	38,656	Red Glob 0,0407	2,4467	0,12779	0,01421	41,870	41,870
43	15,679	Thomp -son 0,0430	0,96	0,12896	0,01434	42,890	42,890
44	6,762	Itália 0,0301	2,4467	0,12649	0,01407	7,399	7,399
45	6,343	Rubi 0,0312	2,4467	0,12779	0,01421	6,870	6,870
46	3,989	Red Glob 0,0407	2,4467	0,12779	0,01421	4,321	4,321
47	1,235	Thomp -son 0,0430	0,96	0,12896	0,01434	3,379	3,379

APÊNDICE C

ESTUDO DO COEFICIENTE DE ENCOLHIMENTO (β) E DA DENSIDADE APARENTE (ρ_b) DA UVA ITÁLIA

Tabela C.1: Valores experimentais obtidos para o cálculo do encolhimento de secagem de uva Itália a 50°C, com pré-tratamento químico de $\text{CaCO}_3 = 2,0\%(p/v)$ e $\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2 = 0,0\%(v/v)$, onde U = umidade em base úmida; X = umidade em base seca; V_s , V_w e V_a são os volumes do sólido, da água e dos poros de ar; v/v_f = adimensional de volume específico e m_s e m_w = massa do sólido e da água.

U (b.u.) kg _a /kg _{su}	X (b.s.) kg _a /kg _{ss}	$V_s+V_w+V_a$ ml	$\frac{v}{v_f}$	m_s+m_w g	ρ_b g/cm ³
0,810	4,263	7,691	6,579	9,471	1,231
0,771	3,366	6,319	5,406	7,858	1,243
0,724	2,623	5,182	4,433	6,520	1,258
0,691	2,236	4,590	3,926	5,824	1,268
0,645	1,816	3,948	3,378	5,069	1,283
0,614	1,590	3,602	3,082	4,662	1,294
0,576	1,358	3,247	2,778	4,244	1,306
0,562	1,283	3,132	2,679	4,108	1,311
0,519	1,079	2,820	2,412	3,741	1,326
0,462	0,858	2,483	2,124	3,345	1,347
0,347	0,531	1,982	1,695	2,755	1,390
0,317	0,464	1,879	1,607	2,634	1,401
0,285	0,398	1,779	1,522	2,516	1,414
0,234	0,305	1,636	1,400	2,349	1,435
0,146	0,170	1,431	1,224	2,107	1,472
0,120	0,136	1,378	1,178	2,045	1,483
0,102	0,113	1,343	1,149	2,004	1,491
0,000	0,000	1,169 ^a		1,799 ^b	1,539 ^c

^a Valor extrapolado da regressão linear de V versus $0,113 < x < 4,263$.

^b Valor determinado em estufa à vácuo por 48 horas na temperatura de 60 °C

^c Valor obtido com m (final) determinada na estufa e V (final) extrapolado

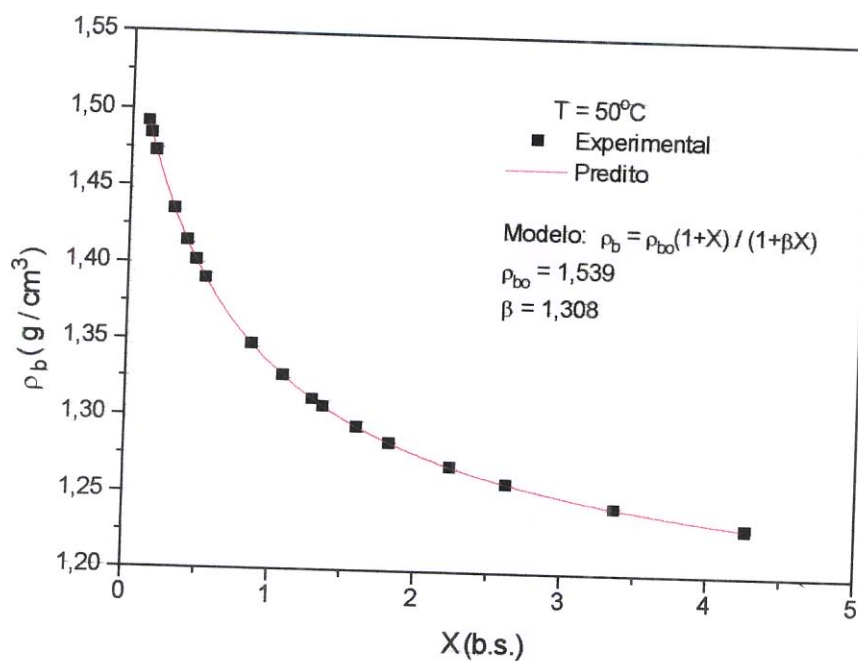


Figura C.1: Comparação entre os valores da densidade aparente da uva Itália experimental e predito pela Eq.(2.30) a 50°C.

