

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**AVALIAÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE
GENGIBRE (*Zingiber officinale*, Roscoe) EM
UM SECADOR DE LEITO FIXO**

Autora: Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Elizabeth Xidieh Murr

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

PARECER

Este exemplar corresponde à
redação final da tese defendida
por Josivanda Palmeira Gomes de
Gouveia aprovada pela Comissão
Julgadora em 24 de fevereiro de
1999.

Fevereiro de 1999

Campinas, 24 de fevereiro de
1999

6045966

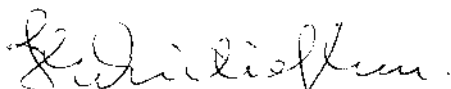
AVALIAÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE GENGIBRE
(*Zingiber officinale*, Roscoe) EM UM SECADOR DE LEITO FIXO

por

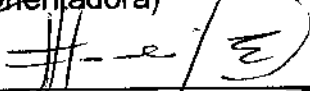
Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia

Tese aprovada em ____ de ____ de 1999.

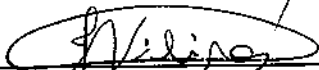
BANCA EXAMINADORA



Prof.ª Dr.ª Fernanda Elizabeth Xidieh Murr
(Orientadora)



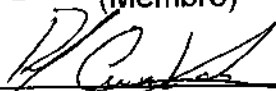
Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida
(Membro)



Prof. Dr. José Antônio Gomes Vieira
(Membro)



Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto
(Membro)



Prof.ª Dr.ª Roseane Lopes da Cunha
(Membro)

Prof. Dr. João Domingos Biagi
(Suplente)

Profa. Dr.ª Enny T. Martucci
(Suplente)

Aos meus pais, Josias e Vanda

Ao meu Caio César

A meu esposo Carlos

A Deus

Agradecimentos

Minha gratidão eterna à Deus, Força Superior que me guiou durante todo o meu viver.

À Fernanda E. X. Murr, pelo apoio e pela forma brilhante que agiu na transmissão dos ensinamentos e orientações.

À CAPES – Coordenadoria de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedidas através do Programa Institucional de Capacitação Docente (PICD).

Ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba pela oportunidade proporcionada para a realização desta pesquisa, em especial a Aldaniza, pessoa indispensável para resolução dos meus assuntos junto ao departamento e ao Prof. Carlos Azevedo pela contribuição dada.

Aos meus pais, Josias e Vanda, meus irmãos, meus sobrinhos e meu cunhado Ronaldo, por tudo.

As “amigas-irmãs”, Françoise, Josenilda, Mônica e Tânia, por serem as pessoas certas nas horas incertas.

Ao meu esposo Carlos e meu filho Caio César, motivo maior da minha luta.

Aos funcionários da FEA, em especial, Angela, Reinaldo, Jaime, Dalila, Sr. Alcides, Margareth e Cosme, pelo apoio em todos os momentos.

Ao Kil Jin Park, valeu amigo!!!!!!

Aos professores da Banca Examinadora, pela atenção dispensada, como também pelas correções sugeridas.

Aos amigos Flávio Luiz e Maria Isabel, que muito contribuíram em toda a análise estatística.

A Paulo e Nalra, presente que Deus colocou em minha caminhada.

Flávia, sem sua força, talvez eu tivesse ficado na fase experimental!

Aos amigos, Jaime, Denise, Suse, Gabriel, Marley, Edson, Silmara, Alcilene, Simone, Ássima, Li, Lia, Kit, Rose, Antônio, Luiza, Raniere, Márcia, Maurício, Catita, Bel, vocês são especiais!

Enfim, agradeço a todos que participaram dessa minha caminhada.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	v
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1 - INTRODUÇÃO	01
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	04
2.1 - O gengibre.....	04
2.2 - Atividade de água.....	09
2.2.1 - Métodos de determinação do conteúdo de umidade.....	14
2.2.1.1 - Métodos gravimétrico.....	15
2.2.1.2 - Métodos dinâmico.....	15
2.2.1.3 - Métodos manométrico e higrométrico.....	15
2.2.1.4 - Métodos especiais.....	15
2.2.2 - Modelos matemáticos para ajustes das isotermas.....	16
2.2.3 - Histerese.....	22
2.2.4 - Calor isostérico de sorção.....	24
2.3 - Planejamento e otimização de experimentos.....	25
2.3.1 - Metodologia de superfície de resposta.....	26
2.4 - Secagem.....	29
2.4.1 - Período a taxa constante.....	31
2.4.2 - Período a taxa decrescente.....	33
2.4.3 - Secadores de leito fixo.....	37
2.4.4 - Encolhimento.....	38
2.4.4.1 - Modelo Uniforme 1.....	41
2.4.4.2 - Modelo Uniforme 2.....	43
2.4.4.3 - Modelo Central.....	44
3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	45
3.1 - Matéria-prima.....	45
3.2 - Métodos.....	46
3.2.1 - Determinação do conteúdo de umidade.....	46

3.2.2 - Determinação dos lipídeos.....	47
3.2.3 - Determinação da proteína	47
3.2.4 - Determinação de fibras.....	47
3.2.5 - Determinação de cinzas.....	47
3.2.6 - Determinação da densidade.....	48
3.2.7 - Determinação dos açúcares.....	48
3.2.8 - Isotermas de sorção.....	48
3.2.9 - Ajuste dos modelos.....	51
3.2.10 - Planejamento experimental.....	52
3.2.11 - Curvas de secagem.....	57
3.2.12 - Modelo de difusão sem encolhimento.....	59
3.2.13 - Modelo de difusão com encolhimento.....	60
3.2.14 - Estudo do encolhimento.....	60
3.2.15 - Cálculo do calor isostérico.....	61
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
4.1 - Composição centesimal.....	62
4.2 - Isotermas de sorção.....	63
4.3 - Histerese.....	75
4.4 - Calor isostérico	79
4.5 - Planejamento experimental.....	84
4.5.1 Estudo das superfícies de resposta.....	91
4.6 - Cinética de secagem.....	93
4.7 - Modelo difusional.....	102
4.8 - Energia de ativação.....	105
4.9 Estudo do encolhimento.....	108
5 - CONCLUSÕES.....	116
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
APÊNDICE A.....	124
APÊNDICE B.....	132
APÊNDICE C.....	138
APÊNDICE D.....	149
APÊNDICE E.....	153
APÊNDICE F.....	155
APÊNDICE G.....	156

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Os cinco tipos de isotermas de adsorção de Van der Waals	12
3.1 - Secador de leito fixo.....	57
3.2 - Detalhe da unidade de aquecimento e controle do ar de secagem.....	58
4.1 - Isoterma de dessorção de gengibre sem e com casca nas temperaturas de 29 (a), 35 (b), 50 (c), 65 (d) e 71°C (e)	73
4.2 - Isoterma de adsorção de gengibre sem e com casca nas temperaturas de 29 (a), 35 (b), 50 (c), 65 (d) e 71°C (e)	74
4.3 - Histerese do gengibre sem casca nas temperaturas de 29 (a), 35 (b), 50 (c), 65 (d) e 71°C (e), respectivamente.....	77
4.4 - Histerese do gengibre com casca nas temperaturas de 29 (a), 35 (b), 50 (c), 65 (d) e 71°C (e), respectivamente.....	78
4.5 - Curvas do $\ln a_w$ versus $1/T$ para diferentes umidades de equilíbrio para dessorção do gengibre sem casca.....	80
4.6 - Curvas do $\ln a_w$ versus $1/T$ para diferentes umidades de equilíbrio para dessorção do gengibre com casca.....	80
4.7 - Curvas do $\ln a_w$ versus $1/T$ para diferentes umidades de equilíbrio para adsorção do gengibre sem casca.....	81
4.8 - Curvas do $\ln a_w$ versus $1/T$ para diferentes umidades de equilíbrio para adsorção do gengibre com casca.....	81
4.9 - Calor isostérico de sorção para o gengibre sem e com casca	82
4.10 - Efeitos principais das variáveis sobre a resposta.....	85
4.11 - Superfície de resposta ($t = 3,0$ hs) para UMIDSC1(a) e (UMIDSC2)(b).....	91
4.12 - Superfície de resposta ($t = 3,0$ hs) para UMIDCC1(a) e (UMIDCC2)(b)	92
4.13 - Cinética de secagem para UMIDSC1.....	94
4.14 - Cinética de secagem para UMIDSC2.....	95
4.15 - Cinética de secagem para UMIDCC1.....	95
4.16 - Cinética de secagem para UMIDCC2.....	96
4.17 - Efeito da velocidade do ar de secagem (a),(b),(c) e temperatura (d),(e) e (f) sobre o conteúdo de umidade do gengibre para o caso UMIDSC1	97

4.18 - Efeito da velocidade do ar de secagem (a),(b),(c) e temperatura (d),(e) e (f) sobre o conteúdo de umidade do gengibre para o caso UMIDSC2	98
4.19 - Efeito da velocidade do ar de secagem (a),(b),(c) e temperatura (d),(e) e (f) sobre o conteúdo de umidade do gengibre para o caso UMIDCC1	99
4.20 - Efeito da velocidade do ar de secagem (a),(b),(c) e temperatura (d),(e) e (f) sobre o conteúdo de umidade do gengibre para o caso UMIDCC2	100
4.21 - Comparação entre os modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 para todas as condições de secagem (UMIDSC1)	111
4.22 - Comparação entre os modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 para todas as condições de secagem (UMIDSC2)	112
4.23 - Comparação entre os modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 para todas as condições de secagem (UMIDCC1)	113
4.24 - Comparação entre os modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 para todas as condições de secagem (UMIDCC2)	114

LISTA DE TABELAS

2.1 - Composição química do gengibre	6
3.1 - Dados de umidade de equilíbrio obtidos com soluções saturadas de sais inorgânicos para as temperaturas de 29, 35, 50, 65 e 71°C.....	50
3.2 - Valores reais e os níveis dos fatores estudados para um planejamento fatorial	53
3.3 - Análise de variância	54
3.4 - Valores reais e os níveis dos fatores estudados para um planejamento fatorial completo (2^2) do processo	55
3.5 - Matriz do planejamento de experimentos em sua forma codificada e real, respectivamente	56
4.1 - Composição química do gengibre	62
4.2 - Dados experimentais de umidade de equilíbrio de dessorção do gengibre nas temperaturas de 29, 35, 50, 65 e 71°C	64
4.3 - Dados experimentais de umidade de equilíbrio de adsorção do gengibre nas temperaturas de 29, 35, 50, 65 e 71°C.....	65
4.4 - Parâmetros de ajustes da isoterma de dessorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 29°C.....	66
4.5 - Parâmetros de ajustes da isoterma de dessorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 35°C.....	66
4.6 - Parâmetros de ajustes da isoterma de dessorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 50°C.....	67
4.7 - Parâmetros de ajustes da isoterma de dessorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 65°C.....	67
4.8 - Parâmetros de ajustes da isoterma de dessorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 71°C.....	68
4.9 - Parâmetros de ajustes da isoterma de adsorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 29°C.....	68
4.10 - Parâmetros de ajustes da isoterma de adsorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 35°C.....	69

4.11 - Parâmetros de ajustes da isoterma de adsorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 50°C.....	69
4.12 - Parâmetros de ajustes da isoterma de adsorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 65°C.....	70
4.13 - Parâmetros de ajustes da isoterma de adsorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 71°C.....	70
4.14 - Valores calculados do calor isostérico de sorção para o gengibre sem e com casca, para diferentes valores de umidade	82
4.15 - Parâmetros (K_1 , K_2 e m_0), coeficiente de determinação (R^2) e desvio médio relativo (P) do ajuste da equação 2.15 para os dados experimentais de Q_{ST}	83
4.16 - Efeitos principais da temperatura e velocidade do ar sobre o conteúdo de umidade.....	84
4.17 - Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras de gengibre para o corte UMIDSC1.....	86
4.18 - Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras de gengibre para o corte UMIDSC2.....	86
4.19 - Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras de gengibre para o corte UMIDCC1.....	86
4.20 - Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras de gengibre para o corte UMIDCC2	87
4.21 - Resultado da ANOVA para o tempo = 3,0hs - UMIDSC1	87
4.22 - Resultado da ANOVA para o tempo = 3,0hs - UMIDSC2	88
4.23 - Resultado da ANOVA para o tempo = 3,0hs - UMIDCC1	88
4.24 - Resultado da ANOVA para o tempo = 3,0hs -UMIDCC2	89
4.25 - Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional considerando a espessura média das amostras nas temperaturas de 35, 50 e 65°C.....	103
4.26 - Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional considerando o encolhimento para as amostras de gengibre nas temperaturas de 35, 50 e 65°C.....	104

4.27 - Valores da energia de ativação em função da velocidade do ar de secagem e temperaturas de 35, 50 e 65°C.....	106
4.28 - Valores do coeficiente de encolhimento (n), desvio médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) entre os modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e central para todas as condições estudadas (UMIDSC1).....	109
4.29 - Valores do coeficiente de encolhimento (n), desvio médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) entre os modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e central para todas as condições estudadas (UMIDSC2).....	109
4.30 - Valores do coeficiente de encolhimento (n), desvio médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) entre os modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e central para todas as condições estudadas (UMIDCC1).....	110
4.31 - Valores do coeficiente de encolhimento (n), desvio médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) entre os modelos Uniforme 1, Uniforme 2 e central para todas as condições estudadas (UMIDCC2).....	110

RESUMO

Neste trabalho estudou-se experimentalmente a cinética de secagem do gengibre em um secador de leito fixo. Foi observada a otimização do processo de secagem, baseando-se em um planejamento fatorial e posterior análise de superfície de resposta para um período de 3 horas. Analisou-se o efeito da temperatura e velocidade do ar na secagem do gengibre. Observou-se o fenômeno de transferência de calor e massa durante a secagem através do modelo de difusão de Fick, correlacionando o encolhimento do material através dos modelos de Suzuki et al. (1976). Os dados do conteúdo de umidade de equilíbrio, utilizados no cálculo do adimensional de umidade foram obtidos experimentalmente através das isotermas de sorção, com umidade relativa variando de 10,75 a 83,62%. Foram realizados ajustes nos dados obtidos através dos modelos de BET, GAB, Halsey, Oswin e Smith, tendo os dados experimentais se ajustado melhor ao modelo GAB. A partir das curvas de equilíbrio, calculou-se o valor do calor isostérico de sorção em função da umidade das amostras, o qual variou de 220,3 a 2.638kJ/kg.°K para os cortes sem e com casca. A melhor correlação nas curvas de secagem foi obtida utilizando o modelo difusional de Fick para uma placa plana infinita, considerando apenas o primeiro termo da equação. Os valores de difusividade efetiva foram de 0,70 a $4,40 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{h}$ sem considerar o encolhimento e de 0,37 a $3,86 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{h}$ para curvas considerando o encolhimento do material.

ABSTRACT

The drying kinetics of ginger was studied in this research by using a static dryer. The drying optimization process was observed through the factorial design and response surface analysis for a 3 hours period. The effect of the temperature and velocity of the air was analyzed on the drying of ginger. The phenomenon of the mass and heat transferring was observed during of drying by using the Fick diffusion model and correlating the material shrinkage by Suzuki models. The equilibrium moisture content data, used in the dimensionless moisture calculation, were obtained based on the sorption isotherms from 10,75 to 83,62%. Fittings on the obtained data were performed by BET, GAB, Halsey, Oswin e Smith models, in which it verified that the best fitting was provided by GAB model. From the equilibrium curves, the sorption Isosteric heat was calculated as a function of moisture content, which varied from 220,3 to 2.638kJ/kg.°K for the ginger cuts with and without skin. In the drying curves, the best correlation was given by the first term Fick diffusion model for the infinite level slab. The difusivity effective values ranged from 0,70 to $4,40 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{h}$ without shrinkage and from 0,37 to $3,86 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{h}$ with shrinkage.

1 - INTRODUÇÃO

O Brasil, como um dos produtores mundiais de gengibre, contribui com cerca de dois milhões de quilos de gengibre. Entretanto, juntamente com outros países produtores, enfrentam grandes problemas nos processos de secagem.

O conhecimento do mecanismo de troca de vapor de água entre os materiais biológicos e o ambiente é de grande importância no processamento, particularmente na secagem e armazenagem.

Todo alimento contém água, no entanto, ela não se encontra ligada do mesmo modo. SANCHEZ (1994) diz que em alguns casos, a água pode estar relativamente livre e em outros estar ligada a estrutura do alimento, não ficando disponíveis para o processo de deterioração. Assim sendo, o conceito de atividade de água em um alimento permite quantificar o grau de água livre contida no mesmo. Portanto, o controle de atividade da água é muito importante na preservação e desenvolvimento de novos produtos alimentícios.

Sendo o gengibre um material higroscópico, pode facilmente perder ou ganhar umidade para o ambiente onde estiver até atingir o equilíbrio higroscópico. Desta forma, a umidade de equilíbrio de um material higroscópico é relevante no estudo da secagem porque determina o teor de umidade mínimo que o produto pode atingir sob determinadas condições do ar de secagem.

A umidade de equilíbrio depende do ambiente e é dada geralmente em função da umidade relativa, tendo a temperatura como parâmetro. Esta função é chamada isoterma.

O conhecimento da umidade de equilíbrio pode ser feito utilizando-se de métodos, sendo necessário apenas a manutenção da temperatura e umidade do ar constante. A determinação pode ser realizada de forma estática ou dinâmica, sendo que a segunda é preferível quando os dados vão ser usados em cálculos de secagem.

Para produtos com alto teor de umidade, como é o caso do gengibre, é notório um encolhimento muito grande, onde ocorre grandes modificações em sua forma original. Desta forma, este encolhimento deve estar previsto na modelagem da cinética de secagem, com o objetivo de uma melhor representação física do processo de secagem e maior confiabilidade nos coeficientes determinados.

Para a determinação das isotermas de equilíbrio higroscópico, as condições termodinâmicas do ar devem ser mantidas constantes. A temperatura do ar pode ser controlada por termostatos, enquanto que a umidade relativa pode ser controlada por soluções saturadas de sais (GRESANN, 1977).

Em razão da crescente demanda do gengibre e das condições do mercado internacional, a secagem artificial deste produto vem exigindo da pesquisa, estudo para a secagem deste produto com o objetivo de comercialização e apresentação do mesmo no mercado consumidor. Tendo sido observado, ainda, a falta de pesquisa sobre as propriedades físicas do gengibre um entrave ao bom desenvolvimento de tecnologia de secagem para este produto.

Tendo em vista a importância das propriedades físicas no modelamento matemático de secagem, o presente trabalho teve como objetivo:

1 - determinação dos melhores parâmetros de secagem do gengibre através de um secador em leito fixo, desenvolvido por BROD et al. (1994).

2 – caracterizar o gengibre através da análises da composição centesimal.

3 – estudar a atividade de água foram obtidos através das curvas de sorção (dessorção e adsorção) nas temperaturas de 29, 35, 50, 65 e 71°C utilizando o método gravimétrico estático, numa faixa de umidade relativa de até 83,62%.

4 – estudar a cinética de secagem baseada na teoria de difusão líquida, considerando o fenômeno de encolhimento.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - O gengibre

O gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) é cultivado no Brasil desde 1587. Pertencente a família das zingiberáceas, foi introduzido no Nordeste pelos holandeses. É uma planta tradicional, utilizada desde os tempos bíblicos. Possuem folhas verde-claras que parecem pontas de lanças, cujas bases justapostas criam uma haste com jeito de caule e a planta cresce entre 90 e 120cm de altura. Contém substâncias como óleo, resinas, goma amido, entre outras. O rizoma é perene e as folhas são anuais. É bastante utilizado na fabricação de bebidas, medicamentos, como também condimentos (ENCICLOPÉDIA BARSA, 1965, SCARPARE FILHO, 1988, FARRELL, 1990 e GUIA RURAL, 1990).

Segundo PARRY (1969) o gengibre pode ser classificado através de sua morfologia, da seguinte maneira:

a) Gengibre jamaicano: Rizoma de cor amarela, possuindo de 6 a 9 centímetros de comprimento, com formato irregular, ramificados ou palmeados e um tanto fibroso. O seu odor é bastante agradável;

b) Gengibre africano: Os rizomas são mais escuros que o anterior, menos suaves e mais pungentes;

c) Gengibre indiano: Os rizomas possuem 12 centímetros, com cor castanho claro, fortemente aromatizados e pungentes.

d) Gengibre japonês: Os rizomas são mais parecidos com o gengibre indiano, porém é mais fibroso e o aroma e a pungência são mais fracos.

Esta planta apresenta-se com talo folhoso que pode atingir mais de 1,2m de altura, está provido de rizoma horizontal perene, de 1 a 2cm de espessura, um pouco achatado com ramificações no mesmo plano (HAAG et al., 1990). Prefere os climas tropical e subtropical, mas tem se adaptado em regiões mais frias. É próspera nos terrenos arenosos, leves, areno-barrentos, bem drenados. É cultura invasora, constituindo verdadeira praga, difícil de extinção. É esgotante, exigente de solos de boas fertilidade, bem drenados, argilo-arenosos e ricos em matéria orgânica. Os aluvionais são os mais indicados desde que não sejam sujeitos a enchentes frequentes, com boa drenagem, uma vez que os rizomas podem apodrecer em locais com excesso de água.

Desenvolve-se bem em climas tropicais e sub-tropicais com boa distribuição de chuvas e altas temperaturas durante o período de formação do rizoma, entretanto, não tolera secas prolongadas, visto que a região tradicional de produção de gengibre na Índia possui alta precipitação, variando de 2.500 a 3.000mm ao ano.

A altitude pouco influi na produção, pois a cultura pode ser encontrada tanto em regiões baixas como altas; na Índia a altitude é de 1.500m, Jamaica entre 500-1000m e no Brasil, é cultivado principalmente no litoral, quase ao nível do mar. O ciclo vegetativo é de 05 a 06 meses, a partir do plantio; nos climas quentes há possibilidade de fazer duas culturas no mesmo ano. A colheita

é praticada assim que amolecerem as hastes, procurando não ferir os rizomas, que serão bem limpos de terra, lavados em água e secos ao sol ou em estufa. A produção por hectare está calculada entre 5 a 8 toneladas de gengibre verde (PEIXOTO, 1966).

Segundo a literatura, o gengibre possui a seguinte composição:

Tabela 2.1 – Composição química do gengibre

COMPONENTES	Gengibre*(%)	Gengibre**(%)	Gengibre***(%)
Proteínas	1,87	2,50	2,30
Lipídeos	0,72	2,90	1,00
Fibras	1,30	2,10	2,40
Cinzas	1,00	-	1,20
Umidade	87,4	-	80,8
Carboidratos	-	11,0%	12,3

(Fonte: *FRANCO, 1992; **BENDER, 1982; ***ISHIMURA et al., 1988)

A reprodução do gengibre se faz por via assexuada, através de rizomas, por isso o número de variedades é reduzido e os clones só se diferenciam por mutações acidentais. Existem, no entanto, muitas variedades espalhadas pelo mundo, diferenciando-se entre si pelo tamanho e cor do rizoma. É impossível distinguir as variedades pela vegetação.

As variedades de tamanho maior são menos fibrosas e menos picantes, mas tem um rendimento maior; os rizomas geralmente são de cor amarela, podendo também ser encontrados os de cor branca e azul. As variedades de tamanho menor, são mais apreciadas pela culinária oriental.

Os principais produtores de gengibre seco são: Reino Unido, Estados Unidos, Europa, Oriente Médio e África do Norte e os exportadores, os quais Índia e Nigéria o comercializam seco, em conserva ou natural. Já a Jamaica possui o gengibre seco mais apreciado, possuindo este cor clara, ótimo aroma e sabor suave (EDWARDS, 1975).

O Brasil, que não figura entre os maiores produtores, exporta atualmente cerca de dois milhões de quilos de rizomas de gengibre especialmente para os Estados Unidos, Europa e Japão. Porém para atender as exigências do mercado internacional por um produto "in natura" de melhor qualidade, é realizada uma seleção onde se eliminam partes ou mesmo rizomas inteiros defeituosos, com cortes, amassados, estragados ou muito pequenos. Esse material é normalmente descartado e representa um volume apreciável (acima de 20%) da colheita (MAIA et al., 1991).