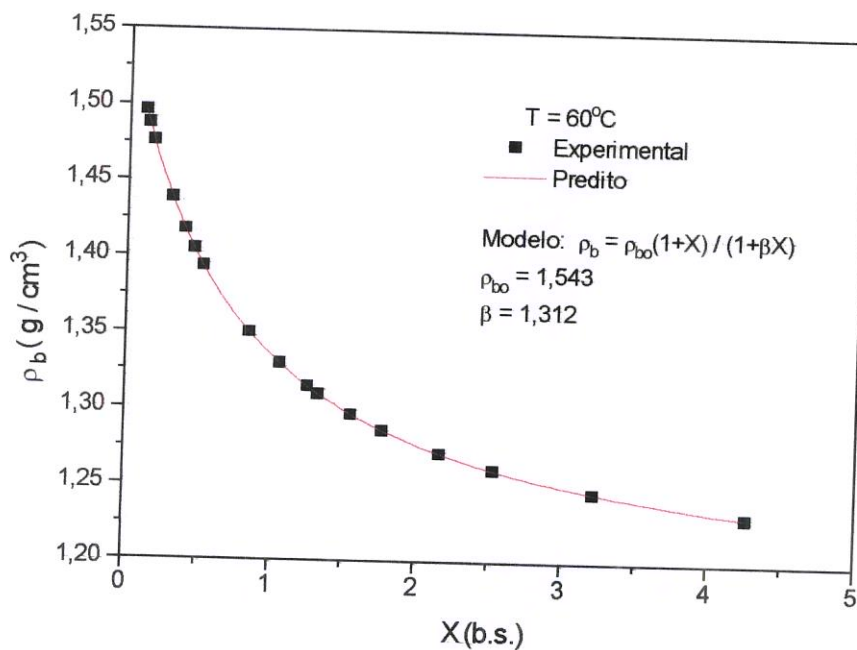


Figura C.2: Comparação entre os valores da densidade aparente da uva Itália experimental e predito pela Eq.(2.30) a 60°C.

Tabela C.2: Valores experimentais obtidos para o cálculo do encolhimento de secagem de uva Itália a 60°C, com pré-tratamento químico de $\text{CaCO}_3 = 2,0\%(p/v)$ e $\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2 = 0,0\%(v/v)$, onde U = umidade em base úmida; X = umidade em base seca; V_s , V_w e V_a são os volumes do sólido, da água e dos poros de ar; v/v_f = adimensional de volume específico e m_s e m_w = massa do sólido e da água.

U (b.u.) $\text{kg}_a/\text{kg}_{su}$	X (b.s.) $\text{kg}_a/\text{kg}_{ss}$	$V_s+V_w+V_a$ ml	$\frac{v}{v_f}$	m_s+m_w g	ρ_b g/cm^3
0,810	4,263	7,691	6,596	9,472	1,231
0,763	3,219	6,093	5,225	7,593	1,246
0,717	2,533	5,043	4,325	6,358	1,260
0,684	2,164	4,478	3,841	5,694	1,271
0,639	1,770	3,875	3,323	4,985	1,286
0,608	1,551	3,540	3,036	4,591	1,296
0,570	1,325	3,194	2,739	4,184	1,309
0,556	1,252	3,082	2,643	4,053	1,314
0,514	1,058	2,785	2,389	3,703	1,329
0,458	0,845	2,459	2,109	3,320	1,349
0,344	0,524	1,968	1,688	2,742	1,393
0,314	0,458	1,867	1,601	2,624	1,405
0,282	0,393	1,768	1,516	2,507	1,417
0,232	0,302	1,628	1,396	2,343	1,438
0,145	0,170	1,426	1,223	2,105	1,475
0,119	0,135	1,373	1,177	2,042	1,487
0,101	0,112	1,338	1,147	2,001	1,495
0,000	0,000	1,166 ^a		1,799 ^b	1,543 ^c

^a Valor extrapolado da regressão linear de V versus $0,112 < x < 4,263$.

^b Valor determinado em estufa à vácuo por 48 horas na temperatura de 60 °C

^c Valor obtido com m (final) determinada na estufa e V (final) extrapolado

Tabela C.3: Valores experimentais obtidos para o cálculo do encolhimento de secagem de uva Itália a 70°C, com pré-tratamento químico de $\text{CaCO}_3 = 2,0\%(p/v)$ e $\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2 = 0,0\%(v/v)$, onde U = umidade em base úmida; X = umidade em base seca; V_s , V_w e V_a são os volumes do sólido, da água e dos poros de ar; v/v_f = adimensional de volume específico e m_s e m_w = massa do sólido e da água.

U (b.u.) kg _a /kg _{su}	X (b.s.) kg _a /kg _{ss}	$V_s+V_w+V_a$ ml	$\frac{v}{v_f}$	m_s+m_w g	ρ_b g/cm ³
0,810	4,263	7,690	6,647	9,472	1,231
0,756	3,098	5,905	5,103	7,375	1,248
0,710	2,448	4,909	4,242	6,205	1,264
0,678	2,105	4,383	3,788	5,588	1,274
0,633	1,725	3,800	3,285	4,904	1,290
0,602	1,512	3,474	3,002	4,521	1,301
0,565	1,299	3,147	2,720	4,137	1,314
0,551	1,227	3,037	2,625	4,008	1,319
0,509	1,037	2,746	2,373	3,666	1,334
0,454	0,831	2,430	2,100	3,295	1,355
0,341	0,517	1,949	1,684	2,730	1,400
0,311	0,451	1,848	1,597	2,611	1,413
0,280	0,389	1,753	1,515	2,499	1,426
0,230	0,299	1,615	1,395	2,337	1,447
0,144	0,168	1,414	1,222	2,102	1,486
0,118	0,134	1,362	1,177	2,040	1,498
0,100	0,111	1,326	1,146	1,999	1,506
0,000	0,000	1,157 ^a		1,799 ^b	1,555 ^c

^a Valor extrapolado da regressão linear de V versus $0,111 < x < 4,263$.

^b Valor determinado em estufa à vácuo por 48 horas na temperatura de 60 °C

^c Valor obtido com m (final) determinada na estufa e V (final) extrapolado

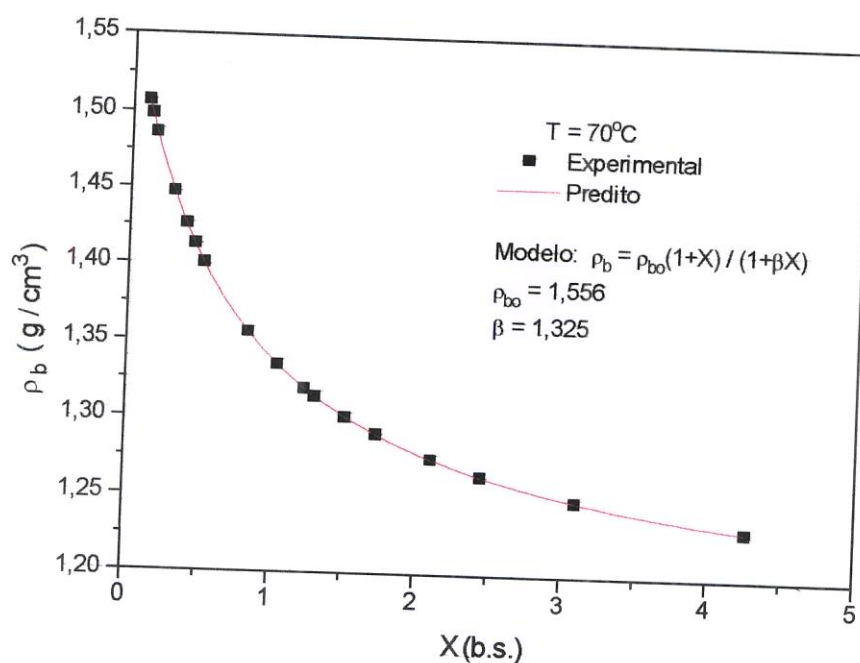


Figura C.3: Comparação entre os valores da densidade aparente da uva Itália experimental e predito pela Eq.(2.30) a 70°C.

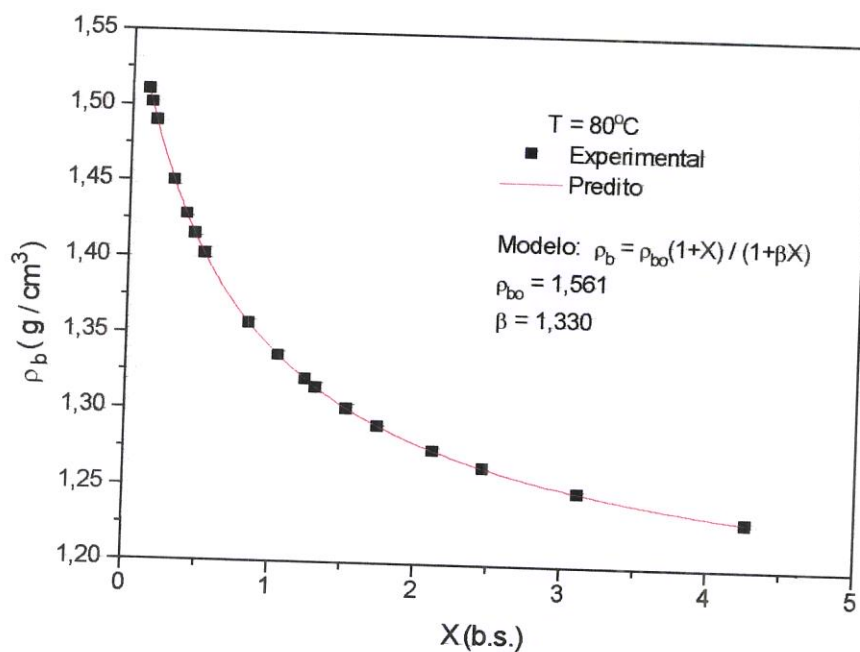


Figura C.4: Comparação entre os valores da densidade aparente da uva Itália experimental e predito pela Eq.(2.30) a 80°C.

Tabela C.4: Valores experimentais obtidos para o cálculo do encolhimento de secagem de uva Itália a 80°C, com pré-tratamento químico de $\text{CaCO}_3 = 2,0\%(p/v)$ e $\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2 = 0,0\%(v/v)$, onde U = umidade em base úmida; X = umidade em base seca; V_s , V_w e V_a são os volumes do sólido, da água e dos poros de ar; v/v_f = adimensional de volume específico e m_s e m_w = massa do sólido e da água.