A zingiberácea possui numerosas aplicações. Na medicina pode ser utilizado para problemas estomacais, ajudando também na digestão, nas cólicas flatulentas, nos resfriados, na rouquidão ou afonia, sob a forma de cozimento concentrado (ROSENGARTEN Jr., 1969).

Outras aplicações do rizoma tuberoso do gengibre do comércio além das consideradas como medicamento têm sido utilizado como condimento na arte culinária diretamente ou no composto "carril" ou "curry" produto indiano largamente conhecido sob a forma de pó. Serve ainda cortado em pedacinhos e misturado as verduras nas saladas. Entre nós brasileiros somente se preparam cocadas, pé-de-moleque, além da sertaneja "cachaça queimada" ou quentão, são preparadas as excelentes bebidas refrigerantes como "gengiber-ale", cerveja

como "ginger-beer", jamaica ginger; também se fabricam licores, gengibirra, extrato alcoólico para aromatizar gasosas e outras bebidas. A aplicação do gengibre ainda se encontra na perfumaria, para a preparação das águas de colônia, gargarejos, dentríficos, pastilhas contra o mau-hálito, etc.(SCARPARE FILHO, 1988; PEIXOTO, 1966).

Quente, ardente, forte, picante e pungente são adjetivos usados para descrever o sabor do gengibre. Talvez por isso se diga que é afrodisíaco: basta colocar na boca um pouco de gengibre, seja em pó, ralado, picado, espremido, seco ou em conserva que a sensação é imediata (PEIXOTO, 1966 e GUIA RURAL, 1990).

Em sua massa sólida e aquosa, de gosto acre picante, propriedades revitalizantes favorecem a circulação e fortalecem as funções nervosas, auxiliando nos tratamentos de esgotamento físico e psíquico. As pesquisas científicas já comprovaram também uma atividade antimicrobiana e antibacteriana, produzindo efeitos anti-inflamatório e analgésico (PEIXOTO, 1966, EDWARDS, 1975; GUIA RURAL, 1990).

Apesar do largo campo de aplicação do gengibre, este ainda é pouco estudado, havendo uma grande lacuna na pesquisa agrícola a ser preenchida. No entanto, na área de farmacologia são várias as pesquisas realizadas com o gengibre, em diversas partes do mundo, inclusive no Brasil, visto que do rizoma obtém-se substâncias que tem sido utilizadas na prevenção de úlceras.

2.2 - Atividade de água

De acordo com TREYBAL (1968) o conteúdo de umidade de equilíbrio é particularmente importante na secagem, uma vez que representa o valor limite para uma dada condição de umidade relativa e temperatura. Assim, a umidade de equilíbrio pode ser definida como sendo o conteúdo de umidade que este apresenta quando a pressão de vapor de água em sua superfície se iguala a pressão de vapor de água no ar que o envolve.

Para LABUZA et al. (1972) e TEIXEIRA NETO e QUAST (1997) a relação existente entre a água e outros compostos de um produto definem a sua higroscopicidade e torna-se uma característica essencial que vai influenciar em diferentes etapas do processamento, armazenamento e consumo de materiais biológicos.

Estes estudos concluem que a maior ou menor intensidade com que a água se liga ao alimento pode ser expressa pela chamada atividade de água, a qual pode ser definida como a relação entre a pressão do vapor de água no ar e a pressão do vapor de água no ar saturado, medidas à mesma temperatura. Quando se refere à atividade de água de um alimento, isto significa a relação entre a pressão de vapor de água no alimento e a pressão do vapor de água pura, medidas à mesma temperatura, influi no desenvolvimento de microrganismos em alimentos, velocidade de reações enzimáticas, oxidação de lipídeos, hidrólise e escurecimento não enzimático, assim como a cristalização e retrogradação que podem ocorrer em alimentos.

De acordo com SPIESS e WOLF (1983) a atividade de água pode ser obtida pela relação entre a pressão parcial da água em uma camada de ar em equilíbrio com uma solução ou alimento (p) e a pressão de vapor de água (p_o) na mesma temperatura, ou seja:

$$a_w = \frac{p}{p_o} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Deste modo seu valor pode ser determinado a partir da umidade relativa da camada de ar em equilíbrio com o alimento:

$$a_w = \frac{\%UR}{100} \quad (2.2)$$

A atividade de água pode ser relacionada à Lei de Raoult da seguinte forma:

$$a_w = \frac{p}{p_o} = \gamma \cdot X_{\text{água}} = \frac{\%UR}{100} \quad (2.3)$$

Onde:

a_w = atividade de água;

p = pressão de vapor da água no alimento a temperatura T;

p_o = pressão de vapor da água a temperatura T;

γ = coeficiente de atividade de água;

$X_{\text{água}}$ = fração molar da água;

$\%UR$ = umidade relativa de equilíbrio exercida pela solução ou pelo alimento.

Para LABUZA (1968) e CASTAÑON e BARRAL (1988) a relação entre a umidade de equilíbrio de um sólido e a atividade de água em uma dada temperatura é expressa graficamente através de isotermas de sorção. Estes dados são provenientes do material a ser seco e podem ser úteis na estimativa do tempo de secagem e as condições ótimas de armazenamento.

Todos os alimentos contém água, no entanto, a água não se encontra ligada do mesmo modo. SANCHEZ (1994) cita que em alguns casos, a água pode estar relativamente livre e em outros estar ligada a estrutura do alimento, não ficando disponíveis para o processo de deterioração. Assim sendo, o conceito de atividade de água em um alimento permite quantificar o grau de liberdade de água contida no mesmo. Portanto, o controle de atividade de água é muito importante na preservação e desenvolvimento de novos produtos alimentícios.

A atividade de água de um alimento não é somente função do conteúdo de água, mas também de substâncias as quais exercem o efeito de ligação da água na estrutura do alimento. Alimentos com o mesmo conteúdo de umidade podem desta forma, ter diferentes atividades de água, dependendo, sobretudo, do seu conteúdo de água ligando substâncias a sua estrutura (HEIDELBAUG e KAREL, 1975).

BRUNAUER et al. (1940) classificaram as isotermas de adsorção em cinco diferentes tipos (Figura 01). O tipo I é a de Langmuir e o tipo II é a isoterma sigmoidal. Os outros três tipos não receberam nomes especiais. O tipo II e III comportam-se de maneira semelhante ao tipo IV e V, com a diferença de que a máxima adsorção ocorre a uma pressão mais baixa que a pressão de

vapor. A maioria das isotermas para alimentos são não-lineares, geralmente sigmoidais e tem sido classificadas como isotermas do tipo II. Alimentos que são ricos em componentes solúveis, como açúcares, tem mostrado comportamento de isotermas do tipo III.

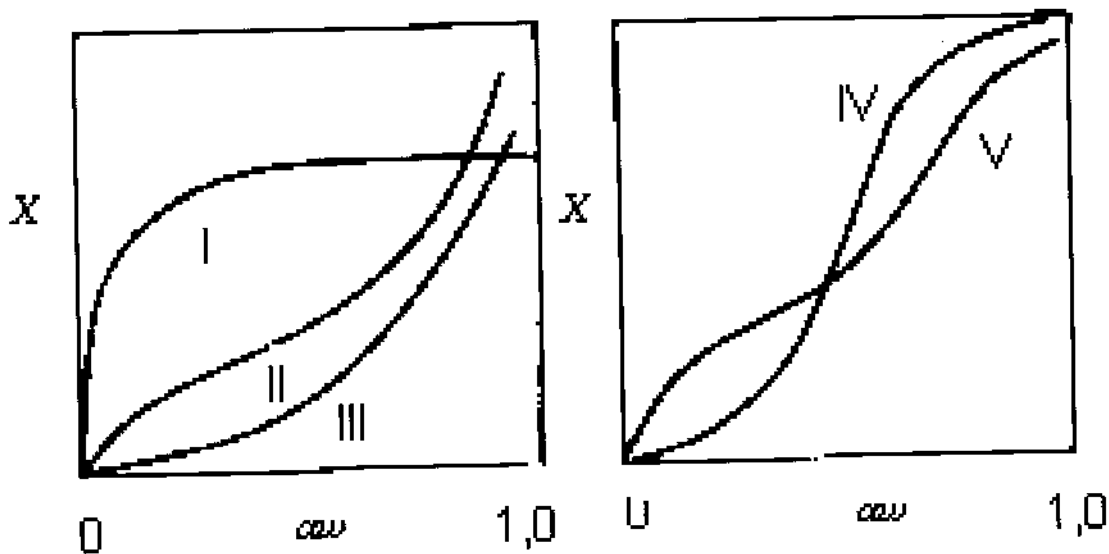


Figura 2.1 -. Os cinco tipos de isotermas de adsorção de Van der Waals

A isoterma pode apresentar três regiões dependendo da condição da água presente: a primeira região representa a adsorção na monocamada molecular de um filme de água e está entre 0 e 35% de umidade relativa; a segunda região representa a adsorção nas camadas adicionais acima da monocamada e localiza-se entre 35 e 60% de umidade relativa; a terceira região representa a água condensada nos poros do material, seguida pela dissolução de materiais solúveis presentes (LABUZA, 1968; LOMAURO et al., 1985).

O conhecimento das isotermas de sorção de água é muito importante na concentração, desidratação e secagem, previsão de estabilidade química, enzimática e microbiológica, seleção de material para embalagens, bem como na determinação da qualidade e vida de prateleira de alimentos (DURAL e HINES, 1993; ISSE et al., 1993).

ACOTT e LABUZA (1975) estudaram o crescimento de microrganismos em alimentos durante o processo de sorção de água. Mostraram que pode haver crescimento microbiológico no produto e afirmam que esse crescimento é dependente da quantidade de água presente no produto e da sua disponibilidade, definida pela atividade de água. Portanto, o controle desses parâmetros é importante para minimizar reações biológicas e químicas durante o processo de sorção de água.

WANG e BRENNAN (1991) analisaram dados de umidade de equilíbrio em batatas para temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, utilizando o método gravimétrico, bem como calcularam o calor isostérico. Foram utilizados vários modelos matemáticos para ajuste dos dados experimentais e concluíram que a temperatura influencia nas isotermas de sorção, ou seja, verificaram que o conteúdo de umidade de equilíbrio aumenta com o decréscimo da temperatura. Eles observaram que o calor isostérico de sorção aumenta quando decresce o conteúdo de umidade.

2.2.1 - Métodos de determinação do conteúdo de umidade

Segundo GAL (1975) podemos classificar os métodos experimentais para obtenção de isothermas em: gravimétricos; dinâmico; manométrico e higrométrico e também os métodos especiais.

2.2.1.1 - Método gravimétrico

Determinação da umidade pelo peso da amostra em equilíbrio com diferentes pressões de vapor.

A1 - Método com registro contínuo da mudança de peso: a balança é parte integrante do sistema, não há necessidade de interromper o processo de sorção para obtenção de peso;

A2 - Método com registro descontínuo da mudança de peso: a balança não é parte integrante do sistema e a determinação do peso é feita separadamente, por métodos adequados.

A2.1 - Sistema estático: as amostras são colocadas em dessecadores contendo soluções de sais ou de ácido sulfúrico e deixadas até atingir o equilíbrio que é detectado pelo peso constante da amostra.

A2.2 - Sistema dinâmico: prevê a agitação do ar em contato com as amostras, diminuindo o tempo para atingir o equilíbrio.

2.2.1.2 - Método dinâmico

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

2.2.1.3 - Método manométrico e higrométrico

Usados em processos de controle de qualidade para a determinação rápida da atividade de água em processos de controle de qualidade.

2.2.1.4 - Métodos especiais

Métodos não convencionais que utilizam membrana da célula de pressão para determinar a atividade de água de materiais com alto conteúdo de umidade. Cromatografia gasosa inversa também tem sido utilizada para determinação da sorção de água de gel, açúcares e produtos de panificação (RAO e RIZVI, 1986).

2.2.2 - Modelos matemáticos para ajuste das isotermas

Diversos modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos têm sido propostos para expressar o teor de umidade dos grãos. RAO e RIZVI, (1986) relata a existência de aproximadamente 77 modelos diferentes. Entretanto, BET (Brunauer-Emmer-Teller, 1938) tomando a conceituação de LANGMUIR (1918) de adsorção na monocamada molecular, propuseram um modelo para descrever a adsorção de multicamadas moleculares, cuja equação diz que a capilaridade define o limite superior do número de monocamadas (CHIRIFE e IGLESIAS, 1978).

A equação geral de BET para isotermas pode ser escrita na seguinte forma:

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

Onde:

a_w = atividade de água;

C_{BET} = constante de BET, dada por:

$$C_{BET} = K \exp\left(\frac{Q_s}{R T}\right)$$

X = conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca;

X_m = conteúdo de umidade na monocamada molecular.

De acordo com LABUZA (1968) esse modelo apresenta dois parâmetros de ajustes (C_{BET} e X_m) que podem ser calculados graficando-se $\{a_w / [(1-a_w)X]\}$ contra a a_w . A isoterma de BET é limitada pelo fato de apresentar bom ajuste apenas para dados de sorção com a_w entre 0,1 e 0,5.

Tecendo considerações da natureza química da umidade, BET propõem para camadas polimoleculares:

$$\frac{X}{X_m} = \frac{C_{BET} a_w}{1 - a_w} \left\{ \frac{1 - (n+1)a_w^n + n a_w^{n+1}}{1 - (1 - C_{BET})a_w - C_{BET} a_w^{n+1}} \right\} \quad (2.5)$$

Onde:

a_w = atividade de água;

n = número de camadas moleculares;

C_{BET} = constante de BET;

X = conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca;

X_m = conteúdo de umidade na monocamada molecular.

BET linearizada é um caso especial da equação de BET, para quando n tender a um valor infinito. Esse modelo restringe o ajuste a dois parâmetros, X_m e C_{BET} e tem sido usado com sucesso para atividades de água até valores em torno de 0,5 (PARK e NOGUEIRA, 1992).

$$X = \frac{X_m C a_w}{1 - a_w [1 - (C-1)a_w]} \quad (2.6)$$

Onde:

X = conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca;

X_m = conteúdo de umidade na monocamada molecular.

C = constante;

a_w = atividade de água;

IGLESIAS e CHIRIFE (1976) calcularam o teor de umidade na monocamada de BET (X_m) a partir dos dados de literatura de isoterma de sorção de umidade em alimentos através do modelo linearizado de BET e concluíram que X_m diminui com o aumento da temperatura. Isto pode ser atribuído à redução do número de zonas ativas como resultado de mudança físicas e químicas induzidas pela temperatura.

GUGGENHEIM (1966), ANDERSON (1946) e de BOER (1953) estenderam as teorias de adsorção física de LANGMUIR e BET, resultando numa equação tripamétrica, conhecida como equação de GAB, matematicamente adequada para aplicações em engenharia e que permite um ótimo ajuste de dados de sorção de quase todos os alimentos até atividade de água de 0,9.

O modelo de GAB está sendo utilizado em vários laboratórios oficiais de alimentos nos EUA e na Comunidade Européia como padrão de descrição e comparação de isotermas por apresentar maior quantidade de parâmetros, sendo recomendada pelo projeto europeu COST 90 (JOWITT et al., 1983). A equação de GAB é dada por:

$$\frac{X}{X_m} = \frac{C_{GAB} K_{GAB} a_w}{(1 - K_{GAB} a_w)(1 - K_{GAB} a_w + C_{GAB} K_{GAB} a_w)} \quad (2.7)$$

Onde C_{GAB} e K_{GAB} são as constantes de adsorção relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes em um dado sítio de sorção. Quando K_{GAB} for igual a unidade a equação de GAB se reduz a equação de BET.

Conforme SARAVACOS et al. (1986) a equação de GAB pode ser escrita do seguinte modo:

$$\frac{X}{X_m} = \frac{(C_{GAB} - 1)K_{GAB} a_w}{1 + (C_{GAB} - 1)K_{GAB} a_w} + \frac{K_{GAB}}{1 - K_{GAB} a_w} \quad (2.8)$$

Onde o primeiro termo da equação nos mostra a adsorção física em multicamadas e o outro é considerado como uma forma da lei de Raoult que descreve a dissolução de açúcares com alta atividade de água.

O modelo de GAB é similar ao de BET e assume a adsorção física localizada nas multicamadas, sem interações laterais, porém com as seguintes vantagens, segundo RAO e RIZVI:

- a) tem uma base teórica fundamentada;
- b) descreve a sorção de água de todos os alimentos com atividade de água variando de 0 a 0,9;
- c) é uma equação matemática de três parâmetros relativamente simples;
- d) os parâmetros utilizados tem significado físico no processo de sorção;
- e) é capaz de descrever algum efeito da temperatura no processo de sorção.

Em 1940, Halsey, desenvolveu uma equação que considera a condensação da multicamada a uma distância relativamente grande da superfície. Ele assumiu que a magnitude do parâmetro b caracteriza o tipo de interação entre o vapor e o sólido. Se b é grande, a atração entre o sólido e o vapor é muito específica e não se estende para muito longe da superfície. Se b é pequeno, as forças de atração predominantes são de Van der Waals e são capazes de agir a grandes distâncias da superfície, sendo dada pela seguinte equação:

$$a_w = \exp \left(\frac{-a}{R T \left(\frac{X}{X_m} \right)^b} \right) \quad (2.9)$$

Onde:

a_w = atividade de água;

X = conteúdo umidade de equilíbrio expressa em base seca;

X_m = conteúdo de umidade na monocamada molecular;

a e b = parâmetros de ajuste;

R = constante universal dos gases;

T = temperatura de realização do experimento.

CHIRIFE e IGLESIAS (1978) simplificaram a equação de Halsey e encontraram resultados satisfatórios para mais de 220 isotermas experimentais testadas. A forma simplificada da equação é:

$$a_w = \exp \left(\frac{-a''}{X^b} \right) \quad (2.10)$$

Onde:

a_w = atividade de água;

a'' e b = parâmetro ajustado pelo modelo acima;

X = umidade de equilíbrio expressa em base seca.

Os mesmos autores descrevem o modelo de Oswin como sendo uma expansão de uma série matemática para curvas sigmoidais podendo ser escrita como:

$$X = a \left(\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right)^b \quad (2.11)$$

Onde:

X = umidade de equilíbrio expressa em base seca.

a_w = atividade de água;

a e b = parâmetros de ajuste do modelo;

Em 1947, Smith estudou o comportamento de sorção de umidade por altos polímeros, tendo sugerido o seguinte modelo:

$$X = M_b - M_a \ln [(1 - a_w)] \quad (2.12)$$

Onde:

X = umidade de equilíbrio expressa em base seca;

M_a e M_b = parâmetros de ajuste.

a_w = atividade de água;

BECKER e SALLANS (1956) e YOUNG e NELSON (1976) utilizaram esse modelo para descrever isotermas de alimentos e verificaram que são bastante adequados para atividades de água acima de 0,30.

PELEG (1993) propôs um modelo com quatro parâmetros para ajustar os dados de isotermas de sorção da literatura. Apresentou resultados em que o modelo proposto mostrou um ajuste comparável ou levemente melhor que o modelo de GAB, para valores de atividade de água abaixo de 90%.

$$X = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2} \quad (2.13)$$

Onde:

a_w = atividade de água;

k_1, k_2, n_1 e n_2 = parâmetros de ajuste;

X = umidade de equilíbrio expressa em base seca.

Apesar dos esforços em pesquisa nesta área, nenhum modelo teórico desenvolvido é capaz de prever exatamente o conteúdo de umidade de equilíbrio para os diferentes alimentos em todas as faixas de temperatura e umidade relativa (DURAL e HINES, 1993).

2.2.3 - Histerese

O equilíbrio higroscópico é diferente quando o produto está ganhando (adsorção) ou perdendo água (dessorção). A curva de adsorção é determinada, partindo do produto com baixo teor de umidade e colocando

amostras em ambientes de diferentes umidades relativas e temperatura constante e a dessorção por perda de água das amostras. Os extremos das curvas sempre coincidem e o ciclo formado entre elas é chamado de histerese (PUZZI, 1986). Em vários produtos o conteúdo de umidade de equilíbrio para uma dada atividade de água é maior para dessorção que para a adsorção devido a histerese (KAPSALIS, 1981).

A histerese de sorção de vapor de água é um fenômeno no qual dois diferentes patamares existem entre as isotermas de adsorção e dessorção e apresentam importantes aplicações práticas e teóricas em alimentos. As teóricas dão um aspecto geral da irreversibilidade do processo de sorção para a questão de validade das funções termodinâmicas. As aplicações práticas dos efeitos da histerese sobre a deterioração química e microbiológica são importantes nos estudos de alimentos com teor de umidade intermediário e em alimentos com baixa umidade (KAPSALIS, 1981).

Uma variedade de curvas de histerese podem ser observadas em alimentos. WOLF et al. (1972) relacionaram grandes diferenças na magnitude, tamanho e extensão da histerese de alimentos desidratados, dependendo sobretudo, do tipo de alimento e da temperatura.

IGLESIAS e CHIRIFE (1976) relataram que o efeito da temperatura sobre a magnitude da histerese varia de acordo com o alimento. Para alguns alimentos um aumento na temperatura diminui ou elimina a histerese, em outros, a histerese total permanece constante, como é o caso de nozes e gengibre ou até diminui, como a camomila e o anis.

2.2.4 - Calor isostérico de sorção

O calor de sorção é um bom parâmetro para estimar a quantidade mínima de calor requerido para remover uma dada quantidade de água e permite algumas deduções sobre a microestrutura do alimento e as mudanças físicas que acontecem na superfície dos alimentos. Um método largamente usado para se calcular o calor de sorção de vários alimentos é baseado na Equação de Clausius-Clapeyron (BECKER e SALLANS, 1956; IGLESIAS e CHIRIFE, 1976, AGUERRE et al., 1988). A equação é dada por:

$$Q_{st} = -R \left(\frac{d \ln a_w}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \right) \quad (2.14)$$

Onde:

Q_{st} - calor isostérico (kJ/kg);

a_w - atividade de água;

T - temperatura (°K);

R - constante dos gases (0,4618kJ/kg.°K).

O conhecimento da dependência do calor de sorção em função do conteúdo de umidade é importante nos estudos sobre armazenamento e secagem, uma vez que estima as necessidades energéticas do processo de secagem, além de fornecer dados sobre o estado da água no produto (TOLABA e SUAREZ, 1995). Eles desenvolveram uma equação triparamétrica para prever o excesso de calor de sorção em função da umidade do produto conforme a seguinte equação:

$$Q_{ST} = R k_1 k_2 \frac{X}{m_o} \quad (2.15)$$

Onde:

k_1, k_2 e m_o = constantes;

R = constante universal dos gases;

X = conteúdo de umidade expresso em base seca.

Um método alternativo desenvolvido por OTHMER (1940) para calcular o calor isostérico, assume que os valores de calor de sorção e condensação tem a mesma dependência com a temperatura. Esta consideração é menos restritiva que a do método de Clapeyron, onde ambos os calores são constantes em vários estudos.

O calor isostérico de sorção pode ser determinado através de dados de sorção de umidade (TSAMI et al., 1990). Valores do calor isostérico de dessorção obtidos são relatados na literatura para vários alimentos (MAKOWER e DYE, 1955; BECKER e SALLANS, 1956, YOSHIDA, 1997).

2.3 – Planejamento e otimização de experimentos

É importante o estudo das variáveis em um processo, as quais podem ser conseguidas através de um método de planejamento experimental capaz de ser executado ordenadamente com um número de ensaios reduzidos. Esta metodologia mostra ainda a verificação dos efeitos individuais e de todas as interações possíveis das variáveis e suas respostas, a definição das variáveis

mais importantes para o processo, a observação dos erros experimentais e de regressão, bem como a modelagem empírica dos resultados em função das variáveis escolhidas, através de programas estatísticos de regressão, mostra as melhores faixas de operação de processos.

2.3.1 - Metodologia de superfície de resposta

A metodologia de superfície de resposta, empregada desde a década de 1950, é uma técnica baseada no emprego de planejamentos fatoriais e que até hoje tem sido largamente utilizada com bastante sucesso na modelagem de diversos processos industriais (BOX et al., 1978).