U (b.u.) $\text{kg}_a/\text{kg}_{su}$	X (b.s.) $\text{kg}_a/\text{kg}_{ss}$	$V_s+V_w+V_a$ ml	$\frac{v}{v_f}$	m_s+m_w g	ρ_b g/cm^3
0,810	4,263	7,691	6,670	9,472	1,231
0,757	3,115	5,930	5,143	7,405	1,248
0,711	2,460	4,926	4,272	6,227	1,264
0,679	2,115	4,396	3,813	5,606	1,275
0,634	1,732	3,809	3,304	4,916	1,290
0,603	1,519	3,482	3,020	4,533	1,301
0,566	1,304	3,153	2,734	4,146	1,315
0,552	1,232	3,042	2,638	4,017	1,320
0,510	1,041	2,749	2,384	3,673	1,335
0,455	0,835	2,433	2,110	3,302	1,356
0,342	0,520	1,950	1,691	2,735	1,402
0,312	0,453	1,847	1,602	2,615	1,415
0,281	0,391	1,752	1,520	2,503	1,428
0,231	0,300	1,613	1,399	2,339	1,450
0,145	0,169	1,412	1,224	2,103	1,489
0,119	0,135	1,360	1,179	2,042	1,501
0,101	0,112	1,324	1,149	2,001	1,510
0,000	0,000	1,153 ^a		1,799 ^b	1,560 ^c

^a Valor extrapolado da regressão linear de V versus $0,112 < x < 4,263$.

^b Valor determinado em estufa à vácuo por 48 horas na temperatura de 60 °C

^c Valor obtido com m (final) determinada na estufa e V (final) extrapolado

Tabela C.5: Valores experimentais obtidos para o cálculo do encolhimento de secagem de uva Itália a 60°C, com pré-tratamento químico de $\text{CaCO}_3 = 2,0\%(p/v)$ e $\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2 = 1,0\%(v/v)$, onde U = umidade em base úmida; X = umidade em base seca; V_s , V_w e V_a são os volumes do sólido, da água e dos poros de ar; v/v_f = adimensional de volume específico e m_s e m_w = massa do sólido e da água.

U (b.u.) kg _a /kg _{su}	X (b.s.) kg _a /kg _{ss}	$V_s+V_w+V_a$ ml	$\frac{v}{v_f}$	m_s+m_w g	ρ_b g/cm ³
0,810	4,263	7,691	6,584	9,472	1,231
0,755	3,082	5,884	5,037	7,346	1,248
0,709	2,436	4,895	4,191	6,184	1,263
0,677	2,096	4,375	3,745	5,572	1,273
0,633	1,725	3,807	3,259	4,904	1,288
0,601	1,506	3,472	2,973	4,510	1,298
0,565	1,299	3,155	2,701	4,137	1,311
0,551	1,227	3,045	2,607	4,008	1,316
0,509	1,037	2,754	2,358	3,666	1,330
0,454	0,831	2,439	2,088	3,295	1,350
0,342	0,520	1,963	1,681	2,735	1,393
0,312	0,453	1,861	1,593	2,615	1,405
0,281	0,391	1,766	1,512	2,503	1,417
0,232	0,302	1,630	1,395	2,343	1,437
0,145	0,169	1,426	1,221	2,103	1,474
0,120	0,136	1,376	1,178	2,044	1,485
0,102	0,114	1,342	1,149	2,004	1,493
0,000	0,000	1,168 ^a		1,799 ^b	1,540 ^c

^a Valor extrapolado da regressão linear de V versus $0,114 < x < 4,263$.

^b Valor determinado em estufa à vácuo por 48 horas na temperatura de 60 °C

^c Valor obtido com m (final) determinada na estufa e V (final) extrapolado

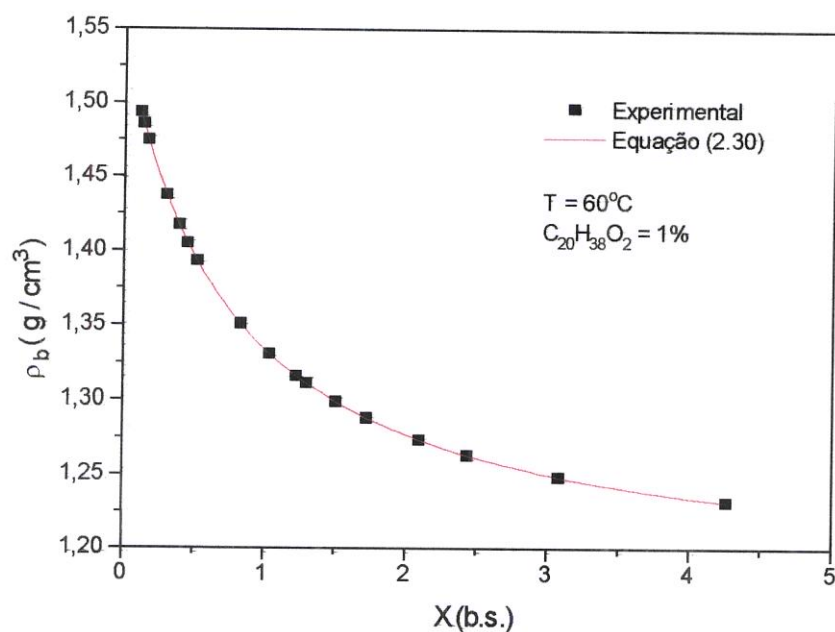


Figura C.5: Comparação entre os valores da densidade aparente da uva Itália experimental e predito pela Eq.(2.30) a 60°C, acrescentando-se 1% de oleato ao pré-tratamento químico.