De acordo com BARROS NETO et al. (1995) a metodologia de superfície de resposta é composta de duas etapas diversificadas: a modelagem e o deslocamento. Ambas são repetidas tantas vezes quantas forem necessárias, até que se atinja uma região ótima (máxima ou mínima) da superfície estudada. A primeira geralmente é conseguida ajustando-se modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais obtidos a partir de planejamentos experimentais. A segunda, ocorre ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, que é o caminho onde a resposta varia de forma mais pronunciada.

O método do planejamento experimental é baseado na seleção de dois níveis (nível +1 e nível -1) para cada variável de entrada (variável independente) e na execução de experimentos para todas as possíveis combinações. Se n fatores (variáveis controladas pelo experimentador) estão

envolvidos no estudo de um sistema, o planejamento necessita de 2^n ensaios diferentes, que é o número mínimo para obtenção de um planejamento fatorial completo.

Outros ensaios podem ser adicionados quando são realizadas algumas repetições para o cálculo do erro experimental. A partir daí, pode-se considerar terminado o método de planejamento fatorial. Com os resultados conseguidos, pode-se calcular os efeitos simples e de interação das variáveis sobre as respostas, determinando quais os efeitos mais significativos e comparando-os com o valor do efeito e o erro experimental estimado, obtenção de um modelo de primeira ordem para correlacionar variáveis e respostas. Quando o modelo de primeira ordem não for eficiente, pode-se completar o planejamento realizando ensaios nos pontos axiais para um modelo de segunda ordem.

Para verificação dos modelos empíricos através de regressão de primeira ou segunda ordem, BOX et al. (1978) afirmam que é necessário uma análise estatística, utilizando dois parâmetros muito importantes: coeficiente de correlação da regressão e o valor estimado para o teste F .

O coeficiente de correlação (R^2) é um parâmetro estatístico que relaciona a variância dos pontos experimentais em relação ao modelo proposto com a variância da própria população de pontos experimentais. Se a correlação entre os valores previstos pelo modelo e os valores experimentais for igual a unidade diz-se que esta é perfeita, e, caso contrário, quando este valor for nulo não existe correlação nenhuma entre eles. Pode-se afirmar que, quanto mais próximo este valor estiver de um, melhor será o ajuste do modelo com os pontos experimentais.

A base do teste F consiste em verificar se existe relação entre as variáveis e a resposta. Quando não existe correlação entre a resposta e a variável, pode-se demonstrar que a razão entre as médias quadráticas da regressão e dos resíduos (MQ_R/MQ_r) segue uma distribuição F (hipótese nula). Neste caso, a variação nos valores dos resultados foi devido exclusivamente a fatores aleatórios. A hipótese nula pode ser testada usando o valor efetivamente calculado para MQ_R/MQ_r e para isto basta compará-lo com o valor de F tabelado. Se as variações nas respostas experimentais apresentarem alta probabilidade de pertencerem a essa distribuição, não há motivos para se questionar a hipótese nula.

Então, pode-se dizer que a equação de regressão não é significativa. Se a razão MQ_R/MQ_r for maior que o valor de F tabelado, pode-se dizer que a equação é estatisticamente significativa e os dados experimentais são representados pelo modelo proposto. A análise dos resíduos é de importância fundamental ao se avaliar a qualidade do ajuste de um modelo. Uma vez que este deixe resíduos consideráveis pode se dizer que é um modelo ruim. O bom desempenho começa pela análise dos desvios das observações em relação a média global (BARROS NETO et al., 1995).

É possível verificar a relevância estatística dos fatores experimentais no valor das respostas, através da realização do teste F , isto é, comparando-se o valor estimado para F , a partir dos dados experimentais, com o valor tabelado para uma distribuição de referência. Porém, às vezes, uma

regressão pode ser significativa do ponto de vista do teste F e não ser útil para realizar previsões por se tratar de uma pequena variação de fatores analisados. Por esta razão BOX e WETZ (1993) sugerem que o valor da razão MQ_R/MQ_r deve ser no mínimo quatro a cinco vezes o valor de F tabelado.

2.4 - Secagem

A operação unitária de secagem é importante, pois visa preparar o produto para a armazenagem. Entretanto, se mal conduzida, poderá prejudicar e qualidade comercial do produto antes mesmo da armazenagem, ou, por outro lado, acelerar o processo de deterioração durante a armazenagem.

Desta forma, a secagem tem como objetivo principal a remoção de água do produto através da evaporação. Por isso, é preciso a utilização de calor para evaporar a umidade da superfície do produto através de um meio de secagem externo, geralmente o ar.

Existem trabalhos experimentais que demonstram a importância do uso da secagem em diversas situações. Muitas vezes o processo de secagem é utilizado visando o fator econômico do frete e do manuseio; outras vezes o material é seco para depois sofrer um processo de reidratação a níveis desejáveis. Para os produtos agrícolas e alimentícios a secagem é utilizada para preservação, permitindo também o transporte sem necessidade de refrigeração. (KEEY, 1972; DAUDIN, 1983).

Vários mecanismos físicos foram propostos (BROOKER et al., 1974; FORTES e OKOS, 1980) para descrever a transferência de umidade nos produtos capilares porosos entre os quais se destacam:

- movimento de líquido devido a forças superficiais (difusão capilar);
- movimento de líquido devido a diferenças na concentração de umidade (difusão líquida);
- movimento de líquido devido a difusão da umidade na superfície dos poros (difusão de superfície);
- movimento de vapor devido a diferenças de concentração de vapor (difusão de vapor);
- movimento de vapor devido a diferenças de temperatura (difusão térmica);
- movimento de água e de vapor devido a diferenças de pressão total (fluxo hidrodinâmico).

De acordo com KEEY (1972) o fenômeno de secagem não pode ser generalizado, uma vez que se trata de materiais biológicos e possuem características intrínsecas as quais podem ser diferentes entre si, com a existência da contribuição do soluto durante a secagem e o encolhimento do produto, devido a mudança de pressão entre o líquido e a parede celular.

Para DAUDIN (1983) os produtos são muito diferenciados entre si, devido a sua forma, estrutura e dimensões, além das condições de secagem serem muito diversas, conforme as propriedades do ar de secagem e a forma como se faz o contato ar-produto. Uma vez que o produto quando colocado em contato com o ar quente promove uma transferência do calor do ar ao produto sob o efeito da diferença de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de massa para o ar. Esta

última se faz na forma de vapor de água, uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água. A evolução destas transferências de calor e massa provoca a existência de três períodos. O primeiro deles conhecido como período de aquecimento; o segundo, período de secagem a taxa constante e o terceiro é o período de taxa decrescente. Sobre o tema HALL (1971) afirma que se a umidade inicial do produto for menor que a crítica, todo o processo de secagem se processará no período de taxa decrescente.

Na secagem de alimentos, entretanto, algumas vezes é difícil determinar o teor de umidade crítica. Uma das razões é o uso de uma velocidade de secagem que não leva em consideração a área superficial do encolhimento dos alimentos durante o processo de secagem (CHARM, 1963).

Muitos pesquisadores, entre eles, PEREIRA e QUEIROZ (1987), HALL (1971) sugerem que a razão de secagem é proporcional a diferença entre a umidade contida no material e a umidade de equilíbrio do produto, cuja expressão analítica é:

$$\frac{dX}{dt} = -K(X - X_e)$$

onde K é uma constante e t o tempo.

2.4.1 - Período a taxa constante

A taxa de secagem neste período pode ser calculada utilizando a equação de transferência de massa ou equação de transferência de calor. Devido a superfície do material estar úmida e a temperatura do material ser igual a

temperatura de bulbo úmido do ar de secagem despreza-se a transferência de calor por condução e radiação e a taxa de secagem é dada por:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{h A (T_a - T_{bu})}{H_{vap}} \quad (2.16)$$

Onde:

$$\frac{dX}{dt} = \text{taxa de secagem};$$

h = coeficiente de transferência de massa ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);

A = área da superfície exposta, (m^2);

T_a = temperatura ambiente, ($^\circ\text{C}$);

T_{bu} = temperatura de bulbo úmido, ($^\circ\text{C}$);

H_{vap} = Calor de vaporização (J/mol).

A velocidade de secagem durante o período de taxa constante depende de três fatores: dos coeficientes de transferência de energia e massa; da área da superfície onde ocorre a troca de energia e de massa e da diferença entre as temperaturas (ou as pressões de vapor) do ar que envolve o produto e da superfície desse produto. O mecanismo interno de migração de água não influencia a velocidade de secagem durante esse período (FORTES e OKOS, 1980).

Normalmente a equação de transferência de calor dá uma estimativa mais segura da taxa de secagem do que a equação de transferência de massa. Embora correlações para calcular o coeficiente de transferência de calor e de massa tenham sido propostas na literatura (TREYBAL, 1968), poucos dos são disponíveis para permitir que as constantes nestas relações sejam

fixadas com segurança. Estes coeficientes são função da espessura do filme de ar que envolve o produto na secagem e desta forma são afetados pela velocidade do ar e o seu ângulo de colisão sobre a superfície seca. Expresso em termos de fluxo de massa de ar (G), o coeficiente de transferência para fluxo de ar paralelo a superfície do produto é dado por:

$$h = C_1 (G)^{0,8} \quad (2.17)$$

Para o fluxo de ar no ângulo direito da superfície de secagem o coeficiente de transferência de calor é dado por:

$$h = C_2 (G)^{0,4} \quad (2.18)$$

onde C_1 e C_2 são constantes.

As equações acima indicam que aumentando o fluxo de massa de ar acelerará a taxa de secagem. Adicionalmente uma velocidade mais alta minimiza as diferenças de umidade entre o interior e o exterior de um sistema de secagem e desta forma um produto com teor de umidade mais uniforme é obtido.

2.4.2 - Período a taxa decrescente

O primeiro período de taxa decrescente é o período de desidratação da superfície insaturada. Para estimar o tempo médio de secagem durante o primeiro período de taxa decrescente a segunda lei de Fick tem sido usada em diversos trabalhos (CHEN e JOHNSON, 1969; VACCAREZZA et al., 1974; MOWLAH et al., 1983).

CRANK (1975) apresentou diversas soluções analíticas para a equação de difusão, considerando diferentes condições iniciais e de contorno. Tratou também de casos onde a difusividade pode variar de forma linear ou exponencial com a concentração de umidade. Porém, estas situações se aplicam a sólidos com formas geométricas simples e regulares. Em sistema de coordenadas retangulares, a equação de difusão, pode ser escrita do seguinte modo:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Def \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Def \frac{\partial Y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Def \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \quad (2.19)$$

Onde o coeficiente de difusão é um coeficiente que representa a difusividade efetiva e engloba os efeitos de todos os fenômenos podendo intervir sobre a migração da água e seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais.

Assumindo a forma geométrica de uma placa infinita, onde a transferência interna de umidade durante a secagem é apenas em uma direção, a equação acima se reduz a:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(Def \frac{\partial X}{\partial y} \right) \quad (2.20)$$

Quando o coeficiente de difusão D_{ef} , é considerado constante, o conteúdo de umidade inicial X_0 é distribuído uniformemente no interior do produto desprezando as resistências externas a transferência de massa. O teor de umidade na superfície da amostra permanece constante durante o processo e seu valor corresponde ao termo de umidade de equilíbrio X_e do produto.

Considerando-se o ar de secagem e o encolhimento do produto durante a secagem desprezíveis a equação (2.20) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (2.21)$$

Com as seguintes condições de contorno:

$$X = X_o \quad \text{em} \quad t = 0 \quad 0 < y < L \quad (2.22)$$

$$X = X_e \quad \text{em} \quad y = L \quad t > 0 \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial X}{\partial y} = 0 \quad \text{em} \quad y = 0 \quad t > 0 \quad (2.24)$$

Considerando uma distribuição de umidade inicial uniforme e em ausência de qualquer resistências térmicas a solução analítica da Lei de Fick para uma placa plana infinita é dada na forma de séries infinitas (BROOKER et al., 1974; CRANK, 1975):

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2} \right] \quad (2.25)$$

Onde:

X = conteúdo de umidade, g;

X_e = conteúdo de umidade de equilíbrio, g;

X_o = conteúdo de umidade inicial, (g);

$\frac{X - X_e}{X_o - X_e}$ = razão de umidade, decimal base seca;

D_{ef} = difusividade efetiva, (m²/h)

t = tempo (h)

L = espessura média (m).

O termo da direita da equação 2.25 se torna praticamente igual ao primeiro termo da série quando o adimensional de umidade for inferior a 0,6. As expressões se reduzem à seguinte equação:

$$\frac{X - X_e}{X_i - X_e} = C \exp\left(-\pi^2 D_{ef} \frac{t}{L^2}\right) \quad (2.26)$$

Predizer teoricamente a taxa de secagem decrescente é mais complexo que a taxa constante, pois devem ser considerados não somente os mecanismos externos de transferência de calor e massa, mas também os internos do produto (BROOKER et al., 1974). Para a maioria dos materiais biológicos esse período pode ser subdividido em dois regimes, conforme FORTES e OKOS, (1980): (a) a secagem ocorre em uma zona de superfície insaturada, ou seja, não existe continuidade de água em toda a superfície de evaporação. Esta superfície diminui, portanto, a taxa total de evaporação da superfície decresce, sendo chamada zona de superfície insaturada; (b) a região de vaporização encontra-se no interior do material e a razão de secagem é controlada pelo movimento interno de água, sendo essa etapa pouco influenciada pelas condições ambiente é conhecida por zona de controle interno.

Conforme CHIRIFE (1981) os principais mecanismos de transporte no período de taxa decrescente são: difusão líquida, escoamento capilar e difusão de vapor, que podem ocorrer simultaneamente.

KING (1968) cita que na segunda fase do período decrescente, onde a umidade de equilíbrio está abaixo da umidade de saturação, a difusão da fase de vapor é o mecanismo predominante de transferência de umidade.

Apesar da complexidade dos mecanismos de transporte de umidade, VACCAREZZA et al. (1974) encontraram que a Lei de Fick pode ser usada para prever com razoável precisão, o tempo médio de secagem, a distribuição de umidade interna e a temperatura da amostra durante a desidratação de açúcar de beterraba.

2.4.3 - Secadores de leito fixo

Os secadores de leito fixo são secadores caracterizados por apresentar baixo custo e possuir fácil operação. Nesses secadores, o produto permanece estático durante a secagem e o ar aquecido é forçado a passar pela massa do produto. Eles possuem diversas vantagens por serem de configuração bastante simples, resultando num baixo custo de implantação e são muito versáteis uma vez que podem ser utilizados para a secagem de diferentes produtos alimentícios. Este tipo de secador é constituído de uma câmara de secagem, o qual é insuflado por um ventilador. Nos secadores de leito fixo, o ar de secagem movimenta-se da camada inferior para a superfície da massa do produto. A troca de umidade que acontece entre o produto e o ar ocorre em uma região denominada zona de secagem, a qual se move da camada inferior para a superfície da massa, conforme a secagem, dando origem a um gradiente de umidade, o qual não pode ser elevado por comprometer a qualidade do produto final (NUCCI e MURR, 1994 e LIMA, 1995).

BROOKER et al. (1974) relatam que as principais vantagens para este tipo de secador é que a colheita pode ser feita a qualquer ritmo; possui manuseio simplificado e alta eficiência, além de que, a transferência de umidade do produto para o ar ocorre em uma faixa finita. No início da secagem esta faixa encontra-se no fundo do leito, movendo-se através da massa em sentido ascendente de modo que no final o produto se encontre seco.

Os fatores que determinam o gradiente de umidade nos secadores de leito fixo são: o fluxo de ar, a espessura da camada da amostra e a temperatura de secagem. O gradiente será mais elevado quanto menor for o fluxo de ar e quanto maior for a temperatura de secagem e a espessura da camada do produto. Esses fatores também influenciam o consumo de energia e o tempo de secagem do produto (LACERDA FILHO, 1986).

2.4.4 - Encolhimento

Para produtos com alto teor de umidade, como é o caso do gengibre, é notório um encolhimento muito grande, ocorrendo grandes modificações em sua forma original. Por isto, este encolhimento deve estar previsto na modelagem, para que se obtenha melhor representação física do processo de secagem e maior confiabilidade nos coeficientes determinados.

Segundo MIRSA e YOUNG (1980) o encolhimento de produtos agrícolas durante a secagem é um fenômeno físico que ocorre simultaneamente com a difusão de umidade e pode ter um efeito significativo na difusividade mássica, e portanto, na taxa de remoção de umidade. Porém, eles verificaram

que considerar o encolhimento nos modelos de secagem é difícil devido a escassez de informações sobre o coeficiente de encolhimento nem da relação funcional entre encolhimento e difusividade mássica. Eles também verificaram que o encolhimento é função de uma retração livre, relacionada com a perda de água e também elástica, a qual é provocada pelas células adjacentes.

FUSCO et al. (1991) estudaram o encolhimento em modelos difusionais, considerando geometrias diversificadas. Apresentaram estudos do encolhimento representado pelas relações de volume com o teor de umidade e optaram por uma expressão que correlacionava com uma função do terceiro grau. Obtiveram solução numérica pelo método de diferenças finitas, adotando uma malha fixa com a interface móvel, localizada no contorno do material. Em todas as geometrias estudadas, os modelos com encolhimento apresentaram melhores resultados.

O encolhimento do material no processo de secagem, apresenta modificações nas condições de contorno usadas para resolução da segunda Lei de Fick, por isso é de grande importância quantificar esse fenômeno ao se analisar a cinética de secagem (PARK, 1987).

De acordo com MURR (1992) a forma como a água permanece unida ao material restringirá o nível de secagem desse material. Daí a importância de se conhecer a relação de equilíbrio entre sólido e água. A remoção de umidade é limitada por fatores como o encolhimento do material.

Dados experimentais relataram estudos em que o encolhimento de diferentes alimentos é função apenas do teor de umidade (KILPATRICK et al., 1955; SUZUKI et al., 1976; LOZANO et al., 1983). Entretanto, na prática, este fenômeno depende das condições de secagem (VAN ARSDEL et al., 1973).

SUAREZ e VIOLLAZ (1991) observaram o encolhimento em batatas fatiadas com diferentes conteúdos de umidade e diferentes densidades do material. A variação da área superficial com o tempo foi medida inicialmente, considerando o grau de encolhimento da amostra. Foi testado o modelo de Fick com encolhimento para tempos de secagem relativamente pequenos e comprovado que este se adequa aos resultados experimentais com o coeficiente de difusão independente do teor de umidade. No entanto, em termos do modelo difusional, os dados experimentais predizem uma grande dependência do coeficiente de difusão com o teor de umidade. Tal dependência é atribuída a falhas no modelo de Fick e não a razões físicas.

VAGENAS e MARINOS-KOURIS (1991) desenvolveram um modelo matemático para secagem de alimentos levando-se em consideração o encolhimento como parte primordial na operação de secagem, o qual foi baseado nas seguintes suposições: a amostra é tratada de um ponto de vista macroscópico como um sistema pseudo-homogêneo. Durante a secagem, a umidade, a pressão parcial de vapor e temperatura estão em equilíbrio termodinâmico; nenhuma massa de água é produzida ou consumida durante o período de secagem. Eles obtiveram uma boa concordância entre os valores calculados e os dados experimentais.

Já SERENO e MEDEIROS (1990) predisseram as propriedades de difusividade de massa e de calor. O modelo por eles desenvolvido consiste de um sólido poroso, homogêneo e isotrópico, submetido a secagem por ar quente. É descrito por uma equação de conservação de energia e de calor não-estacionário. A equação é simplificada por assumir que o gradiente de temperatura e concentração são as únicas forças motrizes responsáveis pela transferência de calor e massa, respectivamente tendo sido testado na secagem de ervilhas onde foi observado uma diferença média entre os valores experimentais e calculados de 6,1%.

SUZUKI et al. (1976) estudaram o encolhimento de cenoura, batata, batata doce e rabanete utilizando a equação de KILPATRICK et al. (1955) e mostraram que durante os primeiros estágios de secagem, o volume de encolhimento de vegetais e batata é igual ao volume de água eliminada por evaporação, mas para os estágios finais o volume de encolhimento é menor que o volume de água removida. Os autores apresentaram três modelos de secagem (Uniforme 1, Uniforme 2 e o Central) cujas fórmulas relacionam as mudanças na área de superfície e o teor de umidade.

2.4.4.1 - Modelo Uniforme 1

No caso do modelo de secagem uniforme, o encolhimento foi considerado igual ao volume de água perdida por evaporação durante todo o processo de secagem e a mudança na área superficial, devido ao encolhimento, sendo expressa na seguinte equação para materiais de superfície cúbica e esférica:

$$\frac{A}{A_o} = \left(\frac{V}{V_o} \right)^n \quad (2.24)$$

Como o volume da amostra que é submetida à secagem é igual a soma do volume de água perdida e o volume no ponto de equilíbrio, a equação se converte a:

$$\frac{A}{A_o} = \left(\frac{V_e + (p - p_e) / \rho_{H_2O}}{V_e + (p_o - p_e) / \rho_{H_2O}} \right)^n \quad (2.25)$$

Considerando a densidade de água como 1,0g/cm³, tem-se que:

$$\frac{A}{A_o} = \left\{ \frac{p + p_e(1/\rho_e - 1)}{p_o + p_e(1/\rho_e - 1)} \right\}^n \quad (2.26)$$

Onde:

A = área da amostra, (cm²);

A_o = área da amostra inicial, (cm²);

V = volume da amostra, (cm³);

V_e = volume da amostra no equilíbrio, (cm³);

p = peso da amostra, (g);

p_e = peso da amostra no equilíbrio, (g);

ρ_{H_2O} = densidade da água, (g/cm³);

ρ_e = densidade da água no equilíbrio, (g/cm³);

n = coeficiente de encolhimento.

A equação (2.26) pode ser rearranjada da seguinte forma:

$$\frac{A}{A_o} = \left(\frac{X + a}{X_o + a} \right)^n \quad (2.27)$$

sendo:

$$a = X_e(1/\rho_e - 1) + 1/\rho_e \quad (2.28)$$

Onde:

X = conteúdo de umidade da amostra, (g);

X_e = conteúdo de umidade inicial da amostra, (g);

2.4.4.2 - Modelo Uniforme 2

Este modelo é função do conteúdo de umidade e densidades iniciais do produto sendo expresso pela seguinte equação:

$$\frac{A}{A_o} = (bX + c)^r \quad (2.29)$$

Onde:

$$b = \rho_o / (X_o + 1) \quad (2.30)$$

$$c = 1 + b - \rho_o \quad (2.31)$$

Na Equação 2.27 os parâmetros do numerador e do denominador são os mesmos e dependem somente do conteúdo de umidade de equilíbrio e da densidade no ponto de equilíbrio. Se a Equação 2.29 é escolhida para valores experimentais, a mudança na área superficial pode ser calculada pela substituição dos valores iniciais do conteúdo de umidade e densidade do material, os quais são facilmente medidos.

2.4.4.3 – Modelo Central

O modelo de secagem central baseia-se na suposição de que durante o processo de secagem se forma uma camada seca na superfície do material submetido a secagem e o centro do material permanece com um teor de umidade mais elevado. Se a densidade do material no seu ponto central é igual a sua densidade no ponto de equilíbrio de secagem, a área superficial para o conteúdo médio de umidade pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\frac{A}{A_o} = (k X + p)^n \quad (2.32)$$

Onde:

$$k = (p - \mu) / (X_o - X_e) \quad (2.33)$$

$$p = (\mu X_o - X_e) / (X_o - X_e) \quad (2.34)$$

$$\mu = (X_o + 1) \rho_o / (X_e + 1) \rho_e \quad (2.35)$$

A Equação (2.32) representa o encolhimento quando este é proporcional ao volume de água perdida durante a secagem.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Medidas Físicas da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, SP.

3.1 - Matéria-prima

Foram utilizados rizomas de gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) fornecidos pela Empresa Alencar Lima e Engenharia, Pavimentação e Saneamento Ltda. A origem dos rizomas foi de Taperaí, localizado no Estado de São Paulo. O local de colheita foi em Juquiá, no Vale do Ribeira e esta colheita foi realizada na primeira safra de julho de 1995. As amostras foram acondicionadas em um freezer horizontal à temperatura de $-18 \pm 2^{\circ}\text{C}$, visando a preservação de suas características para realização do trabalho.

Durante a execução do trabalho, as amostras eram retiradas do freezer e colocadas à temperatura ambiente de laboratório, para que entrasse em equilíbrio com essa temperatura, para logo depois serem trituradas em um multiprocessador.

Posteriormente, foram feitas análises da composição centesimal do produto, ou seja, determinação do conteúdo de umidade, açúcares, lipídeos,

proteínas, fibras e cinzas e também a densidade do gengibre. A descrição metodológica das análises e do conhecimento da densidade encontram-se detalhadas nos itens de 1 a 7 do Apêndice A.

As etapas seguintes a composição centesimal constaram do estudos das isotermas de sorção; ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais; elaboração de um planejamento experimental; levantamento de curvas de secagem; estudo do modelo de difusão sem encolhimento; modelo de difusão com encolhimento; avaliação do encolhimento e cálculo do calor isostérico.

3.2 - Métodos

3.2.1 - Determinação do conteúdo de umidade

Para a determinação do conteúdo de umidade do gengibre foi utilizado o método descrito pela A.O.A.C. (1984) que recomenda o uso de cadinhos de papel alumínio secos a 100°C em estufa (Marca FANEM Modelo 320-SE) com massa conhecida. As amostras, em triplicatas, foram levadas a estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de 100°C por 3 horas. Todas as medidas de massa foram feitas em balança analítica (Marca BOSCH, Modelo SAE 200).

3.2.2 - Determinação dos lipídeos

A metodologia utilizada baseou-se na extração contínua em aparelho tipo Soxhlet. Trata-se de um processo gravimétrico, baseado na perda de peso do material submetido à extração com éter etílico ou na quantidade de material dissolvido pelo solvente.

3.2.3 - Determinação da proteína

Para a determinação da proteína foi utilizado o método de Micro-Kjeldahl que toma para cada 100g de proteína a existência de 16g de nitrogênio, obtendo-se desse modo o fator 6,25 que multiplicado pelo percentual de nitrogênio total da amostra, fornece o percentual de proteína da mesma. Deste modo, o nitrogênio total da amostra foi convertido em nitrogênio proteico.

3.2.4 - Determinação de fibras

Foi realizada através de digestão em meio ácido, seguida da digestão em meio alcalino, cujo resíduo representou a fibra bruta, conforme metodologia de Hennenberg.

3.2.5 - Determinação de cinzas

Esta determinação foi realizada através da queima da matéria orgânica, ou seja, incinerou-se amostras de gengibre em um bico de gás e depois

de carbonizadas foram levadas a uma mufla com temperatura de 550°C para total destruição da matéria orgânica. O teor de cinzas é considerado como média geral de qualidade e normalmente é usado como critério na identificação dos alimentos. A cinza é composta de cálcio, magnésio, ferro, fósforo, chumbo, mercúrio e outros componentes minerais.

3.2.6 - Determinação da densidade

O cálculo da densidade consistiu na imersão de uma amostra de gengibre em uma proveta de volume conhecido (100 ml). O material usado foi o tolueno e através do deslocamento do volume e variação da massa seu valor foi encontrado.

3.2.7 - Determinação dos açúcares

Para esta determinação foi utilizado o método Antrona que fundamenta-se na hidrólise pelo ácido sulfúrico concentrado, que quando aquecido com a hexose sofre reação de condensação, formando um produto de coloração verde, cuja intensidade da cor é lida em espectrofotômetro a 620nm.

3.2.8 - Isotermas de sorção

Para a avaliação das isotermas de sorção, as amostras de gengibre sem e com casca, foram obtidas triturando-as em um processador elétrico de alimentos da Marca Walitta e em seguida, preparavam-se amostras para o estudo.

Para as isotermas de adsorção, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada (Marca FANEM, Modelo 320-SE) com temperatura de $50 \pm 1^\circ\text{C}$ por aproximadamente 5 horas. Ao serem retiradas da estufa eram levadas a um dessecador com Pentóxido de Fósforo (P_2O_5) durante uma semana, para garantir a retirada total de umidade. Os dados de umidade de equilíbrio para as temperaturas de 29, 35, 50, 65 e 71°C , foram obtidos pelo método gravimétrico com registro descontínuo da variação de peso, utilizando estufas de circulação forçada (Marca FANEM, Modelo 002 CB e 320-SE).

Quantidades conhecidas de amostra foram colocadas em cadinhos preparadas com papel alumínio. Os cadinhos foram colocados em potes de vidro hermeticamente fechados (Marca Anchor Hocking). Cada um recebeu uma solução saturada de um determinado sal inorgânico (Tabela 3.1), o que promoveu ambientes com diferentes umidades relativas em seu interior (GREENSPAN, 1977). Para cada temperatura foram usadas oito soluções diferentes de sais e as medidas foram feitas em triplicata. Os cadinhos foram pesados periodicamente em balança analítica (Marca Bosch, Modelo SAE 200) até que a massa se tornasse constante. Nesse ponto, pode-se dizer que a amostra atingiu o equilíbrio, determinando-se então a massa seca da amostra.

As umidades de equilíbrio (em base seca) foram calculadas da seguinte forma:

$$X_{eq} = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (3.1)$$

Onde:

X_{eq} = umidade de equilíbrio em base seca;

m_{eq} = massa da amostra quando atingido o equilíbrio;

m_s = massa seca da amostra.

Tabela 3.1 - Dados de umidade de equilíbrio obtidos com soluções saturadas de sais inorgânicos para as temperaturas de 29, 35, 50 65 e 71°C

Temperatura (°C)	Sal	Umidade relativa (%)
29	LiCl	11,28
	MgCl ₂ 6H ₂ O	32,44
	K ₂ CO ₃	43,16
	NaBr	56,09
	KI	67,89
	NaCl	75,09
	KCl	83,62
35	LiCl	11,25
	KF	24,59
	MgCl ₂ 6H ₂ O	32,05
	Mg(NO ₃) ₂	49,91
	KI	66,96
	NaNO ₃	72,06
	NaCl	74,87
50	KCl	82,95
	LiCl	11,10
	KF	20,80
	MgCl ₂ 6H ₂ O	30,54
	Mg(NO ₃) ₂	45,44
	KI	64,49
	NaNO ₃	69,04
65	NaCl	74,43
	KCl	81,20
	LiCl	10,86
	KF	21,18
	MgCl ₂ 6H ₂ O	28,54
	NaBr	49,49
	KI	62,50
71	NaNO ₃	66,64
	NaCl	74,71
	KCl	79,85
	LiCl	10,75
	MgCl ₂ 6H ₂ O	27,77
	K ₂ CO ₃	43,17
	NaBr	49,70
	KI	61,93
	NaCl	75,06
	KCl	79,49

Fonte: GREENSPAN, 1977.

3.2.9 - Ajuste dos modelos

Visando definir um modelo para a determinação das isotermas de sorção do gengibre, foram utilizados alguns modelos propostos na literatura para ajustar os dados obtidos experimentalmente, para a cinética de secagem deste produto, superfície de resposta, modelo difusional e o estudo do encolhimento.

A ferramenta utilizada foi o pacote estatístico STATISTICA 5.0, contendo vários modelos que se aplica a métodos de regressão não-linear. Os critérios usados para escolha do melhor ajuste foram o coeficiente de determinação (R^2) entre as respostas observadas e os valores previstos pelo modelo ajustado (BARROS NETO et al., 1995) e o módulo do desvio relativo médio (P), definido como a média da porcentagem de diferença relativa entre valores experimentais e preditos (LOMAURO et al., 1985).

$$P = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|(M_i - M_{pi})|}{M_i} \quad (3.2)$$

Onde:

M_i = valores preditos pelo modelo;

M_{pi} = valores obtidos experimentalmente.

Com base nesta equação, tem-se que os melhores ajustes são os que apresentam maior R^2 e menor P , ou seja, R^2 próximo da unidade e P menor que 10%.

3.2.10 - Planejamento experimental

Inicialmente, foram definidas as variáveis do processo a serem estudadas. A temperatura e a velocidade do ar eram dependentes do tempo de secagem para os cortes longitudinais e transversais sem e com casca.

Fixou-se a temperatura em 35, 50 e 65°C e velocidade do ar 1,0, 1,5 e 2,0m/s, ou seja, diferenças de temperaturas de 15°C e velocidades do ar de 0,5m/s, variando-se o tempo conforme o decorrer da secagem em intervalos de tempo regulares. Este estudo foi muito importante para definir as faixas ótimas de otimização.

Para escolha desta faixa de temperatura foram considerados estudos preliminares na secagem de gengibre por NUCCI e MURR (1994) utilizando temperaturas de 30, 45 e 70°C, uma vez que temperaturas maiores que estas provocariam perda de outros componentes além do conteúdo de umidade.

Utilizou-se um planejamento fatorial de dois níveis, temperatura (T) e velocidade do ar (V_{ar}) e observou-se a influência de quatro variáveis independentes sobre a variável dependente, o conteúdo de umidade final $[(X - X_e)/(X_o - X_e)]$. As variáveis independentes foram denominadas da seguinte forma:

UMIDSC1 => Conteúdo de umidade sem casca para o corte transversal;

UMIDSC2 => Conteúdo de umidade sem casca para o corte longitudinal.

UMIDCC1 => Conteúdo de umidade com casca para o corte transversal;

UMIDCC2 => Conteúdo de umidade com casca para o corte longitudinal.

Para o estudo que abrange muitas variáveis, o método de planejamento experimental permite a realização, de forma organizada, de uma quantidade mínima de experimentos. Na Tabela 3.2 encontram-se os valores reais e codificados para o planejamento fatorial.

Tabela 3.2 - Valores reais e os níveis dos fatores estudados para um planejamento fatorial

Variáveis	Níveis		
	-1	0	+1
Temperatura (°C)	35	50	65
Velocidade do ar (m/s)	1,0	1,5	2,0

Com o objetivo da otimização do processo de secagem de gengibre, ampliaram-se as faixas de variação no estudo das variáveis observadas para um planejamento de dois níveis. Obtiveram-se modelos matemáticos empíricos de 1ª e 2ª ordem, modelo linear e quadrático, respectivamente, realizando-se um planejamento fatorial 2^2 + "configuração estrela" com deslocamento axial (níveis - α , -1, 0, +1, + α).

O deslocamento axial dado por BOX e WILSON (1951) é:

$$\alpha = (2^K)^{1/4} \quad (3.3)$$

Onde:

K = número de variáveis independentes ($K = 2$), logo:

$$\alpha = 1,4142.$$

Como o planejamento experimental possui uma metodologia baseada em técnicas estatísticas é de necessária importância a avaliação dos modelos empíricos obtidos através da regressão dos dados experimentais (SILVA, 1998).

Sendo o exame dos resíduos, uma ferramenta importante na avaliação da qualidade do ajuste de qualquer modelo, organizou-se a Tabela 3.3, conhecida como tabela de Análise de Variância ou ANOVA ("Analysis of Variance"), resume toda a análise estatística que avalia a qualidade do ajuste do modelo (BARROS NETO et al., 1995).

Tabela 3.3 - Análise de variância

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	SQ_R	MQ_R	$L - 1$	MQ_R/MQ_r
Resíduos	SQ_r	MQ_r	$N - L$	-
Falta de ajuste	SQ_{faj}	MQ_{faj}	$M - L$	-
Erro puro	SQ_{ep}	MQ_{ep}	$N - M$	-
Total	SQ_T	-	$N - 1$	-
Qualidade do ajuste	$Ra^2 = SQ_R/SQ_T$	-	-	-
Coefficiente de determinação	Ra	-	-	-
F tabelado	-	-	-	$F_{confiança,L-1,N-L}$

Onde:

SQ_R = soma quadrática devida à regressão (modelo ajustado);

MQ_R = média quadrática devida à regressão;

SQ_r = soma quadrática residual (desvio);

MQ_r = média quadrática residual;

SQ_{faj} = soma quadrática devida à falta de ajuste;

MQ_{faj} = média quadrática devida à falta de ajuste;

SQ_{ep} = soma quadrática devida ao erro puro;

MQ_{ep} = média quadrática devida ao erro puro;

SQ_T = soma quadrática em torno da média;

L = número de termos do modelo completo;

M = número de níveis distintos;

N = número total de experimentos.

A Tabela 3.4 mostra os valores reais e os níveis dos fatores estudados no planeamento.

Tabela 3.4 - Valores reais e os níveis dos fatores estudados para um planeamento fatorial completo (2^2) do processo

Variáveis	Níveis				
	-1,4142	-1	0	+1	+1,4142
Temperatura (°C)	29	35	50	65	71
Velocidade do ar (m/s)	0,8	1,0	1,5	2,0	2,2

Desta maneira, para cada corte de gengibre foi realizado 11 experimentos (8 experimentos + 3 repetições no ponto central), totalizando 22 experimentos para a secagem do gengibre sem casca e 22 experimentos com casca em secador de leito fixo, com o objetivo de se obter as condições ótimas do processo.

Na Tabela 3.5 encontra-se a matriz do planejamento de experimentos. As superfícies de resposta foram construídas a partir da escolha dos melhores modelos.

TABELA 3.5 - Matriz do planejamento de experimentos em sua forma codificada e real, respectivamente

Ensaio	Temperatura		Velocidade do ar	
	codificada	real (°C)	codificada	real (m/s)
01	-1	35	-1	1,0
02	+1	65	-1	1,0
03	-1	35	+1	2,0
04	+1	65	+1	2,0
05	0	50	0	1,5
06	0	50	0	1,5
07	0	50	0	1,5
08	-1,4142	29	0	1,5
09	0	50	+1,4142	2,2
10	+1,4142	71	0	1,5
11	0	50	-1,4142	0,8

3.2.11 - Curvas de secagem

Vários equipamentos foram necessários para realização desta etapa. Entre eles, os principais equipamentos foram: balança analítica; psicrômetro; estufa com circulação forçada de ar; termômetro; controlador de temperatura (Modelo CDC 99 Contemp), resistências elétricas; anemômetro (Modelo LCA 6000 Air flow Co); termopares, sílica-gel; e dessecadores. O equipamento utilizado para o levantamento das curvas de secagem é mostrado na Figura 3.1 e 3.2, construído segundo BROD et al. (1994).

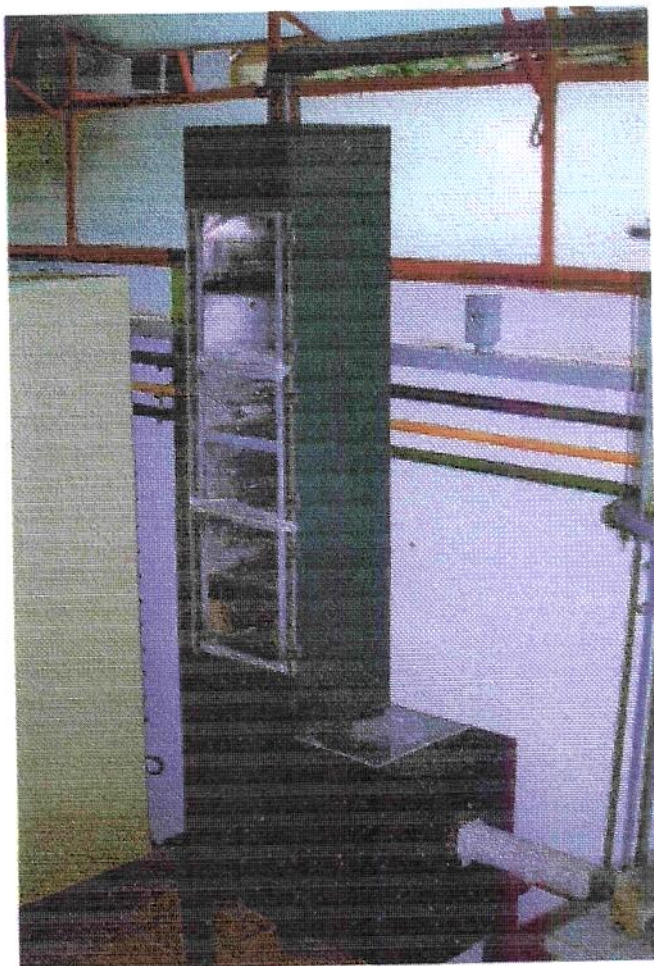


Figura 3.1 - Secador de leito fixo.

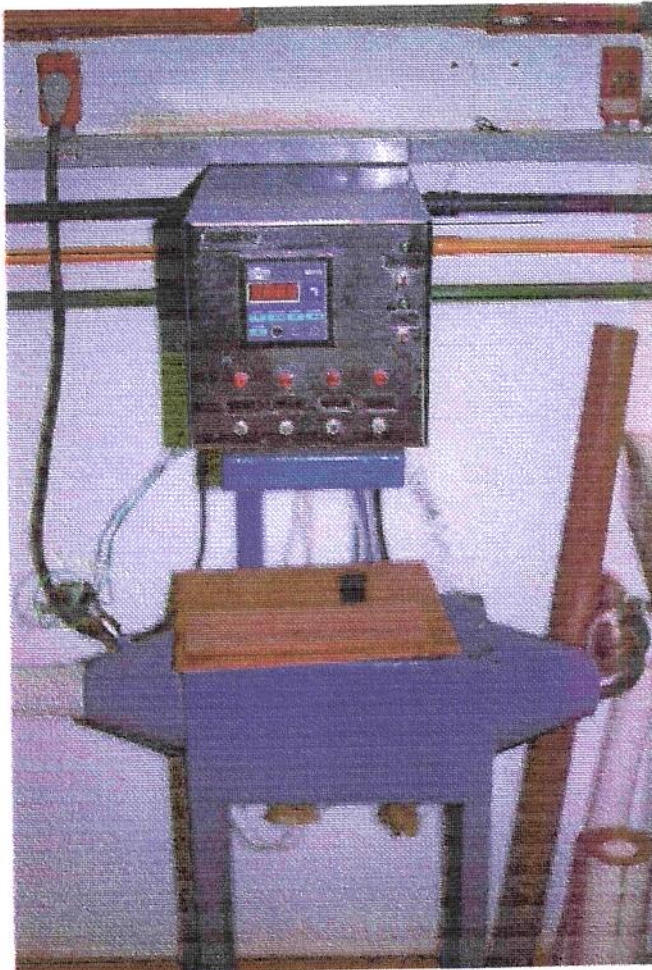


Figura 3.2 - Detalhe da unidade de aquecimento e controle do ar de secagem

O secador possui seis gavetas para a colocação das amostras, sendo aquecido por três conjuntos de resistências de 800, 1600 e 1600W, que podem ser acionadas independentemente, sendo controladas por um termostato digital. Conforme detalhe da Figura 3.2, podemos observar o painel de controle em uma caixa metálica, que contém as resistências. As curvas de secagem foram levantadas para cinco níveis de temperatura: 29, 35, 50, 65 e 71°C e cinco níveis de velocidade do ar: 0,8, 1,0, 1,5, 2,0 e 2,2m/s, conforme o planejamento experimental. Utilizamos gengibre sem e com casca e dois diferentes tipos de cortes, transversal e longitudinal às fibras de gengibre.

Foram utilizadas triplicatas de cada amostra. A espessura dos cortes das amostras foram de aproximadamente 0,5m e o teor de umidade perdida durante a secagem foi obtido por pesagens descontínuas das amostras. O esquema de pesagem seguiu intervalos de cinco em cinco minutos, seguidos de intervalos de 15, 30 e 60 minutos até o final do processo.

Mediu-se durante a secagem, a temperatura de bulbo úmido e bulbo seco através de um psicrômetro colocado no interior do secador, para se conhecer a umidade relativa do ar de secagem. Com um anemômetro, conseguiu-se medir as velocidades do ar ajustadas através de uma válvula reguladora tipo globo (Marca Worcester).

Foi utilizada uma camada de sílica-gel, na primeira gaveta do secador, para que não surgissem mudanças significativas na umidade do ar de secagem.

Os testes foram realizados até que as variações do peso das amostras fossem insignificantes. Depois disto foi determinada a massa seca das amostras, conforme método descrito no item 3.2.1.

3.2.12 - Modelo de difusão sem encolhimento

A análise do processo de secagem, os ajustes das curvas experimentais e o cálculo da difusividade efetiva foram realizadas com base na Segunda Lei de Fick para uma placa plana infinita como mostrada na Equação 2.19.

Neste caso, foram usados valores da meia espessura inicial das amostras e também a meia espessura média, obtida pela média aritmética das medidas iniciais e finais das amostras.

3.2.13 - Modelo de difusão com encolhimento

A difusividade efetiva considerando o encolhimento foi determinada substituindo na Equação 2.19 o termo adimensional do conteúdo de umidade pela concentração de umidade (PARK, 1987) como se segue:

$$\frac{C - C_e}{C_o - C_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 x^2}{4} \right] \quad (3.3)$$

Onde:

C = concentração de umidade, X/V , (g.H₂O/g.ms. m³);

C_e = concentração de umidade de equilíbrio, X_e/V_e (g.H₂O/g.ms.m³);

C_o = concentração de umidade inicial, X_o/V_o , (g.H₂O/g.ms. m³).

Os volumes das amostras (V, V_o, V_e) foram obtidos multiplicando-se a área planimetrada pela espessura média da amostra.

3.2.14 - Estudo do encolhimento

Para o estudo do encolhimento durante a secagem utilizou-se balança analítica; provetas de 100ml; tolueno; máquina fotográfica; padrão referencial (régua milimetrada) e planímetro.

Durante a secagem foram fotografadas as amostras de gengibre para que se obtivessem as áreas. Foi usado um planímetro com uma régua milimetrada como referência. No Apêndice B são mostradas as fotos utilizadas no cálculo das áreas para uma corrida de secagem para o gengibre sem e com casca. Estas fotografias foram retiradas de hora em hora, até que não houvessem mais variações de peso da amostra.

Os dados das áreas das amostras obtidas, conforme descrito, foram utilizados nos modelos de SUZUKI et al. (1976) de acordo com o item 2.4.3, ou seja, utilizou-se o modelo de secagem Uniforme 1, modelo de secagem Uniforme 2, e o modelo de secagem Central.

Com os dados de encolhimento e os modelos de Suzuki foi possível correlacionar os valores experimentais através de regressão não linear de forma a se obter os valores dos coeficientes de encolhimento (n) para os três modelos.

3.2.15 – Cálculo do calor isostérico

O cálculo do calor isostérico foi realizado a partir das isotermas de sorção através do método estático, tendo sido ajustadas pela equação de GAB, em função do conteúdo de umidade do gengibre sem e com casca, com o objetivo de se analisar os parâmetros energéticos de atividade de água. Fez-se uma regressão linear dos dados do logaritmo neperiano da atividade da água com o inverso da temperatura a diferentes umidades e aplicou-se a equação 2.14 para o seu cálculo, tanto para a dessorção como para a adsorção de cada amostra.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Composição centesimal

Conforme pode ser observado na Tabela 4.1, a composição centesimal varia de acordo com o tratamento e observa-se que o conteúdo de umidade do gengibre apresenta uma composição média do conteúdo de umidade em aproximadamente 84%.

Tabela 4.1 – Análise físico-química do gengibre “in natura”

Análises	Gengibre sem casca	Gengibre com casca
Conteúdo de umidade (%)	82,6±0,11	85,5±0,10
Lipídeos (%)	0,31±0,01	0,33±0,01
Proteína (%)	1,56±0,06	1,79±0,06
Fibras (%)	1,30±0,07	1,25±0,06
Cinzas(%)	0,67±0,03	0,78±0,03
Açúcares (%)	8,23±0,07	8,44±0,05
Densidade (g/cm ³)	0,95±0,01	0,97±0,01

Todos os resultados da composição centesimal encontram-se na faixa descrita por FRANCO (1992), BENDER (1982) e ISHIMURA et al. (1988) (Tabela 2.1), mostrando que o congelamento da matéria-prima não afeta as características químicas da mesma. Exceção apenas para o teor de lipídeos que

em nosso caso (0,31 a 0,33%) foi bem menor que os demais, cujos valores estão entre 1,3 a 2,4%. Verifica-se que o teor de açúcares das amostras de gengibre tiveram um valor bem significativo quando relacionado com os demais componentes aqui encontrados. Desta forma, podemos enquadrá-lo como um produto açucarado.

A densidade média do gengibre sem e com casca foi de $0,96\text{g/cm}^3$ e nota-se que este valor se aproxima bastante da densidade da água (1g/cm^3).

Analisando-se todos os dados de composição centesimal para o gengibre sem e com casca, observa-se um pequeno aumento nos resultados para o gengibre com casca.