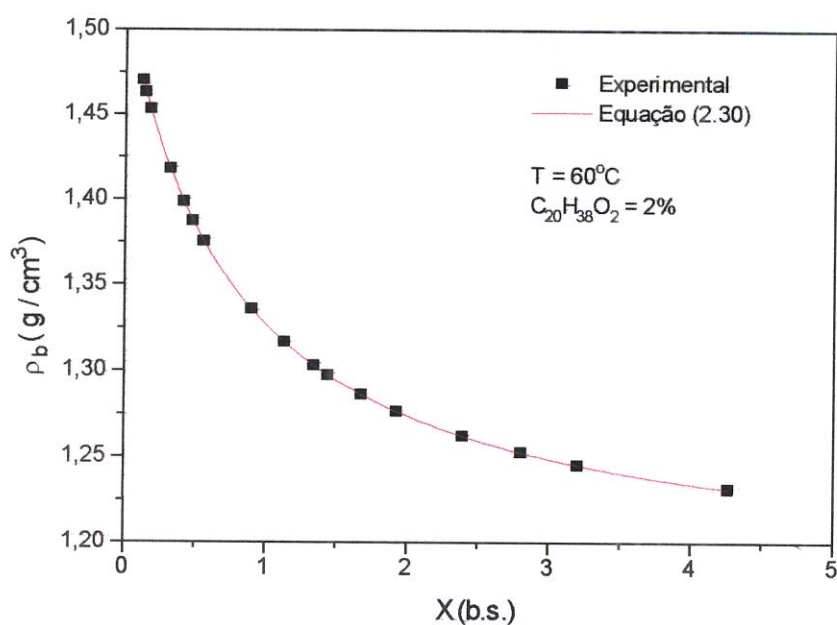


Figura C.6: Comparação entre os valores da densidade aparente da uva Itália experimental e predito pela Eq.(2.30) a 60°C, acrescentando-se 2% de oleato ao pré-tratamento químico.

Tabela C.6: Valores experimentais obtidos para o cálculo do encolhimento de secagem de uva Itália a 60°C, com pré-tratamento químico de $\text{CaCO}_3 = 2,0\%(p/v)$ e $\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2 = 2,0\%(v/v)$, onde U = umidade em base úmida; X = umidade em base seca; V_s , V_w e V_a são os volumes do sólido, da água e dos poros de ar; v/v_f = adimensional de volume específico e m_s e m_w = massa do sólido e da água.

U (b.u.) kg _a /kg _{su}	X (b.s.) kg _a /kg _{ss}	$V_s+V_w+V_a$ ml	$\frac{v}{v_f}$	m_s+m_w	ρ_b g/cm ³
0,810	4,263	7,691	6,480	9,472	1,231
0,762	3,202	6,073	5,116	7,563	1,245
0,737	2,802	5,462	4,602	6,843	1,252
0,705	2,390	4,834	4,072	6,101	1,262
0,658	1,924	4,123	3,473	5,262	1,276
0,626	1,674	3,741	3,152	4,812	1,286
0,590	1,439	3,383	2,850	4,389	1,297
0,573	1,342	3,235	2,725	4,215	1,303
0,531	1,132	2,914	2,455	3,837	1,316
0,473	0,897	2,556	2,153	3,414	1,335
0,358	0,558	2,038	1,717	2,804	1,375
0,325	0,481	1,921	1,618	2,665	1,387
0,294	0,416	1,822	1,535	2,548	1,398
0,243	0,321	1,677	1,412	2,377	1,417
0,152	0,179	1,460	1,230	2,122	1,452
0,127	0,145	1,408	1,186	2,060	1,463
0,109	0,122	1,373	1,157	2,019	1,470
0,000	0,000	1,187 ^a		1,799 ^b	1,515 ^c

^a Valor extrapolado da regressão linear de V versus $0,122 < x < 4,263$.

^b Valor determinado em estufa à vácuo por 48 horas na temperatura de 60°C

^c Valor obtido com m (final) determinada na estufa e V (final) extrapolado

Tabela C.7: Valores experimentais obtidos para o cálculo do encolhimento de secagem de uva Itália a 60°C, com pré-tratamento químico de $\text{CaCO}_3 = 2,0\%(p/v)$ e $\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2 = 3,0\%(v/v)$, onde U = umidade em base úmida; X = umidade em base seca; V_s , V_w e V_a são os volumes do sólido, da água e dos poros de ar; v/v_f = adimensional de volume específico e m_s e m_w = massa do sólido e da água.

U (b.u.) $\text{kg}_a/\text{kg}_{su}$	X (b.s.) $\text{kg}_a/\text{kg}_{ss}$	$V_s+V_w+V_a$ ml	$\frac{v}{v_f}$	m_s+m_w g	ρ_b g/cm^3
0,810	4,263	7,692	6,383	9,473	1,231
0,761	3,184	6,050	5,021	7,531	1,244
0,721	2,584	5,137	4,263	6,451	1,255
0,688	2,205	4,560	3,784	5,768	1,264
0,640	1,778	3,910	3,245	5,000	1,278
0,614	1,591	3,626	3,009	4,663	1,286
0,596	1,475	3,449	2,862	4,454	1,291
0,553	1,237	3,087	2,562	4,026	1,304
0,499	0,996	2,720	2,257	3,592	1,320
0,448	0,812	2,440	2,025	3,261	1,336
0,359	0,560	2,057	1,707	2,807	1,364
0,318	0,466	1,914	1,588	2,638	1,378
0,292	0,412	1,831	1,520	2,541	1,387
0,231	0,300	1,661	1,378	2,339	1,408
0,163	0,195	1,501	1,246	2,150	1,432
0,129	0,148	1,430	1,186	2,066	1,444
0,111	0,125	1,395	1,157	2,024	1,451
0,000	0,000	1,205 ^a		1,799 ^b	1,494 ^c

^a Valor extrapolado da regressão linear de V versus $0,125 < x < 4,263$.

^b Valor determinado em estufa à vácuo por 48 horas na temperatura de 60°C

^c Valor obtido com m (final) determinada na estufa e V (final) extrapolado

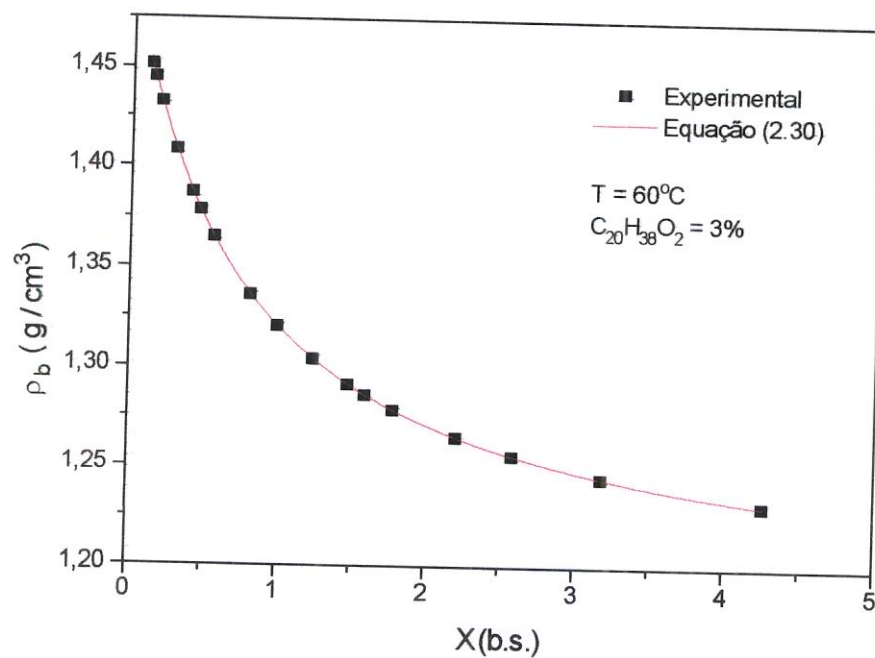


Figura C.7: Comparação entre os valores da densidade aparente da uva Itália experimental e predito pela Eq.(2.30) a 60°C , acrescentando-se 3% de oleato ao pré-tratamento químico.

APÊNDICE D

ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DA UVA ITÁLIA

Tabela D.1: Dados experimentais da cinética de secagem de uva Itália a 40°C, com umidade absoluta (y) = 0,0157 g_{va}/g_{ss}, e pré-tratamento químico de CaCO₃ = 2,0%; C₂₀H₃₈O₂ = 0,0%, onde X = umidade em base seca; U = umidade em base úmida; X/X_0 = umidade adimensional e $\bar{M}$ = umidade residual.

tempo (h)	massa (g)	X (b.s.) (kg _a /kg _{ss})	U (b.s.) (kg _a /kg _{ss})	X/X_0	$\bar{M} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$
0	822,185	4,263	0,810	1	1
5	815,551	4,220	0,808	0,990	0,989
10	803,567	4,144	0,805	0,972	0,971
15	766,142	3,904	0,796	0,915	0,914
20	729,383	3,669	0,785	0,860	0,858
25	693,756	3,441	0,774	0,807	0,803
30	659,517	3,221	0,763	0,755	0,751
35	626,802	3,012	0,750	0,706	0,701
40	595,681	2,813	0,737	0,659	0,653
45	566,179	2,624	0,724	0,615	0,608
50	538,29	2,445	0,709	0,573	0,566
55	511,99	2,277	0,694	0,534	0,525
60	487,237	2,119	0,679	0,497	0,488
65	460,121	1,945	0,660	0,456	0,446
70	442,169	1,830	0,646	0,429	0,419
75	421,736	1,699	0,629	0,398	0,387
80	422,622	1,705	0,630	0,400	0,389
85	404,76	1,591	0,614	0,373	0,361
90	398,087	1,548	0,607	0,363	0,351