4.2 - Isotermas de sorção

Os conteúdos de umidade de equilíbrio (X_e) utilizado nas curvas de sorção foram escolhidos na região em que as umidades do gengibre variaram muito pouco com o tempo, mostrando-se praticamente estáveis.

Os valores das Tabelas 4.2 e 4.3, obtidos experimentalmente, representam a umidade de equilíbrio para a dessorção e adsorção, respectivamente. A estes dados aplicou-se os modelos de BET, GAB, Halsey, Oswin e Smith, para escolher o que melhor representasse o fenômeno de secagem de modo que os conteúdos de umidade respondessem bem as variações de temperatura.

Tabela 4.2 - Dados experimentais de umidades de equilíbrio de dessorção de gengibre na temperatura de 29, 35, 50, 65 e 71°C

Temperatura (°C)	Atividade de água (a_w)	Umidade de equilíbrio	
		Gengibre sem casca	gengibre com casca
29	0,3244	0,0721	0,0556
	0,4316	0,0894	0,0790
	0,5609	0,1202	0,0993
	0,6789	0,1506	0,1313
	0,7509	0,1617	0,1558
	0,8362	0,2096	0,1973
35	0,1125	0,0345	0,0187
	0,2459	0,0533	0,0484
	0,3205	0,0694	0,0632
	0,4991	0,0989	0,0915
	0,6696	0,1314	0,1198
	0,7206	0,1619	0,1331
	0,7487	0,1669	0,1552
50	0,8295	0,2389	0,2023
	0,1110	-	0,0244
	0,2080	0,0315	0,0474
	0,3054	0,0422	0,0539
	0,4544	0,0579	0,0819
	0,6449	0,1466	0,1265
	0,6904	0,1683	0,1522
	0,7443	0,1815	0,1822
65	0,8120	0,2033	0,2119
	0,1086	-	0,0123
	0,2118	0,0414	0,0255
	0,2854	0,0440	0,0325
	0,4949	0,0767	0,0413
	0,6250	0,1442	0,0744
	0,6664	0,1513	0,1044
	0,7471	0,2094	0,1456
71	0,7985	0,2418	0,2052
	0,1075	-	0,0218
	0,2777	0,0446	0,0254
	0,4317	0,0539	0,0381
	0,4970	0,0808	0,0650
	0,6193	0,1642	0,1159
	0,7506	0,2132	0,1580
	0,7949	0,2713	0,2224

Resultados e discussão

Tabela 4.3 - Dados experimentais de umidades de equilíbrio de adsorção de gengibre na temperatura de 29, 35, 50, 65 e 71°C

Temperatura (°C)	Umidade de equilíbrio		
	Atividade de água (a_w)	Gengibre sem casca	gengibre com casca
29	0,1128	0,0287	0,0241
	0,3244	0,0752	0,0669
	0,4316	0,0917	0,0934
	0,5609	0,1242	0,1075
	0,6789	0,1560	0,1337
	0,7509	0,1650	0,1599
	0,8362	0,2040	0,2034
35	0,1125	0,0329	0,0287
	0,2459	0,0513	0,0531
	0,3205	0,0648	0,0654
	0,4991	0,1019	0,0901
	0,6696	0,1475	0,1303
	0,7206	0,1900	0,1506
	0,7487	0,2222	0,1828
	0,8295	0,2550	0,2324
50	0,1110	-	0,0250
	0,2080	0,0371	0,0414
	0,3054	0,0558	0,0584
	0,4544	0,0849	0,0925
	0,6449	0,1317	0,1489
	0,6904	0,1498	0,1748
	0,7443	0,1782	0,2058
	0,8120	0,2487	0,2579
65	0,1086	-	0,0230
	0,2118	0,0531	0,0412
	0,2854	0,0776	0,0593
	0,4949	0,1145	0,0786
	0,6250	0,1466	0,1262
	0,6664	0,1679	0,1468
	0,7471	0,1959	0,1718
	0,7985	0,2434	0,1973
71	0,1075	-	-
	0,2777	0,0507	0,0290
	0,4317	0,0608	0,0507
	0,4970	0,0966	0,0655
	0,6193	0,1690	0,1209
	0,7506	0,2350	0,1615
	0,7949	0,2597	0,2264

As Tabelas 4.4 a 4.8 para os dados de dessorção e as Tabelas 4.9 a

4.13 para os resultados de adsorção apresentam as constantes para os modelos testados (BET, GAB, Halsey, Oswin e Smith) ajustados para cada uma das temperaturas estudadas. Apresenta também os coeficientes de determinação obtidos através dos resultados e verifica-se que as constantes dos modelos variavam com a temperatura o que concorda com afirmação de KAPSALIS (1981)

Tabela 4.4 - Parâmetros de ajustes da isoterma de dessorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 29°C

Modelos	Cortes	Parâmetros			R ²	P(%)
		Xm	C	n		
BET	sem casca	0,0505	125827	10	0,993	2,93
	com casca	0,0486	8,4700	10	0,998	2,37
GAB	sem casca	Xm	C	k	0,996	2,13
	com casca	0,0790	6,5957	0,7740	0,999	1,47
Halsey	sem casca	a ⁿ	b		0,982	5,04
	com casca	0,0097	1,8781		0,998	4,88
Oswin	sem casca	a	b		0,996	2,92
	com casca	0,0133	1,6233		0,998	2,57
Smith	sem casca	Ma	Mb		0,970	6,51
	com casca	0,1039	0,4315		0,991	3,43

Tabela 4.5 - Parâmetros de ajustes da isoterma de dessorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 35°C

Modelos	Cortes	Parâmetros			R ²	P(%)
		Xm	C	n		
BET	sem casca	0,0472	16,948	10	0,999	6,70
	com casca	0,0483	8,7887	10	0,975	12,3
GAB	sem casca	Xm	C	k	0,990	5,74
	com casca	0,0546	14,314	0,9304	0,985	10,30
Halsey	sem casca	a ⁿ	b		0,986	7,96
	com casca	0,0235	1,4332		0,968	18,04
Oswin	sem casca	a	b		0,988	4,95
	com casca	0,0182	1,4645		0,984	11,16
Smith	sem casca	Ma	Mb		0,975	8,56
	com casca	0,1181	0,0158		0,973	11,75

Tabela 4.6 - Parâmetros de ajustes da isoterma de dessorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 50°C

Modelos	Cortes	Parâmetros			R ²	P(%)
BET	sem casca	Xm	C	n	0,983	8,22
	com casca	0,0621	2,2760	10	0,996	3,72
GAB	sem casca	Xm	C	k	0,982	9,12
	com casca	14,194	0,0178	0,4367	0,996	4,00
Halsey	sem casca	a"			0,992	22,74
	com casca	0,0323	1,2538		0,984	9,83
Oswin	sem casca	a	b		0,959	14,97
	com casca	0,0883	0,6329		0,978	5,16
Smith	sem casca	Ma	Mb		0,991	11,10
	com casca	0,1308	-0,001		0,995	4,69

Tabela 4.7 - Parâmetros de ajustes da isoterma de dessorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 65°C

Modelos	Cortes	Parâmetros			R ²	P(%)
BET	sem casca	Xm	C	n	0,991	8,52
	com casca	0,0748	1,5654	10	0,976	18,5
GAB	sem casca	Xm	C	k	0,992	6,97
	com casca	0,0865	1,7986	0,8923	0,993	8,59
Halsey	sem casca	a"	b		0,981	9,11
	com casca	0,4980	1,0966		0,989	12,98
Oswin	sem casca	a	b		0,991	6,89
	com casca	0,0923	0,7201		0,9985	15,86
Smith	sem casca	Ma	Mb		0,986	8,71
	com casca	0,1504	-0,005		0,917	23,24

Tabela 4.8 - Parâmetros de ajustes da isoterma de dessorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 71°C

Modelos	Cortes	Parâmetros			R ²	P(%)
BET	sem casca	Xm	C	n	0,981	11,77
	com casca	0,0911	0,9842	10	0,980	9,65
GAB	sem casca	Xm	C	k	0,980	11,98
	com casca	5,1159	0,0271	0,6264	0,983	8,43
Halsey	sem casca	a''	b		0,961	11,87
	com casca	0,0640	0,9875		0,973	10,86
Oswin	sem casca	a	b		0,977	10,60
	com casca	0,0906	0,8111		0,982	9,34
Smith	sem casca	Ma	Mb		0,967	15,15
	com casca	0,1730	-0,018		0,956	13,00

Tabela 4.9 - Parâmetros de ajustes da isoterma de adsorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 29°C

Modelos	Cortes	Parâmetros			R ²	P(%)
BET	sem casca	Xm	C	10	0,985	9,81
	com casca	0,0523	15,834	10	0,988	8,87
GAB	sem casca	Xm	C	k	0,999	2,31
	com casca	0,1090	4,1869	0,6558	0,995	5,19
Halsey	sem casca	a''	b		0,968	5,95
	com casca	0,0076	2,0226		0,990	3,30
Oswin	sem casca	a	b		0,993	3,80
	com casca	0,1079	0,4008		0,999	2,39
Smith	sem casca	Ma	Mb		0,964	9,18
	com casca	0,1087	0,0201		0,978	7,73

Tabela 4.10 - Parâmetros de ajustes da isoterma de adsorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 35°C

Modelos	Cortes	Parâmetros			R ²	P(%)
BET	sem casca	Xm	C	n	0,986	6,32
	com casca	0,0655	5,0281	10	0,981	5,82
GAB	sem casca	Xm	C	k	0,987	6,84
	com casca	0,0855	3,9129	0,8478	0,993	5,01
Halsey	sem casca	a"	b		0,969	13,67
	com casca	0,0316	1,3656		0,986	8,96
Oswin	sem casca	a	b		0,986	6,58
	com casca	0,1086	0,5650		0,993	4,86
Smith	sem casca	Ma	Mb		0,984	5,97
	com casca	0,1412	0,0010		0,981	7,77

Tabela 4.11 - Parâmetros de ajustes da isoterma de adsorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 50°C

Modelos	Cortes	Parâmetros			R ²	P(%)
BET	sem casca	Xm	C	n	0,998	8,08
	com casca	0,0648	2,4408	10	0,996	5,22
GAB	sem casca	Xm	C	k	0,998	3,00
	com casca	0,0524	6,4915	0,9800	0,999	1,69
Halsey	sem casca	a"	b		0,997	4,34
	com casca	0,0410	1,1615		0,990	12,08
Oswin	sem casca	a	b		0,996	3,52
	com casca	0,0898	0,6768		0,998	2,62
Smith	sem casca	Ma	Mb		0,984	6,60
	com casca	0,1370	0,0004		0,992	4,24

Tabela 4.12 - Parâmetros de ajustes da isoterma de adsorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 65°C

Modelos	Cortes	Parâmetros			R ²	P(%)
BET	sem casca	Xm	C	n	0,999	4,36
	com casca	0,0631	9,4759	10	0,995	4,28
GAB	sem casca	Xm	8	k	0,996	3,75
	com casca	0,0719	8,4479	0,8927	0,993	3,98
Halsey	sem casca	a"	b		0,990	2,36
	com casca	0,0241	1,5513		0,996	13,65
Oswin	sem casca	a	b		0,997	3,49
	com casca	0,1147	0,5295		0,993	6,57
Smith	sem casca	Ma	Mb		0,984	5,39
	com casca	0,1387	0,0154		0,990	5,93

Tabela 4.13 - Parâmetros de ajustes da isoterma de adsorção do gengibre sem e com casca para a temperatura de 71°C

Modelos	Cortes	Parâmetros			R ²	P(%)
BET	sem casca	Xm	C	n	0,999	8,90
	com casca	0,0843	1,5038	10	0,999	6,84
GAB	sem casca	Xm	C	k	0,986	9,67
	com casca	26,000	0,0078	0,5390	0,985	6,05
Halsey	sem casca	a"	b		0,990	13,64
	com casca	0,0553	1,0993		0,999	11,78
Oswin	sem casca	a	b		0,966	10,6
	com casca	0,0906	0,8111		0,982	6,08
Smith	sem casca	Ma	Mb		0,999	10,88
	com casca	0,1724	-0,011		0,997	9,80

Pode-se verificar, nessas tabelas, que todos os modelos estudados apresentaram um bom ajuste para as isotermas de dessorção e adsorção à 29°C, para o gengibre sem e com casca.

Todos os modelos ajustaram muito bem as isotermas de dessorção à 35°C de gengibre sem casca, enquanto para o gengibre com casca os modelos encontraram-se acima do valor esperado, sendo que o modelo de GAB foi o que apresentou o menor desvio ($P = 10,3\%$). Para o gengibre sem e com casca, no caso da adsorção, nesta temperatura, ocorreu um desvio médio acima do esperado apenas para o modelo de Halsey.

Para o gengibre com casca à 50°C, todos os modelos apresentaram um bom ajuste aos dados experimentais na dessorção. O mesmo ocorreu com as isotermas de adsorção de gengibre sem casca. Os modelos de BET e GAB foram os que ajustaram as isotermas de dessorção para gengibre sem casca. Para as isotermas de adsorção com casca, nessa temperatura, apenas o modelo de Halsey apresentou desvio médio acima do razoável, ou seja, apresentaram desvio médio maior que 10%.

As isotermas de dessorção e adsorção de gengibre sem casca à 65°C também se ajustaram muito bem para todos os modelos, enquanto que para o gengibre com casca só o modelo ajustado por GAB forneceu valores que predizem com maior segurança a isoterma de dessorção. Para adsorção, para o gengibre com casca, apenas o modelo de Halsey não mostrou um bom ajuste.

Para a isoterma de dessorção à 71°C, no caso de gengibre sem casca, todos os modelos obtiveram um coeficiente de correlação bom, apesar do desvio ter sido maior que o esperado. Para o gengibre com casca os modelos de BET, GAB e Oswin mostraram um bom ajuste.

Para a isoterma de adsorção de gengibre com e sem casca à 71°C o modelo de Halsey foi o único que apresentou um desvio elevado apesar do coeficiente de correlação ter sido muito bom.

Em resumo, esses modelos descrevem razoavelmente bem, para prever o processo de secagem em camadas finas, concluindo as faixas de temperaturas estudadas. Entretanto, observou-se que o modelo de GAB foi o único que apresentou um bom ajuste para todas as isotermas. Ainda que em determinadas condições, houveram resultados melhores que o deste modelo, a sua escolha se deu devido também a sua aplicabilidade em descrever isotermas de alimentos.

Os dados dos resultados experimentais ajustados mediante o modelo de GAB para as isotermas de dessorção e adsorção do gengibre sem e com casca, foram plotados para gerarem as Figuras 4.1 e 4.2 onde se pode observar melhor a influência da casca na obtenção destas isotermas, respectivamente.

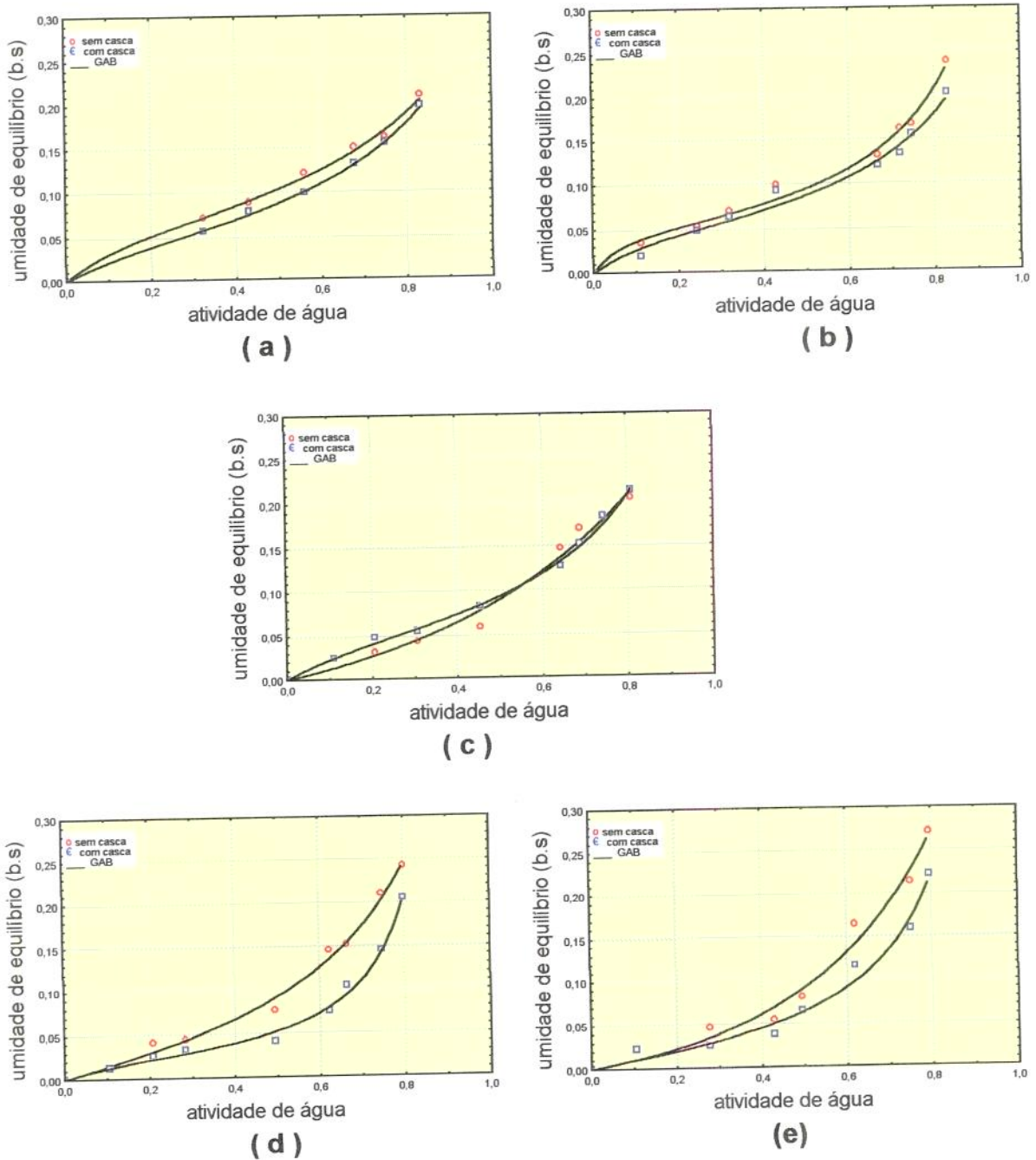
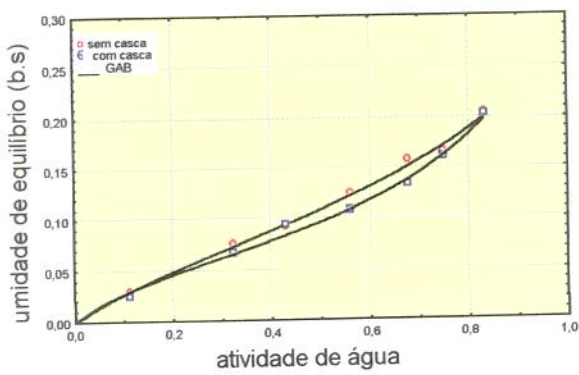
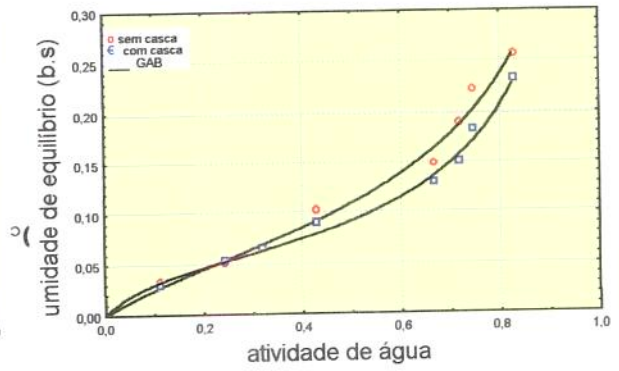


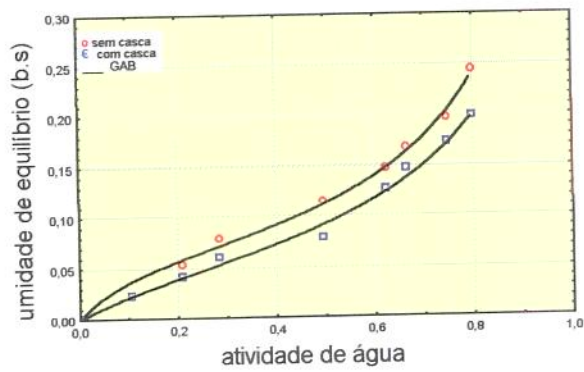
Figura 4.1 – Isotermas de dessorção de gengibre sem e com casca nas temperaturas de 29 (a), 35 (b), 50 (c), 65 (d) e 71°C (e)



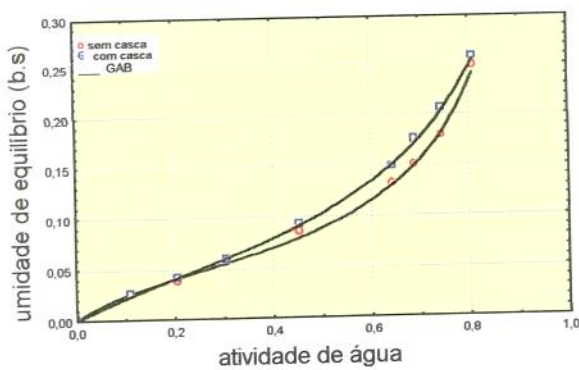
(a)



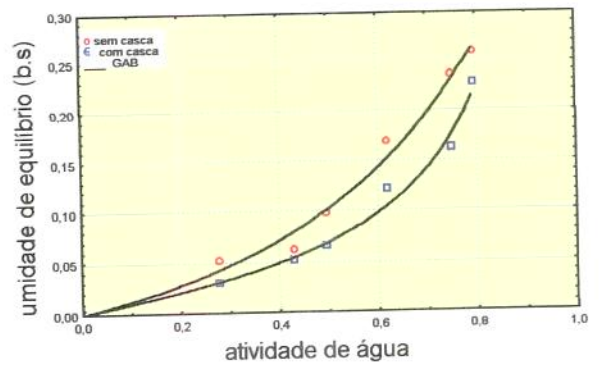
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.2 – Isotermas de adsorção de gengibre sem e com casca nas temperaturas de 29 (a), 35 (b), 50 (c), 65 (d) e 71°C (e)

Nas temperaturas de 29, 35 e 50°C (Figuras 4.1 (a), (b) e (c)) a presença da casca influenciou muito pouco nos resultados; mas para 65 e 71°C (Figura 4.1 e 4.2 (d) e (e), respectivamente) observou-se que a casca provocou um aumento significativo no valor da atividade de água numa determinada umidade de equilíbrio, em relação ao produto sem casca.

4.3 - Histerese

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram as curvas de dessorção e adsorção do gengibre sem e com casca, respectivamente, ajustados pelo modelo de GAB, para cada temperatura.

Mediante as figuras referenciada, observa-se que para uma mesma umidade relativa, existem duas isotermas, denominadas de isotermas de dessorção e adsorção, obtidas em função das condições experimentais iniciais. Estas isotermas tem formato sigmoidal (PUZZI, 1986; KAPSALIS, 1991, WOLF et al., 1982) sendo que a isoterma de adsorção apresenta valores de conteúdo de umidade de equilíbrio superiores ao da isoterma de dessorção. IGLESIAS e CHIRIFE (1976), MAZZA e Le MAGUER (1978) e PRADO (1998) encontrou resultados semelhantes ao estudarem batatas, cebolas e tâmaras, respectivamente.

Observando-se a histerese na temperatura de 29°C para gengibre sem e com casca (Figuras 4.3 (a) e 4.4 (b)), nota-se que não ocorrem diferenças significativas para o gengibre sem casca.