Tabela D.2: Dados experimentais da cinética de secagem de uva Itália a 50°C, com umidade absoluta (y) = 0,0141 g_{va}/g_{ss}, e pré-tratamento químico de CaCO₃ = 2,0%; C₂₀H₃₈O₂ = 0,0%, onde X = umidade em base seca; U = umidade em base úmida; X/X_0 = umidade adimensional e $\bar{M}$ = umidade residual.

tempo (h)	massa (g)	X (b.s.) (kg _a /kg _{ss})	U (b.s.) (kg _a /kg _{ss})	X/X_0	$\bar{M} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$
0	845,027	4,263	0,810	1	1
5	838,938	4,225	0,808	0,991	0,991
10	798,342	3,972	0,798	0,931	0,931
15	756,736	3,713	0,787	0,871	0,870
20	705,608	3,394	0,772	0,796	0,794
25	675,686	3,208	0,762	0,752	0,750
30	637,408	2,970	0,748	0,696	0,694
35	600,992	2,743	0,732	0,643	0,640
40	566,566	2,528	0,716	0,593	0,590
45	534,185	2,327	0,699	0,545	0,542
50	503,851	2,138	0,681	0,501	0,497
55	475,541	1,961	0,662	0,460	0,456
60	449,188	1,797	0,642	0,421	0,417
65	424,724	1,645	0,621	0,385	0,381
70	381,134	1,373	0,578	0,322	0,317
75	358,825	1,234	0,552	0,289	0,284
80	340,042	1,117	0,527	0,262	0,256
85	314,699	0,960	0,489	0,225	0,219
90	314,699	0,960	0,489	0,225	0,219

Tabela D.3: Dados experimentais da cinética de secagem de uva Itália a 70°C, com umidade absoluta (y) = 0,0134 g_{va}/g_{as}, e pré-tratamento químico de CaCO₃ = 2,0%; C₂₀H₃₈O₂ = 0,0%, onde X = umidade em base seca; U = umidade em base úmida; X/X_0 = umidade adimensional e $\bar{M}$ = umidade residual.

tempo (h)	massa (g)	X (b.s.) (kg _a /kg _{ss})	U (b.s.) (kg _a /kg _{ss})	X/X_0	$\bar{M} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$
0	819,441	4,263	0,810	1	1
5	754,611	3,846	0,793	0,902	0,902
10	706,371	3,537	0,779	0,829	0,829
15	653,899	3,200	0,761	0,750	0,749
20	600,977	2,860	0,740	0,670	0,669
25	549,722	2,530	0,716	0,593	0,592
30	501,403	2,220	0,689	0,520	0,519
35	466,733	1,997	0,666	0,468	0,467
40	446,072	1,865	0,650	0,437	0,435
45	369,536	1,373	0,578	0,322	0,320
50	347,061	1,229	0,551	0,288	0,286
55	318,468	1,045	0,511	0,245	0,243
60	293,498	0,885	0,469	0,207	0,205
65	271,868	0,746	0,427	0,175	0,172
70	253,253	0,626	0,385	0,146	0,144
75	237,336	0,524	0,344	0,123	0,120
80	220,807	0,418	0,294	0,098	0,095
85	210,373	0,351	0,259	0,082	0,079
90	202,758	0,302	0,232	0,070	0,068

Tabela D.4: Dados experimentais da cinética de secagem de uva Itália a 80°C, com umidade absoluta (y) = 0,0128 g_{va}/g_{as}, e pré-tratamento químico de CaCO₃ = 2,0%; C₂₀H₃₈O₂ = 0,0%; onde X = umidade em base seca; U = umidade em base úmida; X/X_0 = umidade adimensional e $\bar{M}$ a umidade residual.

tempo (h)	massa (g)	X (b.s.) (kg _a /kg _{ss})	U (b.u.) (kg _a /kg _T)	X/X_0	$\bar{M} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$
0	830,501	4,263	0,810	1	1
5	736,363	3,666	0,785	0,860	0,859
10	683,186	3,329	0,769	0,781	0,780
15	624,038	2,954	0,747	0,693	0,692
20	587,600	2,723	0,731	0,638	0,638
25	506,800	2,211	0,688	0,518	0,518
30	453,609	1,874	0,652	0,439	0,438
35	426,430	1,702	0,629	0,399	0,398
40	363,278	1,302	0,565	0,305	0,304
45	326,553	1,069	0,516	0,250	0,249
50	298,800	0,893	0,471	0,209	0,208
55	268,786	0,703	0,412	0,165	0,163
60	246,824	0,564	0,360	0,132	0,131
65	234,500	0,486	0,327	0,114	0,112
70	214,060	0,356	0,262	0,083	0,082
75	212,600	0,347	0,257	0,081	0,080

Tabela D.5: Dados experimentais da cinética de secagem de uva Itália a 60°C, com umidade absoluta (y) = 0,0158 g_{va}/g_{as}, e pré-tratamento químico de CaCO₃ = 2,0%; C₂₀H₃₈O₂ = 0,0%, onde X = umidade em base seca; U = umidade em base úmida; X/X_0 = umidade adimensional e $\bar{M}$ = umidade residual.