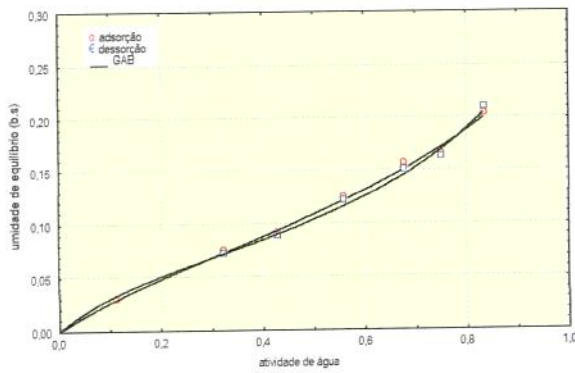
Para a temperatura de 35°C no caso do gengibre sem casca (Figura 4.3 (b)) observa-se que houve uma inversão nas curvas. No caso da dessorção, a

atividade de água até aproximadamente 0,3, a dessorção é maior que a adsorção e a partir daí os valores de umidade de equilíbrio aumentam. Já para o gengibre com casca (Figura 4.4 (b)) não foi verificada diferença significativa.

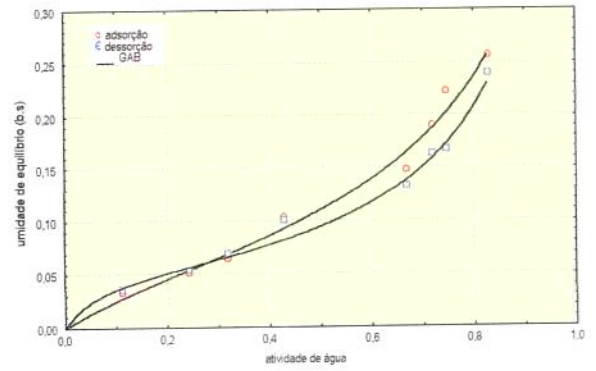
No caso da temperatura intermediária, ou seja, temperatura de 50°C (Figura 4.3 (c)) ocorre uma inversão muito pequena entre 0,45 e 0,75 de atividade de água. Já para o gengibre com casca (Figura 4.4 (c)) não acontece esta inversão.

Para a temperatura de 65°C (Figuras 4.3 (d) e 4.4 (d)) observa-se que estas curvas possuem comportamento semelhantes e as curvas de dessorção e adsorção são bem diferenciadas quando comparadas as demais. Já Para 71°C não existe diferenças significativas entre elas (Figuras 4.3 (e) e 4.4 (e)) o que é plenamente justificado pela alta temperatura. Resultado que vem a coincidir com os de IGLESIAS e CHIRIFE (1976) tanto para gengibre, quanto para nozes.

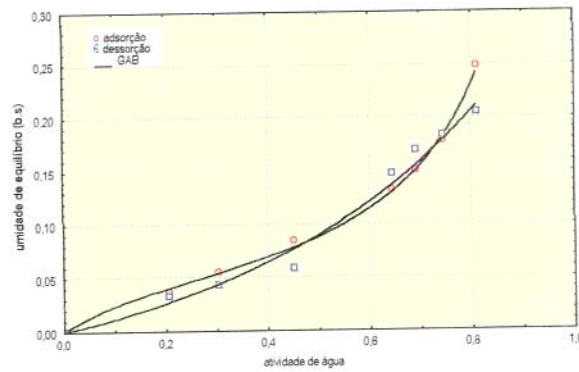
CHUNG e PFOST (1976) tentam explicar o fenômeno com base na contração do volume que ocorre durante a dessorção de variedade no processo de secagem. Isto é, a redução do volume do produto acarreta diminuição de pontos de ligação disponível para ligação de água com as moléculas das substâncias, o que resulta em histerese.



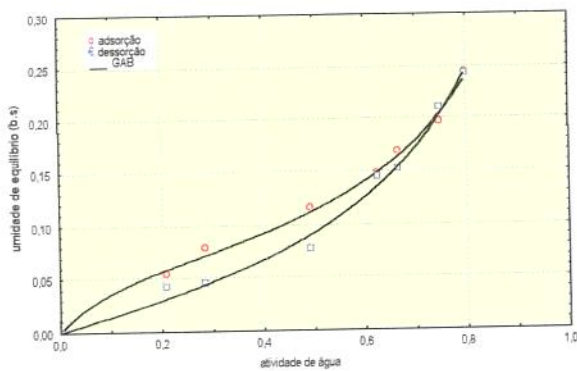
(a)



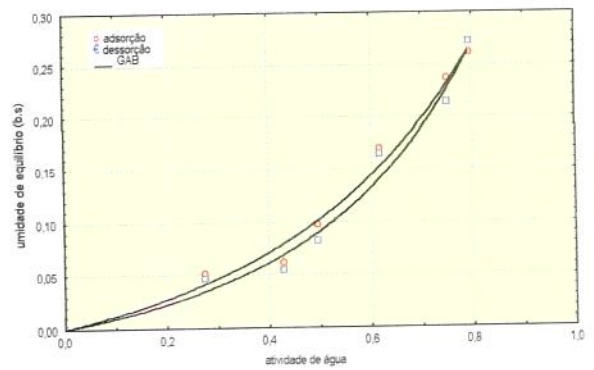
(b)



(c)

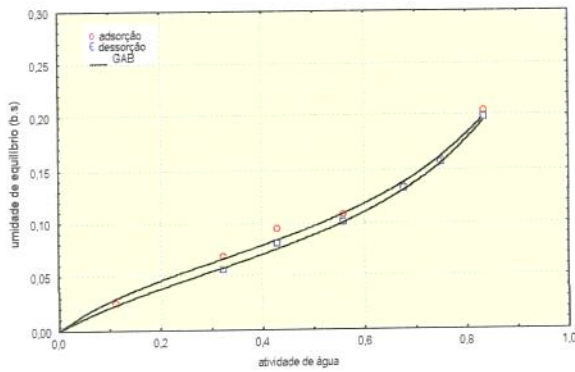


(d)

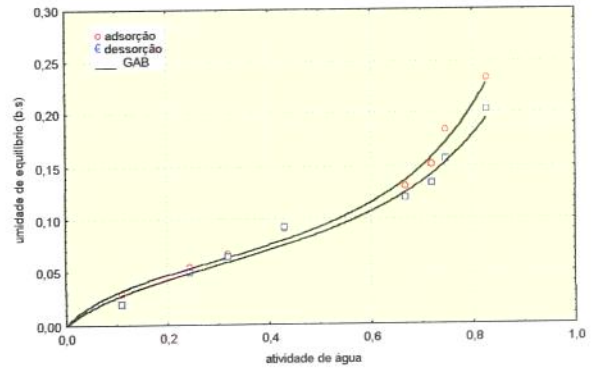


(e)

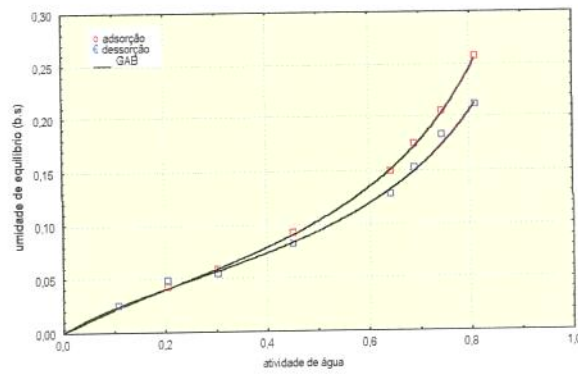
Figura 4.3 - Histerese do gengibre sem casca a 29 (a), 35 (b), 50 (c), 65 (d) e 71°C (e), respectivamente.



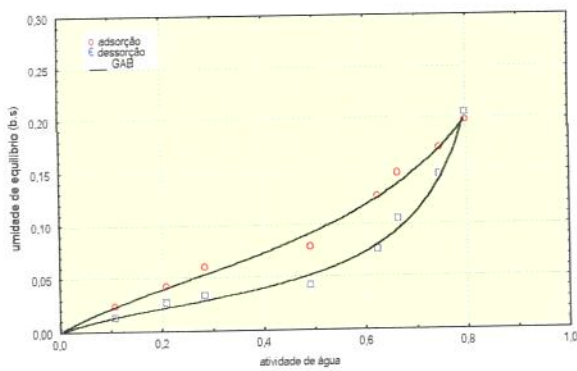
(a)



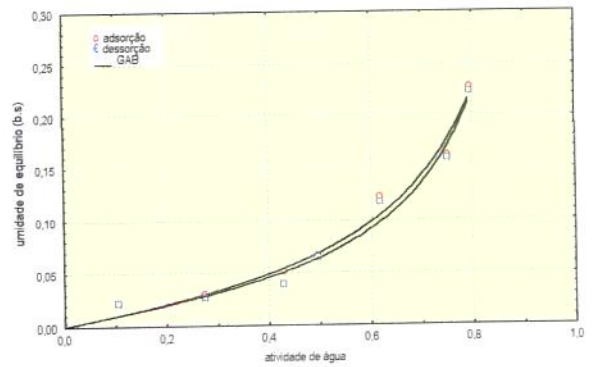
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.4 - Histerese do gengibre com casca a 29 (a), 35 (b), 50 (c), 65 (d) e 71°C (e), respectivamente.

4.4 – Calor isostérico

A partir das isotermas de sorção (adsorção e dessorção) construídas para o gengibre, através do método estático, ajustados pela equação de GAB, calculou-se o excesso de calor (Q_{ST}) em função da umidade da amostra e deste modo analisou-se os parâmetros energéticos de água no produto. Este parâmetro foi conseguido através da equação de Clausius-Clapeyron (Equação 2.14).

Foram graficados os valores de $\ln a_w$ versus $1/T$ conforme as Figuras de 4.5 a 4.8 para o gengibre sem e com casca, onde cada curva representa um determinado valor de umidade de equilíbrio. Através de regressão linear foram obtidos os coeficientes angulares das retas. O calor de sorção corresponde a este coeficiente multiplicado pela constante universal dos gases $R = 0,4618 \text{ kJ/kgK}$ (YOSHIDA, 1997).

Uma análise detalhada dos dados mostra que o valor do calor isostérico de sorção aumenta a medida que o conteúdo de umidade decresce. Estes resultados são concordantes com os obtidos por WANG e BRENNAN (1991) para batatas determinadas em quatro diferentes níveis de temperatura.

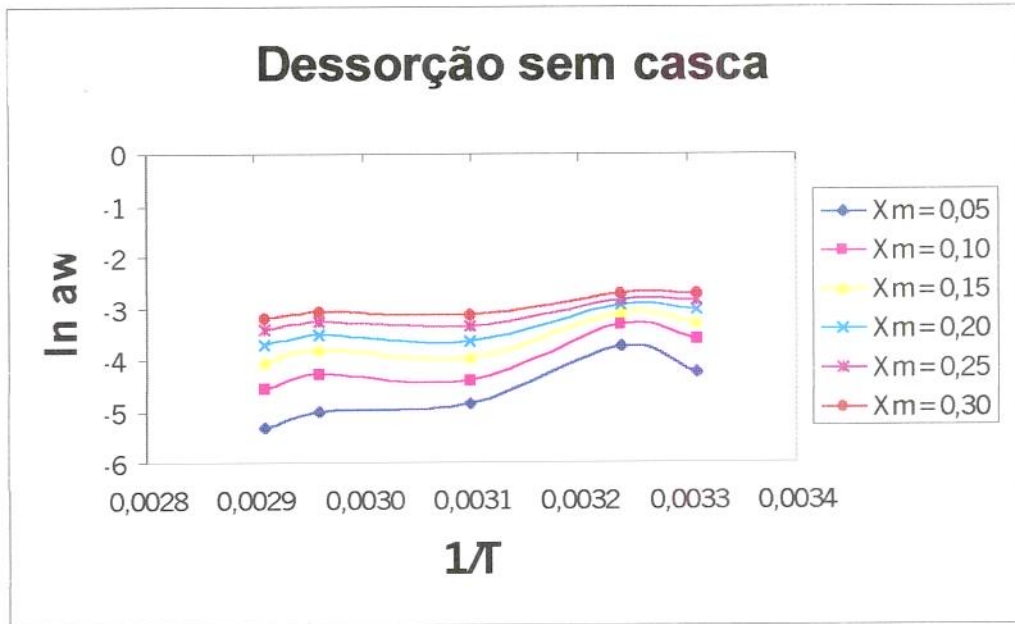


Figura 4.5 – Curvas do $\ln a_w$ versus $1/T$ para diferentes umidades de equilíbrio para dessorção do gengibre sem casca

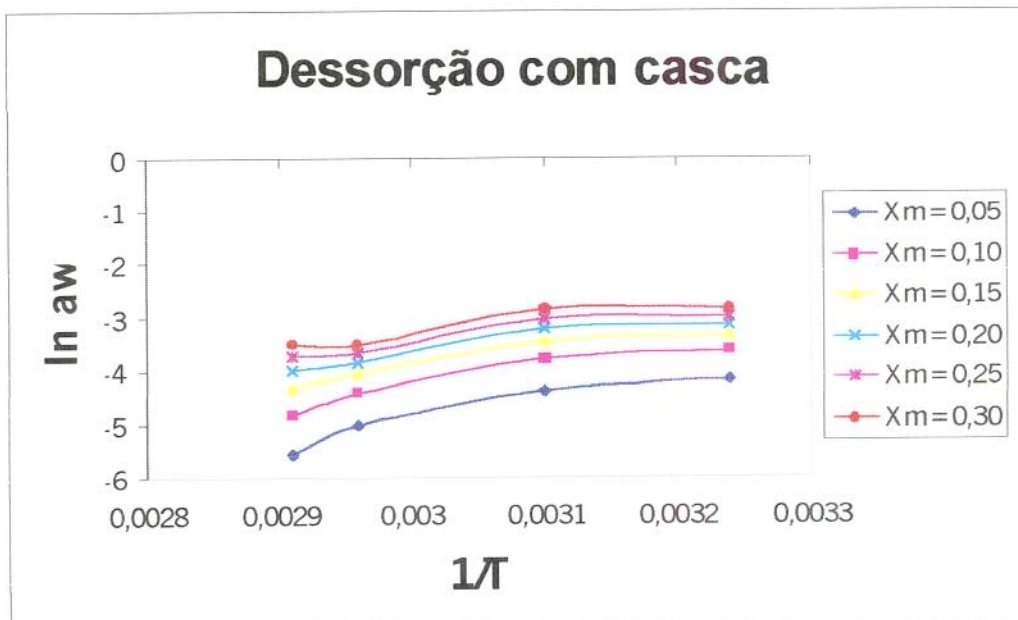


Figura 4.6 – Curvas do $\ln a_w$ versus $1/T$ para diferentes umidades de equilíbrio para dessorção do gengibre com casca

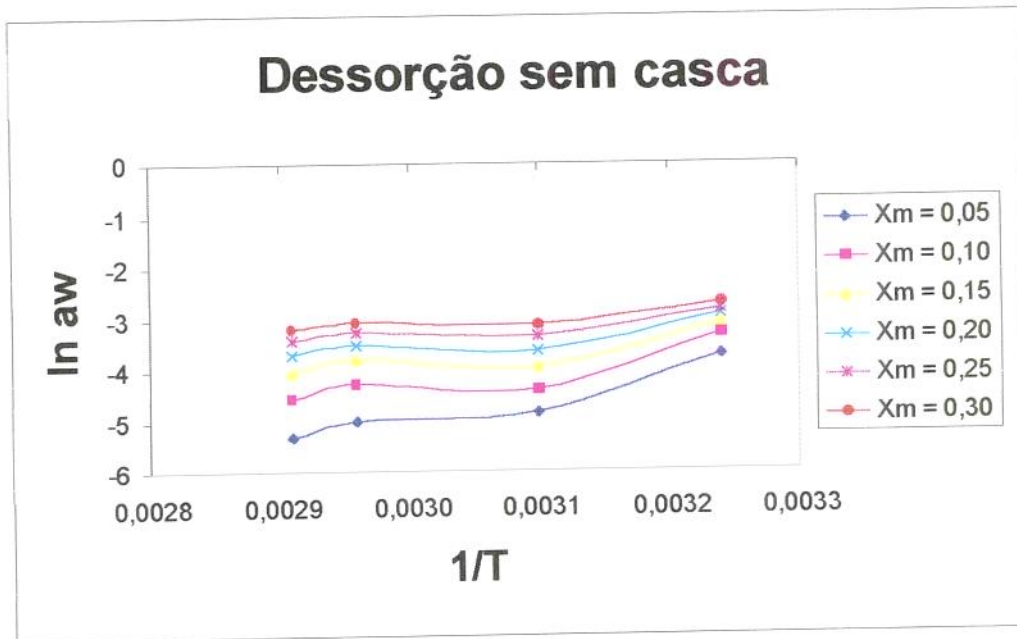


Figura 4.7 – Curvas do $\ln a_w$ versus $1/T$ para diferentes umidades de equilíbrio para adsorção do gengibre sem casca

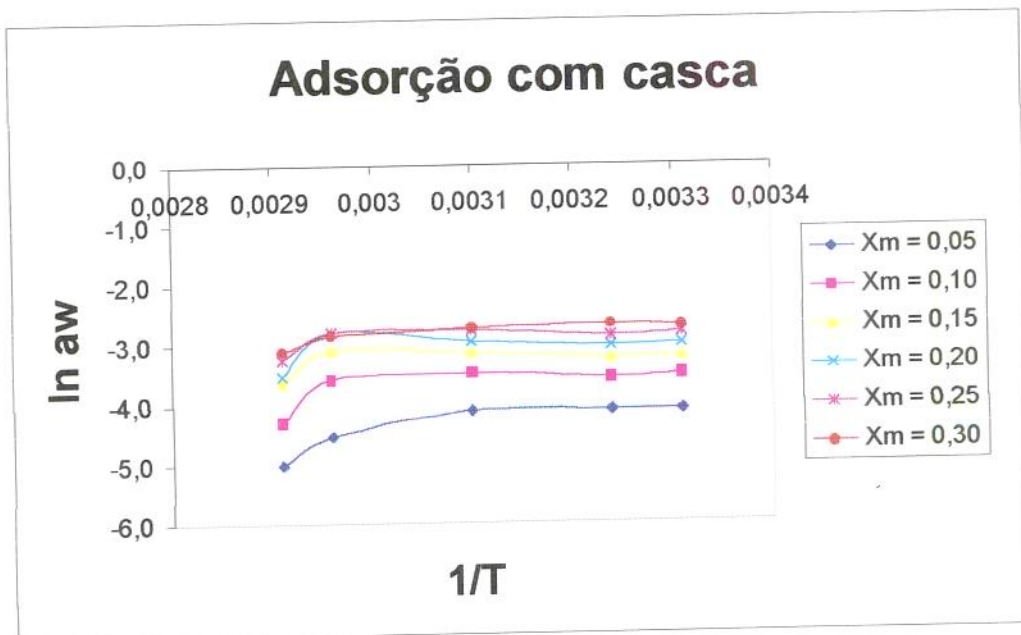


Figura 4.8 – Curvas do $\ln a_w$ versus $1/T$ para diferentes umidades de equilíbrio para adsorção do gengibre com casca

Tabela 4.14 – Valores calculados do calor isostérico de sorção para o gengibre sem e com casca, para diferentes valores de umidade

X_e	$-Q_{ST}$ (Dess SC)	$-Q_{ST}$ (Dess CC)	$-Q_{ST}$ (Ads SC)	$-Q_{ST}$ (Ads CC)
0,05	2683,8	1857,3	577,6	1363,9
0,10	1509,9	1660,4	512,2	1152,5
0,15	1102,5	1405,8	378,0	860,9
0,20	879,5	1281,5	334,7	739,7
0,25	690,7	1164,7	287,7	635,9
0,30	528,7	1063,8	220,3	556,4

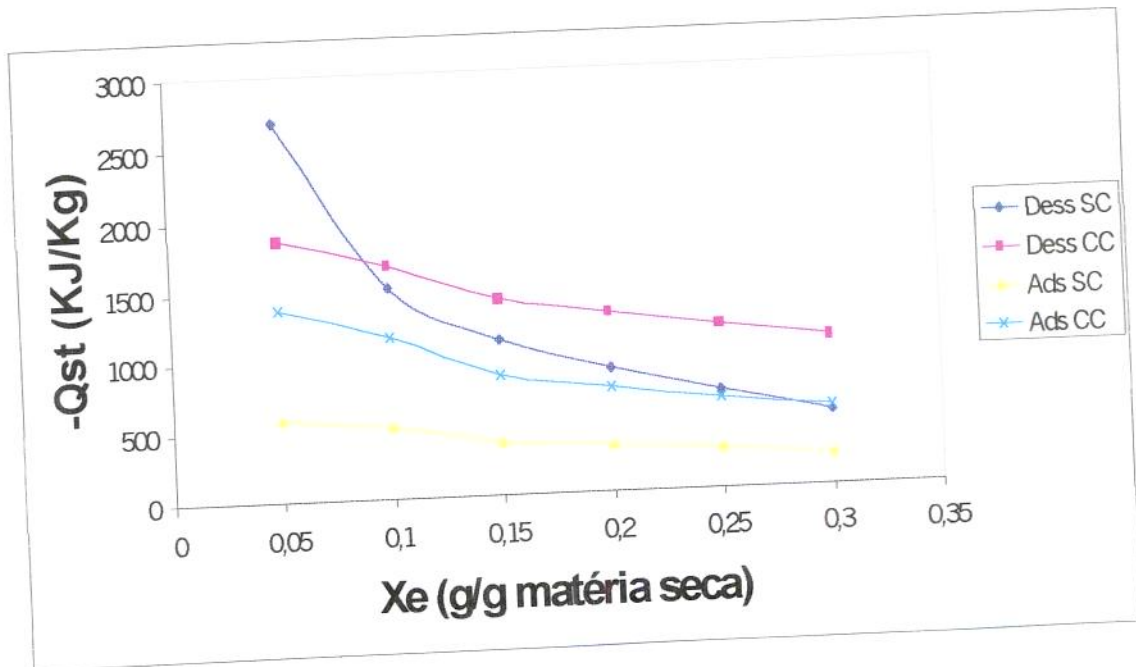


Figura 4.9 – Calor isostérico de sorção para o gengibre sem e com casca

O valor negativo do calor isostérico para todos os conteúdos de umidade, tem sido explicado pela dissolução endotérmica do açúcar na água dessorvida (SARAVACOS et al., 1986).

Analisando-se, através da Figura 4.9, as amostras de gengibre com casca, verifica-se que o calor isostérico tem comportamento semelhante, embora a adsorção possui valores maiores que o de dessorção, ou seja, na adsorção é necessário um maior gasto de energia para retirada de umidade. Caso semelhante ocorre para as amostras de gengibre sem casca.

Os dados experimentais de Q_{ST} foram ajustados através da equação de TOLABA e SUAREZ (1995) dada pela equação 2.15. Os resultados deste ajuste encontram-se na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Parâmetros (K_1 , K_2 e m_0), coeficiente de determinação (R^2) e desvio médio relativo (P) do ajuste da equação 2.15 para os dados experimentais de Q_{ST}

	Dess SC	Dess CC	Ads SC	Ads CC
K_1	-7.764,5	-4.443,4	-1.600,7	-3.500,0
K_2	-11.589,1	747,7	1.266,2	1.074,5
m_0	-1,31	-2,94	-1,71	-1,89
R^2	0,97	0,99	0,98	0,99
P (%)	9,13	2,23	4,96	3,77

Observa-se que esta equação apresenta um bom ajuste, tanto para a dessorção como para a adsorção, uma vez que possui valores de coeficientes de determinação e desvios médio relativo dentro da faixa estabelecida por LOMAURO et al. (1985) e BARROS NETO et al. (1995). Portanto, pode-se dizer que a Equação 2.15 pode ser utilizada para prever os dados de calor isostérico de gengibre para umidades de equilíbrio de até 0,3 g/g.ms.

4.5 – Planejamento experimental

Na Tabela 4.16 e Figura 4.10 encontram-se os resultados da influência da temperatura e velocidade do ar de secagem sobre o conteúdo de umidade das amostras de gengibre sem e com casca.

Os valores da análise de variância e dos coeficientes de regressão para gengibre sem e com casca são mostrados no Apêndice C, para os modelos de primeira e segunda ordem, em todos os períodos de secagem. Foi observado que o modelo de secagem de segunda ordem é válido para as respostas UMIDSC1, UMIDSC2, UMIDCC1 e UMIDCC2 no período de 3 horas (Tabelas 4.17 a 4.20) em comparação ao modelo de primeira ordem, apresentando um melhor desempenho dos valores do coeficiente de correlação e teste F. Desta forma, o modelo de segunda ordem (Modelo quadrático) foi utilizado para gerar as superfícies de resposta.

Tabela 4.16 – Efeitos principais da temperatura e velocidade do ar sobre o conteúdo de umidade

Efeitos principais	UMIDSC1	UMIDSC2	UMIDCC1	UMIDCC2
Temperatura (°C)	-0,035	-0,020	-0,044	-0,035
Velocidade do ar (m/s)	-0,017	-0,006	-0,012	-0,015

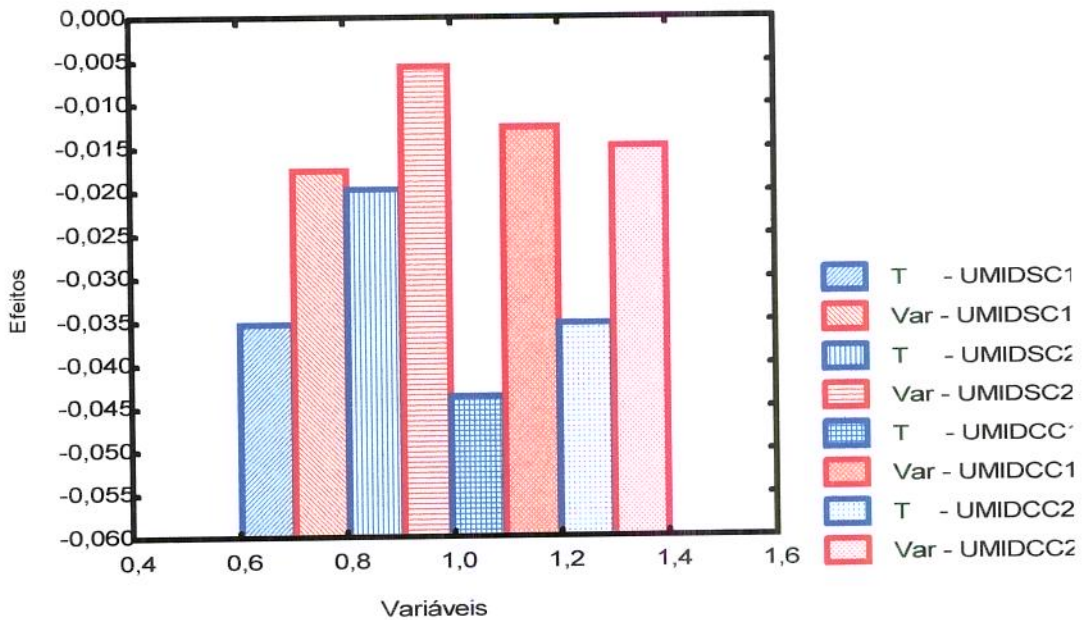


Figura 4.10 – Efeitos principais das variáveis sobre a resposta

Os valores dos efeitos das duas variáveis estudadas: temperatura (T) e velocidade do ar de secagem (V_{ar}), são negativos (Tabela 4.16), o que está com a literatura (BARROS NETO et al., 1995), uma vez que quando passamos de um nível negativo para um nível positivo tem-se uma redução no conteúdo de umidade. Através da Figura 4.10 pode ser observado que a velocidade do ar de secagem tem maior influência que a temperatura para todos os casos estudados. A menor influência da temperatura ocorreu para UMIDCC1 e para velocidade do ar a maior delas se deu no caso UMIDSC2.

Obteve-se, através do STATISTICA 5.0, os coeficientes de regressão para os modelos, os quais foram muito importantes, uma vez que foi possível prever a cada tempo e para qualquer temperatura o valor do conteúdo de umidade do gengibre. Desta maneira, procedendo-se sucessivamente, pôde-se conhecer o comportamento do gengibre durante qualquer corrida de secagem. Nas Tabelas 4.17 a 4.20 tem-se os modelos codificados até o período de três horas de secagem das amostras, conforme a Tabela 3.3.

Tabela 4.17 – Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras de gengibre para o corte UMIDSC1

Tempo (h)	Modelo	Ordem
0,25	$Adm = 0,6 - 0,105T - 0,062Var$	1
0,50	$Adm = 0,4 - 0,14T - 0,07Var$	1
1,00	$Adm = 0,126 - 0,112T - 0,024Var + 0,04T^2$	2
1,50	$Adm = 0,045 - 0,079T - 0,048T^2$	2
2,00	$Adm = 0,021 - 0,05T - 0,014Var + 0,029T^2 + 0,025T.Var$	2
3,00	$Adm = -0,018T - 0,009Var + 0,013T^2 + 0,003Var^2 + 0,016T.Var$	2

$$Adm = (X - X_e) / (X_o - X_e)$$

Tabela 4.18 – Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras de gengibre para o corte UMIDSC2

Tempo (h)	Modelo	Ordem
0,25	$Adm = 0,585 - 0,055T - 0,101Var$	1
0,50	$Adm = 0,273 - 0,113T - 0,04Var + 0,055T^2 + 0,029Var^2$	2
1,00	$Adm = 0,058 - 0,089T + 0,068T^2 + 0,029Var$	2
1,50	$Adm = 0,022 - 0,043T + 0,03T^2$	2
2,00	$Adm = 0,012 - 0,025T + 0,016T^2$	2
3,00	$Adm = -0,01T - 0,003Var + 0,009T^2 + 0,004T.Var$	2

$$Adm = (X - X_e) / (X_o - X_e)$$

Tabela 4.19 – Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras de gengibre para o corte UMIDCC1

Tempo (h)	Modelo	Ordem
0,25	$Adm = 0,734 - 0,15T - 0,055Var$	2
0,50	$Adm = 0,523 - 0,155T - 0,05Var - 0,08Var^2$	2
1,00	$Adm = 0,214 - 0,178T - 0,054Var + 0,039T.Var$	1
2,00	$Adm = 0,028 - 0,064T + 0,035T^2$	2
2,50	$Adm = 0,011 - 0,039T - 0,01Var + 0,026T^2 + 0,021T.Var$	2
3,00	$Adm = 0,003 - 0,022T - 0,006Var + 0,017T^2 + 0,011T.Var$	2

$$Adm = (X - X_e) / (X_o - X_e)$$

Tabela 4.20 – Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras de gengibre para o corte UMIDCC2

Tempo (h)	Modelo	Ordem
0,25	$Adm = 0,684 - 0,216T - 0,041T \cdot Var$	1
0,50	$Adm = 0,511 - 0,201T - 0,075Var^2$	2
1,00	$Adm = 0,257 - 0,153T - 0,06Var^2 + 0,054T \cdot Var$	2
2,00	$Adm = 0,053 - 0,06T$	2
2,50	$Adm = 0,017 - 0,028T - 0,012T^2 + 0,013T \cdot Var$	2
3,00	$Adm = 0,003 - 0,018T - 0,008Var + 0,012T^2 + 0,005Var^2 + 0,013T \cdot Var$	2

$$Adm = (X - X_e) / (X_0 - X_e)$$

Nas Tabelas 4.21 a 4.24 encontram-se os resultados das análises de variância para os cortes UMIDSC1, UMIDSC2, UMIDCC1 e UMIDCC2.

Tabela 4.21 – Resultados da ANOVA para o tempo = 3,0hs – UMIDSC1

Fonte de variação	Soma dos quadrados		Média da soma dos quadrados		Grau de liberdade		Teste F	
	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª
Ordem								
Devido a regressão	$3,39 \cdot 10^{-3}$	$5,16 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	3	4	5,71	16,4
Resíduos (Erro)	$5,94 \cdot 10^{-4}$	$4,71 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$7,85 \cdot 10^{-5}$	3	6		
Falta de ajuste	$5,94 \cdot 10^{-4}$	$4,71 \cdot 10^{-4}$	$5,94 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	1	4		
Erro puro	$5,00 \cdot 10^{-8}$	$5,00 \cdot 10^{-8}$	$2,50 \cdot 10^{-8}$	$2,50 \cdot 10^{-8}$	2	2		
Total	$3,99 \cdot 10^{-3}$	0,0056			6	10		
Qualidade do ajuste	0,85	0,92						
Coefficiente de correlação	0,92	0,96						
F tabelado							9,28	9,15

Tabela 4.22 – Resultados da ANOVA para o tempo = 3,0hs – UMIDSC2

Fonte de variação	Soma dos quadrados		Média da soma dos quadrados		Grau de liberdade		Teste F	
	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª
Ordem								
Devido a regressão	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$7,49 \cdot 10^{-5}$	$4,60 \cdot 10^{-4}$	3	3	5,48	11,03
Resíduos (Erro)	$4,10 \cdot 10^{-5}$	$2,92 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$	$4,17 \cdot 10^{-5}$	3	7		
Falta de ajuste	$4,10 \cdot 10^{-5}$	$2,99 \cdot 10^{-4}$	$4,10 \cdot 10^{-5}$	$5,84 \cdot 10^{-5}$	1	5		
Erro puro	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$7,00 \cdot 10^{-8}$	$7,00 \cdot 10^{-8}$	2	2		
Total	$2,66 \cdot 10^{-4}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$			6	10		
Qualidade do ajuste	0,85	0,82						
Coefficiente de correlação	0,92	0,91						
F tabelado							9,28	4,35

Tabela 4.23 – Resultados da ANOVA para o tempo = 3,0hs – UMIDCC1

Fonte de variação	Soma dos quadrados		Média da soma dos quadrados		Grau de liberdade		Teste F	
	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª
Ordem								
Devido a regressão	$2,78 \cdot 10^{-3}$	$6,30 \cdot 10^{-3}$	$9,27 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	3	5	3,81	28,64
Resíduos (Erro)	$7,30 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$	$2,43 \cdot 10^{-4}$	$4,40 \cdot 10^{-5}$	3	5		
Falta de ajuste	$7,79 \cdot 10^{-4}$	$2,19 \cdot 10^{-4}$	$7,79 \cdot 10^{-4}$	$7,30 \cdot 10^{-5}$	1	3		
Erro puro	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-7}$	$5,00 \cdot 10^{-7}$	2	2		
Total	0,0035	0,0065			6	10		
Qualidade do ajuste	0,78	0,97						
Coefficiente de correlação	0,88	0,98						
F tabelado							9,28	5,05

Tabela 4.24 – Resultados da ANOVA para o tempo = 3,0hs – UMIDCC2

Fonte de variação	Soma dos quadrados		Média da soma dos quadrados		Grau de liberdade		Teste F	
	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª
Ordem								
Devido a regressão	$4,37 \cdot 10^{-3}$	$4,41 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$8,82 \cdot 10^{-4}$	3	5	43,52	5,03
Resíduos (Erro)	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$8,76 \cdot 10^{-4}$	$3,36 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$	3	5		
Falta de ajuste	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$8,76 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$2,92 \cdot 10^{-4}$	1	3		
Erro puro	$3,50 \cdot 10^{-7}$	$3,50 \cdot 10^{-7}$	$1,75 \cdot 10^{-7}$	$1,75 \cdot 10^{-7}$	2	2		
Total	0,0045	0,0053			6	10		
Qualidade do ajuste	0,78	0,83						
Coefficiente de correlação	0,88	0,91						
F tabelado							9,28	5,05

Verifica-se nas Tabelas 4.21 e 4.22 que para o modelo de 1ª ordem o coeficiente de correlação, foi de 92%, enquanto o modelo de 2ª ordem, mostrou valores de 96 e 91% do ajuste entre os valores experimentais e os valores do modelo probabilístico. Com relação ao teste F, verifica-se que o valor calculado é de aproximadamente 2 vezes o valor tabelado ao nível de 95% de confiança para o modelo de 2ª ordem. Deste modo, conclui-se que os valores experimentais são bem representados pelo modelo ajustado, tornando-os válidos.

Na Tabela 4.23 encontra-se os resultados da análise de variância para o corte UMIDCC1. Nota-se que a qualidade do ajuste e o coeficiente são bastante satisfatórios quando tem-se o modelo probabilístico de 2ª ordem. Com relação ao teste F observa-se que o seu valor é 5,67 vezes maior que o valor tabelado ao nível de 98% de confiança, mostrando mais uma vez que este modelo é bem representado. Para a Tabela 4.24, nota-se que mais uma vez o

modelo de 2ª ordem nos garante a validade dos modelos, pelo fato de que, apesar do coeficiente de correlação explicar apenas 91% na qualidade de correlação o valor do F é 2,98 vezes superior ao valor tabelado.

De acordo com os resultados, tem-se que em todos os casos o modelo de segunda ordem apresentou-se melhor que o de segunda ordem para descrever a cinética de secagem. Normalmente, no início da secagem os melhores resultados foram aqueles preditos pelo modelo de 1ª ordem. Isto pode ser explicado pelo fato de que no início da secagem a água livre existente no produto é facilmente retirada, e, conseqüentemente, a secagem é feita de forma linear.

4.5.1 – Estudo das superfícies de respostas

A partir dos modelos ajustados para cada tempo de secagem foram geradas as superfícies de resposta para o período de três horas apresentadas nas Figuras 4.11 e 4.12 para o gengibre sem e com casca.

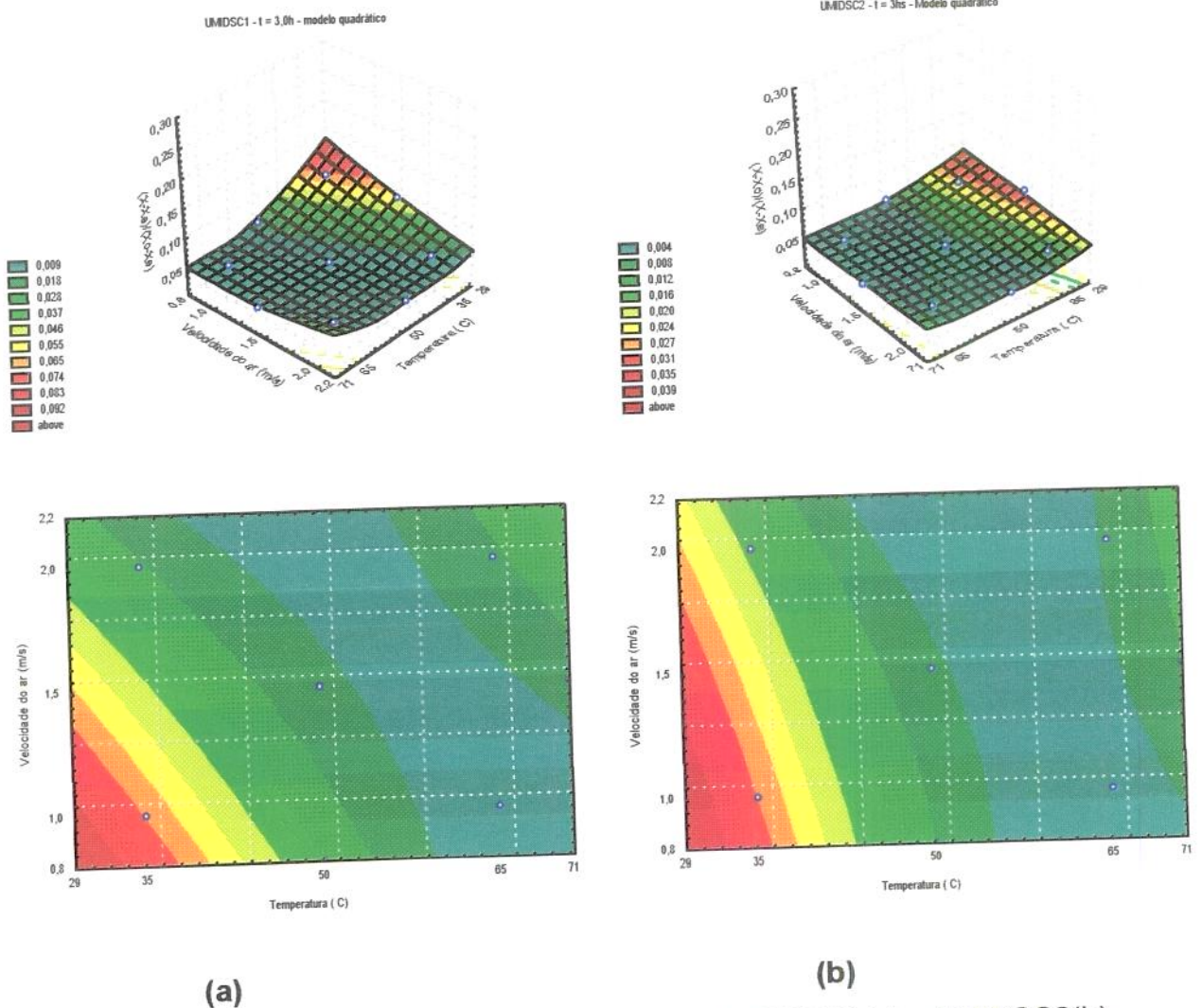


Figura 4.11 – Superfície de resposta ($t = 3,0$ hs) para UMIDSC1(a) e UMIDSC2(b)

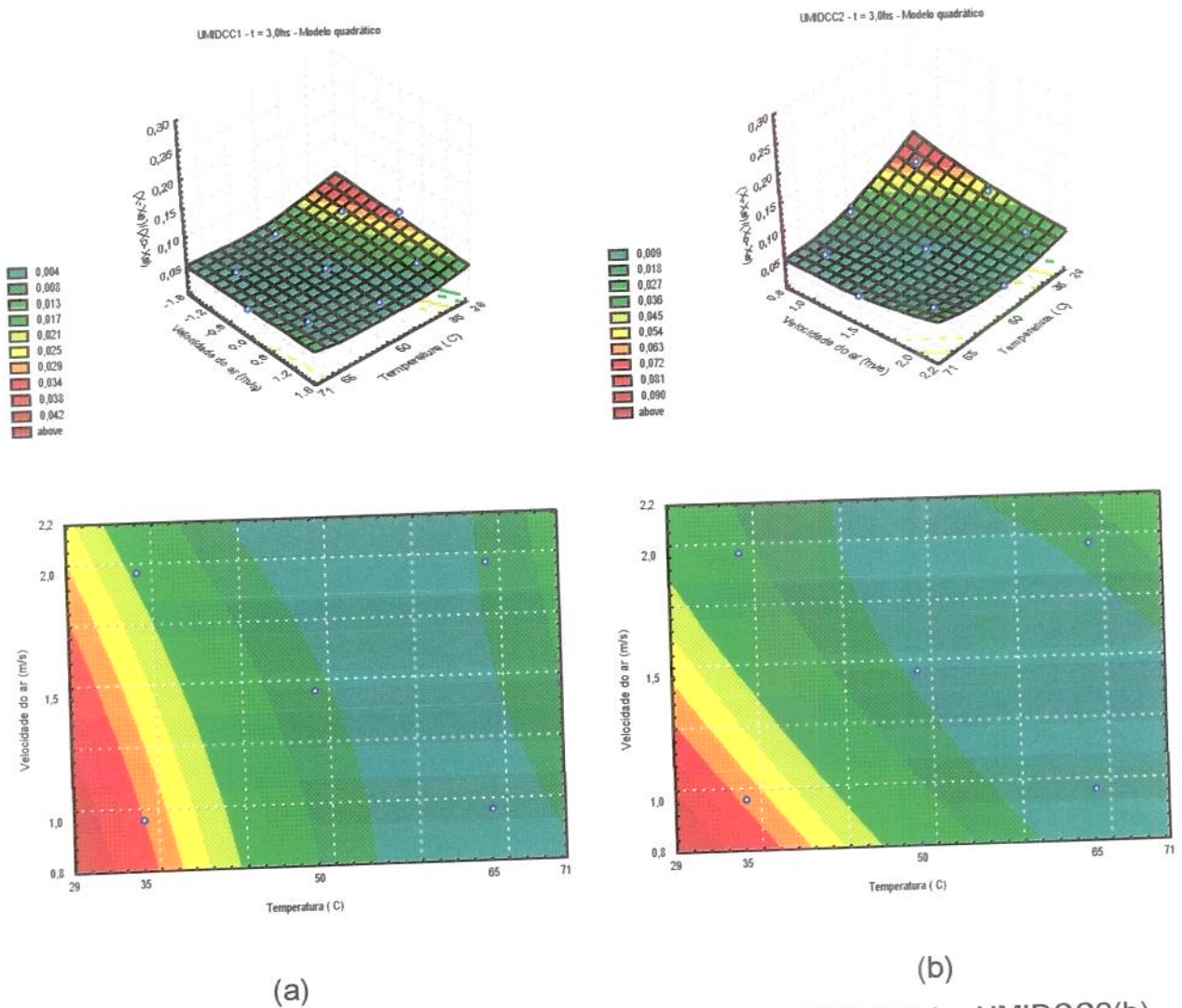


Figura 4.12 – Superfície de resposta ($t = 3,0\text{hs}$) para UMIDCC1(a) e UMIDCC2(b)

Analisando-se as superfícies de resposta para o gengibre sem casca (Figura 4.11 (a) e (b)), observa-se que com o aumento da temperatura (acima de 40°C), verifica-se que o conteúdo de umidade diminui.

Relacionando a velocidade do ar de secagem, nota-se que, praticamente, não ocorreu influência neste período ($t = 3,0\text{hs}$), de maneira que para altas temperaturas e baixas velocidades do ar obteve-se resultados satisfatórios, para que se alcance uma alta eficiência. Neste período, provavelmente o produto já encontra-se em equilíbrio ou próximo dele, motivo pelo qual se escolheu este período para o estudo das superfícies de resposta. A utilização de temperaturas mais baixas só pode ser usada, com velocidades do ar acima de $2,0\text{m/s}$ (Figura 4.11 (a)). Por outro lado, o custo de operação será bem maior. Para a Figura 4.11 (b), é observado que a velocidade tem maior influência para baixas temperaturas, sendo necessário a utilização de velocidades maiores que $2,2\text{m/s}$.

Quando se estuda as amostras de gengibre com casca (Figura 4.12 (a) e (b)), verifica-se também uma ampla faixa favorável à secagem. Para temperaturas menores que 40°C ocorre influência da velocidade. Observa-se que este caso é contrário ao anterior, ou seja, para UMIDCC2, baixas temperaturas podem ser utilizadas, desde que as velocidades do ar sejam maiores que $2,0\text{m/s}$. As melhores faixas são as que apresentam maiores temperaturas.

4.6 – Cinética de secagem

Nas Figuras 4.13 a 4.16 e Tabelas D.1 a D.31 do Apêndice D, encontram-se todos os dados experimentais das curvas de cinética de secagem que representa o primeiro termo da equação difusional dada pelo adimensional do conteúdo de umidade.

Verifica-se através das Figuras 4.13 a 4.16, que a perda do conteúdo de umidade é bem rápida no início do processo de secagem tendendo a se estabilizar num período de tempo de aproximadamente três horas. A secagem das amostras de gengibre ocorre no período de taxa decrescente. Dados estes que vem a concordar com os trabalhos de VACCAREZA et al. (1974) quando estudaram batata-doce; MOWLAH et al. (1983) ao desidratar bananas e YOSHIDA (1997) trabalhando com milho super-doce. Provavelmente, o mecanismo físico que governa o movimento de umidade através da estrutura do gengibre, é a difusão.