tempo (h)	massa (g)	X (b.s.) (kg _a /kg _{ss})	U (b.u.) (kg _a /kg _T)	X/X_0	$\bar{M} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$
0	824,554	4,263	0,810	1	1
5	785,042	4,011	0,800	0,940	0,940
10	738,403	3,713	0,787	0,871	0,870
15	688,877	3,397	0,772	0,796	0,795
20	649,670	3,147	0,758	0,738	0,736
25	595,000	2,798	0,736	0,656	0,654
30	545,907	2,484	0,713	0,582	0,580
35	516,700	2,298	0,696	0,539	0,536
40	464,108	1,962	0,662	0,460	0,457
45	428,163	1,733	0,634	0,406	0,403
50	395,525	1,524	0,603	0,357	0,354
55	366,094	1,336	0,572	0,313	0,310
60	339,724	1,168	0,538	0,274	0,270
65	316,208	1,018	0,504	0,238	0,235
70	276,922	0,767	0,434	0,180	0,176
75	260,720	0,664	0,399	0,155	0,151
80	246,513	0,573	0,364	0,134	0,130
85	234,117	0,494	0,330	0,115	0,111
90	233,000	0,487	0,327	0,114	0,110

Tabela D.6: Dados experimentais da cinética de secagem de uva Itália a 60°C, com umidade absoluta (y) = 0,0141 g_{va}/g_{as}, e pré-tratamento químico de CaCO₃ = 2,0%; C₂₀H₃₈O₂ = 1,0%, onde X = umidade em base seca; U = umidade em base úmida; X/X_0 = umidade adimensional e $\bar{M}$ = umidade residual.

tempo (h)	massa (g)	X (b.s.) (kg _a /kg _{ss})	U (b.u.) (kg _a /kg _T)	X/X_0	$\bar{M} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$
0	828,606	4,263	0,810	1	1
5	772,060	3,904	0,796	0,915	0,915
10	730,340	3,639	0,784	0,853	0,852
15	672,086	3,269	0,765	0,766	0,765
20	616,603	2,916	0,744	0,684	0,682
25	561,795	2,568	0,719	0,602	0,600
30	509,495	2,236	0,691	0,524	0,522
35	470,000	1,985	0,665	0,465	0,463
40	454,000	1,883	0,653	0,441	0,439
45	407,000	1,585	0,613	0,371	0,369
50	341,662	1,170	0,539	0,274	0,271
55	311,065	0,975	0,493	0,228	0,225
60	284,701	0,808	0,447	0,189	0,186
65	262,208	0,665	0,399	0,156	0,152
70	248,900	0,581	0,367	0,136	0,132
75	227,312	0,443	0,307	0,104	0,100
80	220,000	0,397	0,284	0,093	0,089
85	203,241	0,291	0,22541	0,06826	0,06437

Tabela D.7: Dados experimentais da cinética de secagem de uva Itália a 60°C, com umidade absoluta (y) = 0,0136 g_{va}/g_{as}, e pré-tratamento químico de CaCO₃ = 2,0%; C₂₀H₃₈O₂ = 2,0%, onde X = umidade em base seca; U = umidade em base úmida; X/X_o = umidade adimensional e $\bar{M}$ = umidade residual.

tempo (h)	massa (g)	X (b.s.) (kg _a /kg _{ss})	U (b.u.) (kg _a /kg _T)	X/X_o	$\bar{M} = \frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}}$
0	832,764	4,263	0,810	1	1
5	767,630	3,851	0,793	0,903	0,903
10	715,670	3,523	0,778	0,826	0,825
15	632,363	2,996	0,749	0,702	0,701
20	560,900	2,545	0,717	0,596	0,595
25	486,512	2,074	0,674	0,486	0,484
30	427,800	1,703	0,630	0,399	0,397
35	366,103	1,313	0,567	0,308	0,305
40	315,670	0,995	0,498	0,233	0,230
45	280,486	0,772	0,435	0,181	0,177
50	249,794	0,578	0,366	0,135	0,132
55	225,883	0,427	0,299	0,100	0,096
60	217,000	0,371	0,270	0,087	0,083
65	194,009	0,226	0,184	0,053	0,049
70	184,500	0,166	0,142	0,038	0,035

Tabela D.8: Dados experimentais da cinética de secagem de uva Itália a 60°C, com umidade absoluta (y) = 0,0163 g_{va}/g_{as}, e pré-tratamento químico de CaCO₃ = 2,0%; C₂₀H₃₈O₂ = 3,0%, onde X = umidade em base seca; U = umidade em base úmida; X/X_0 = umidade adimensional e $\bar{M}$ = umidade residual.

tempo (h)	massa (g)	X (b.s.) (kg _a /kg _{ss})	U (b.u.) (kg _a /kg _T)	X/X_0	$\bar{M} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$
0	815,238	4,263	0,810	1	1
5	749,369	3,838	0,793	0,900	0,899
10	689,300	3,450	0,775	0,809	0,808
15	600,543	2,877	0,742	0,674	0,673
20	515,218	2,326	0,699	0,545	0,543
25	434,985	1,808	0,643	0,424	0,421
30	368,900	1,381	0,580	0,324	0,320
35	307,089	0,982	0,495	0,230	0,226
40	261,840	0,690	0,408	0,161	0,157
45	227,962	0,471	0,320	0,110	0,106
50	213,450	0,378	0,274	0,088	0,084
55	198,900	0,284	0,221	0,066	0,062
60	178,890	0,154	0,134	0,036	0,031