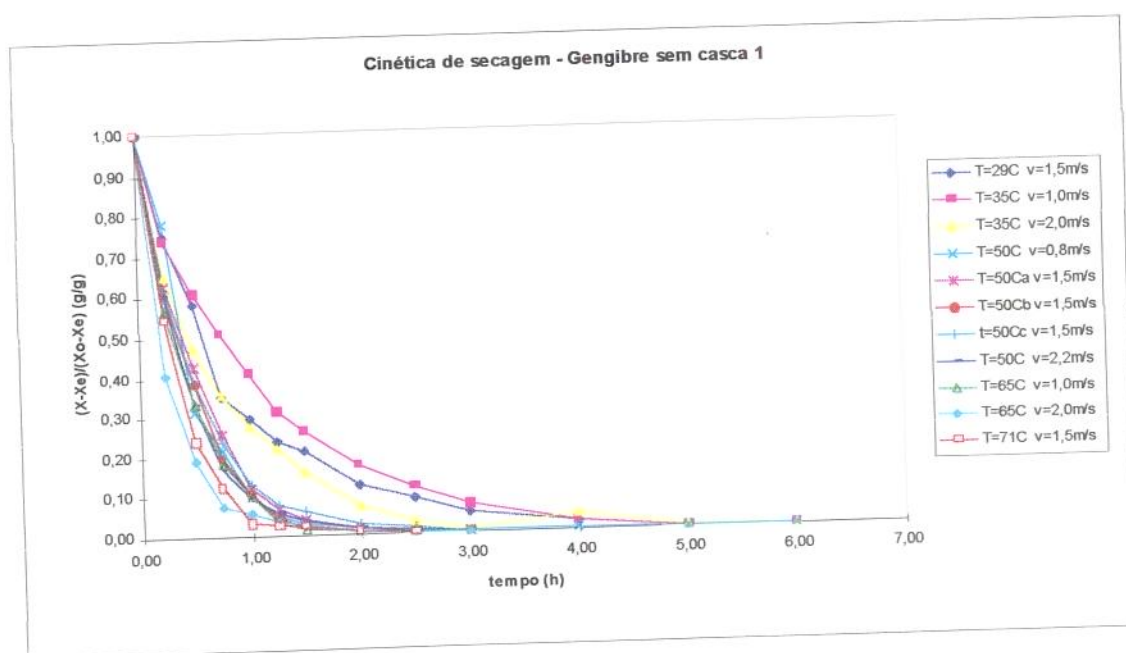


Figura 4.13 – Cinética de secagem para UMIDSC1

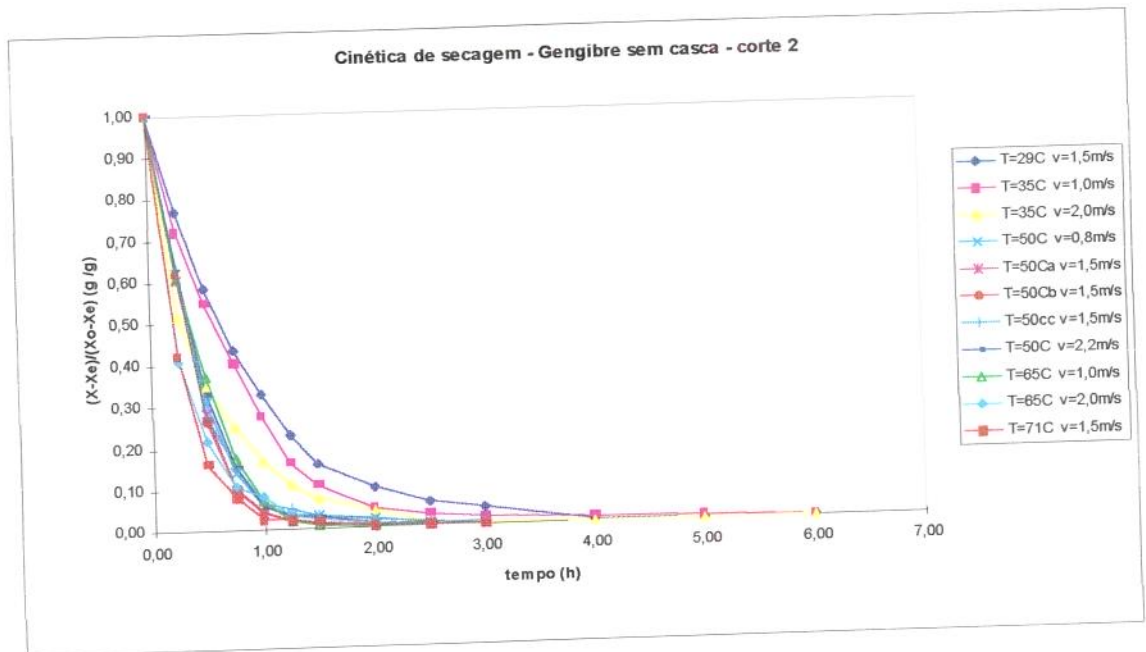


Figura 4.14 – Cinética de secagem para UMIDSC2

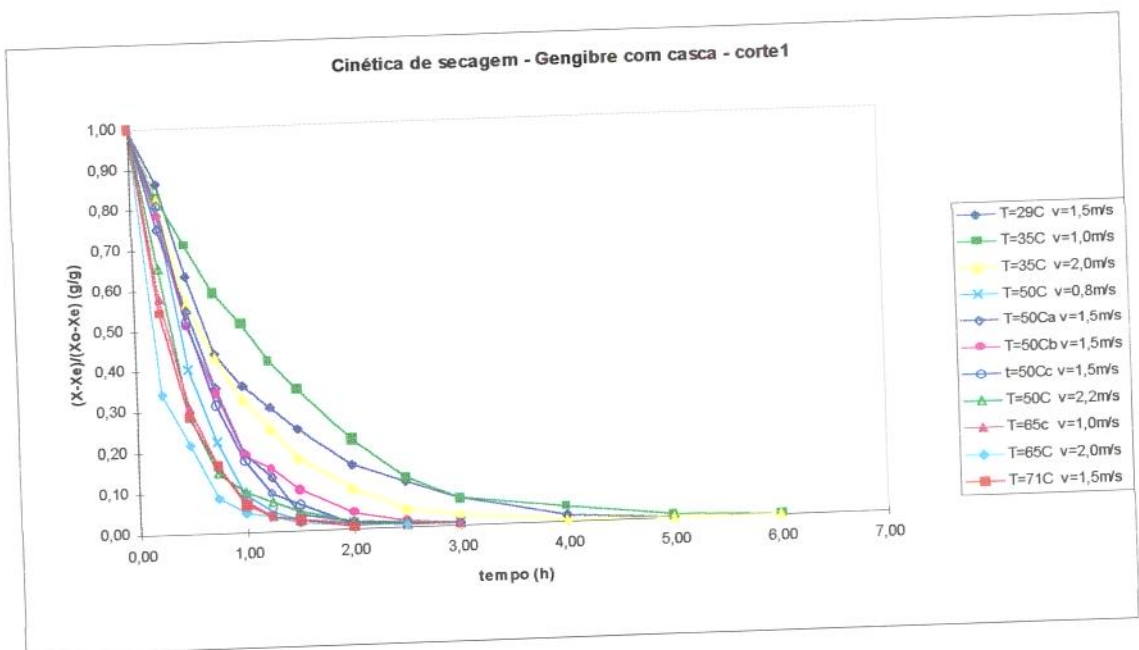


Figura 4.15 – Cinética de secagem para UMIDCC1

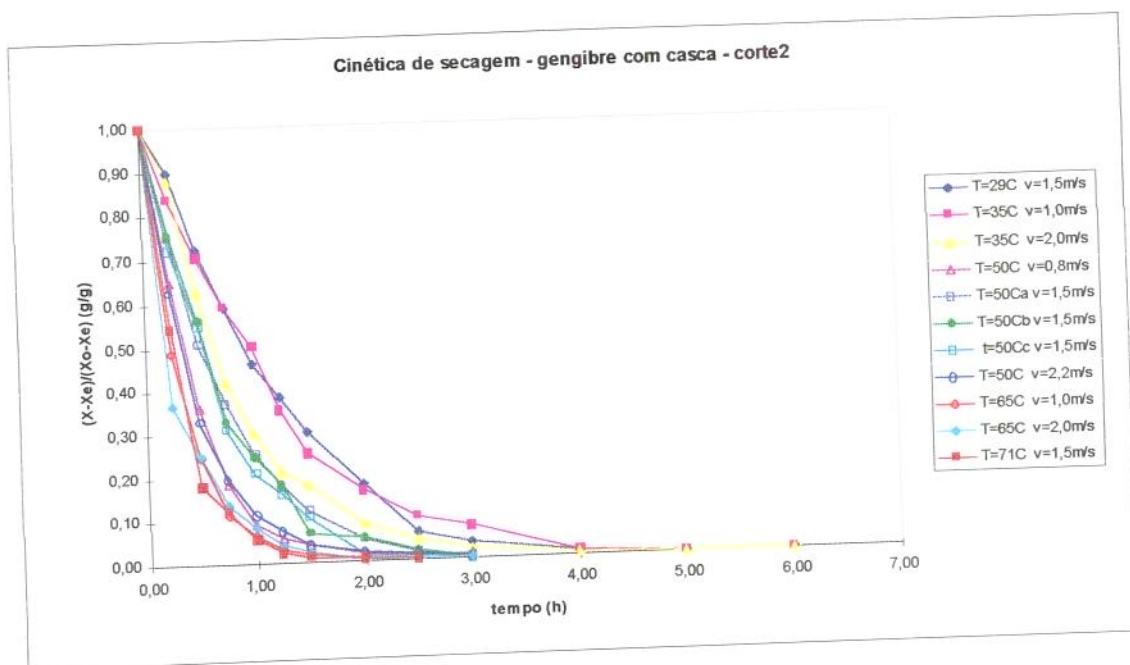
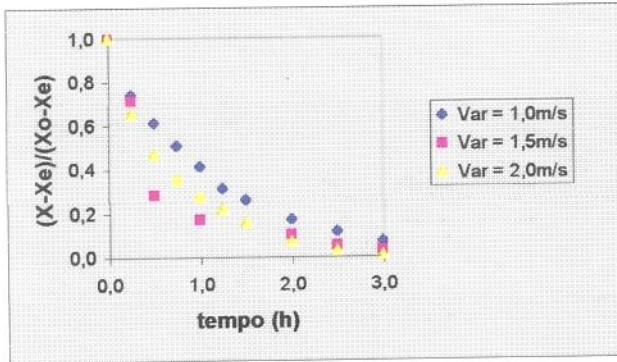


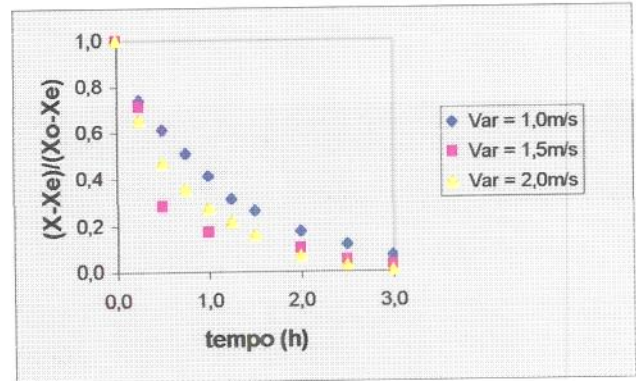
Figura 4.16 – Cinética de secagem para UMIDCC2

Mediante o planejamento experimental, observa-se que se faz necessário a utilização dos modelos para obtenção de curvas para análise dos efeitos de velocidade do ar de secagem e temperatura em cada amostra, uma vez que não temos os dados experimentais não são disponíveis para determinadas temperatura e velocidade do ar. Os resultados obtidos através destes modelos encontram-se plotados nas Figuras 4.17 a 4.20.

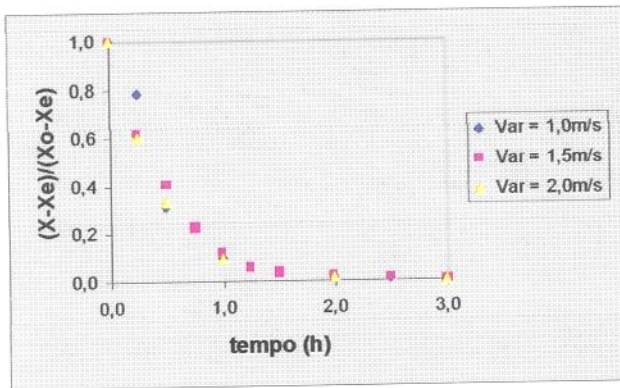
Estas Figuras traduzem o efeito da velocidade do ar de secagem e temperatura sobre o conteúdo de umidade do gengibre sem e com casca.



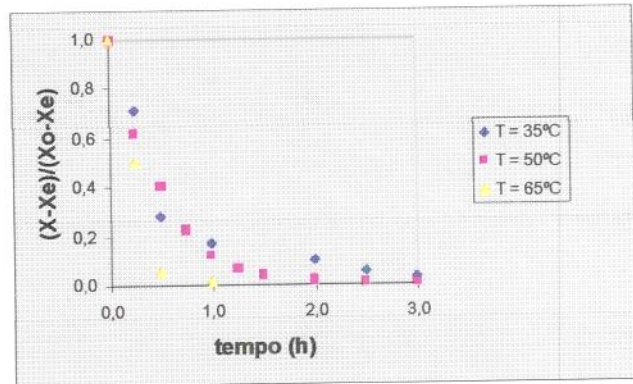
(a) - T = 35°C



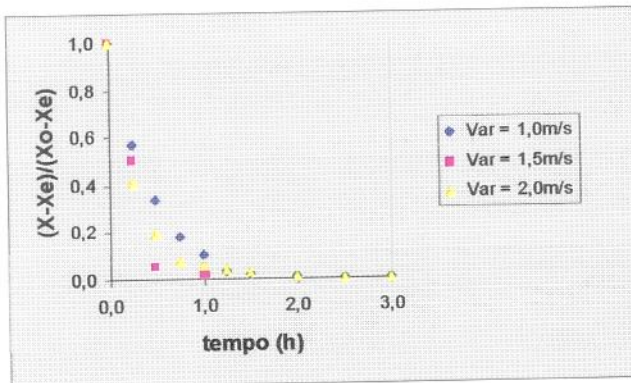
(d) - Var = 1,0m/s



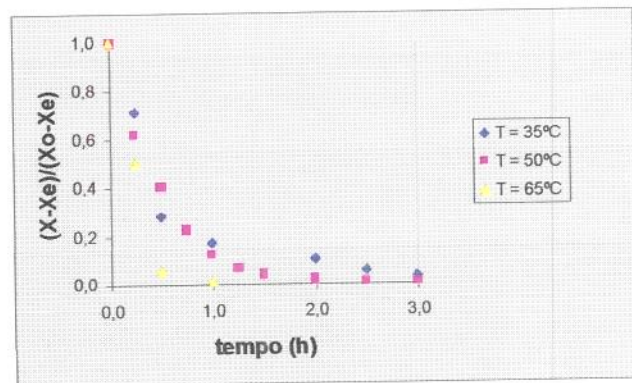
(b) - T = 50°C



(e) - Var = 1,5m/s

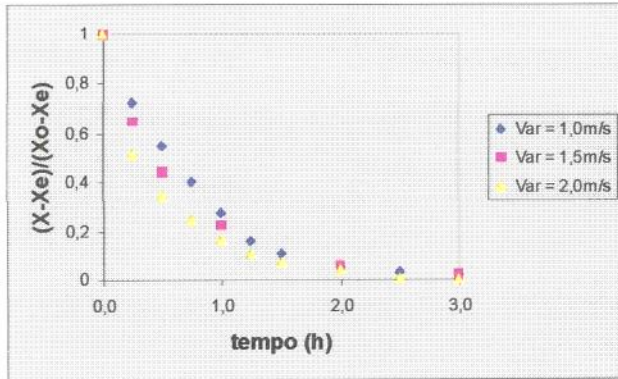


(c) - T = 65°C

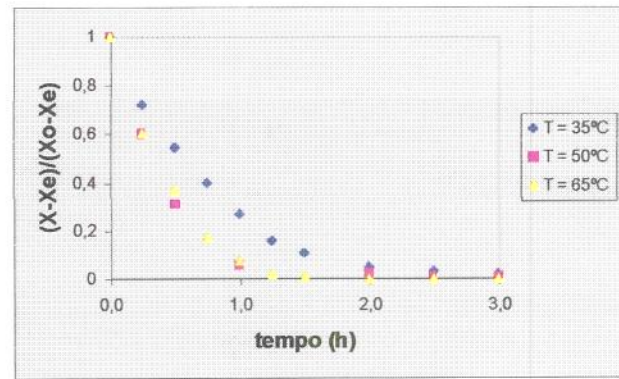


(f) - Var = 2,0m/s

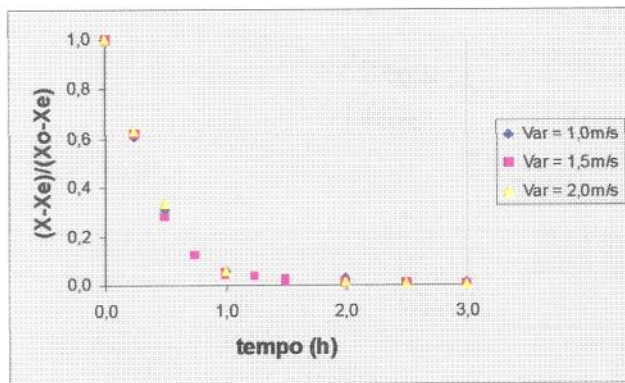
Figura 4.17 - Efeito da velocidade do ar de secagem (a), (b), (c) e temperatura (d), (e) e (f) sobre o conteúdo de umidade do gengibre para o caso UMIDSC1



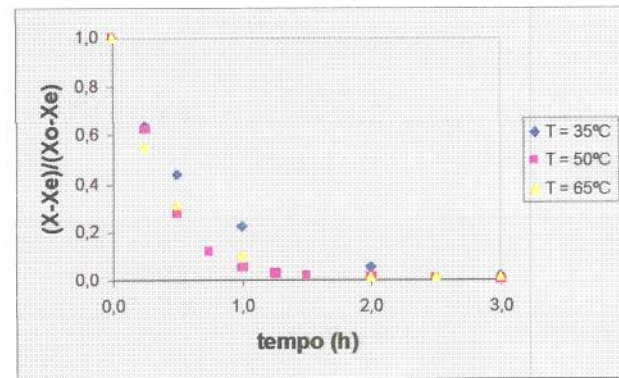
(a) - T = 35°C



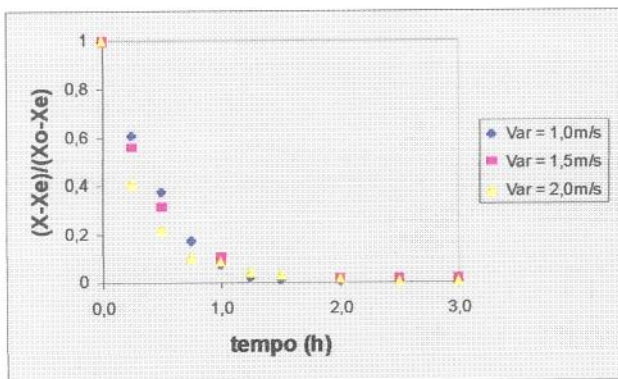
(d) - Var = 1,0m/s



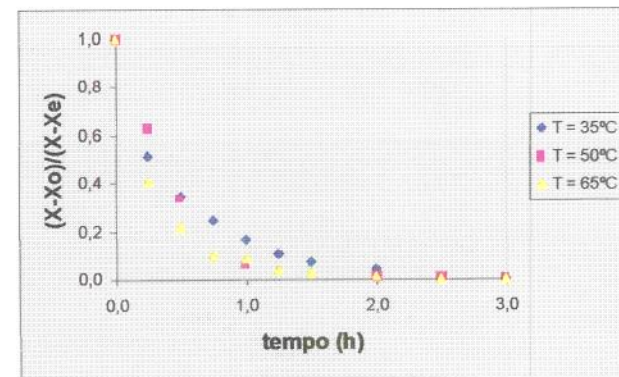
(b) - T = 50°C



(e) - Var = 1,5m/s

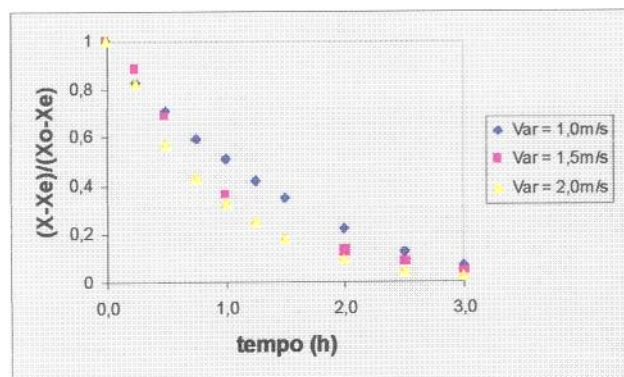


(c) - T = 65°C

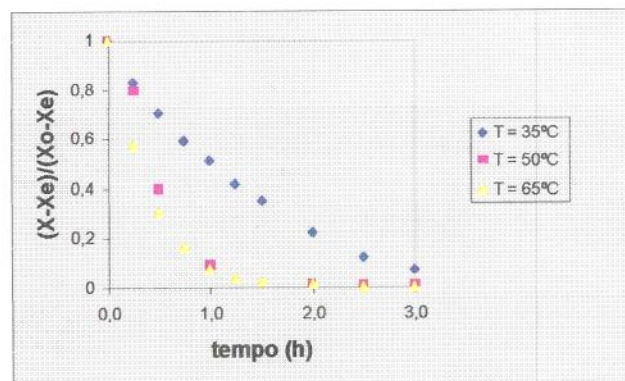


(f) - Var = 2,0m/s

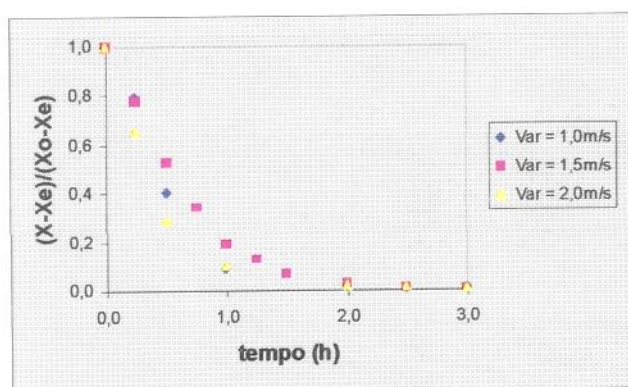
Figura 4.18 - Efeito da velocidade do ar de secagem (a), (b), (c) e temperatura (d), (e) e (f) sobre o conteúdo de umidade do gengibre para o caso UMIDSC2



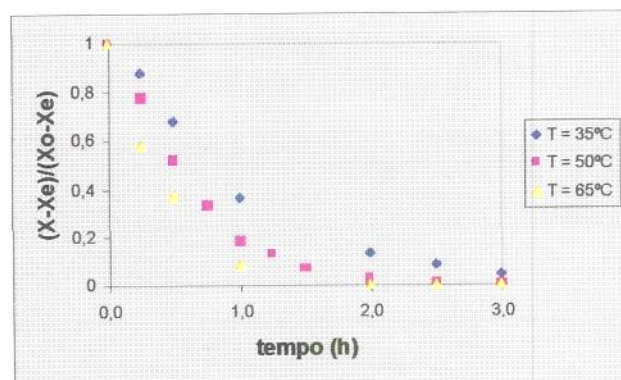
(a) - T = 35°C



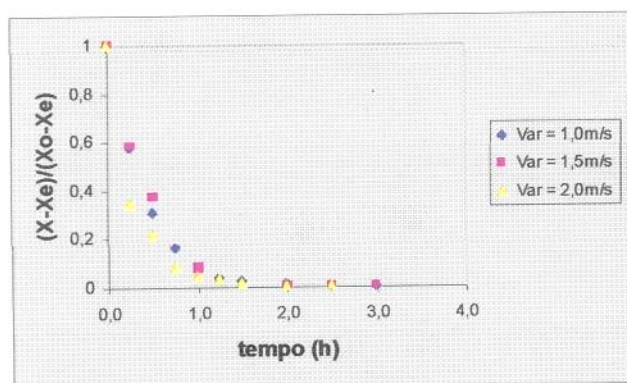
(d) - Var = 1,0m/s



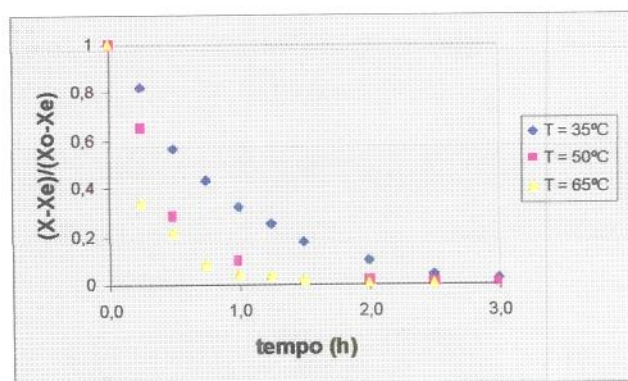
(b) - T = 50°C



(e) - Var = 1,5m/s

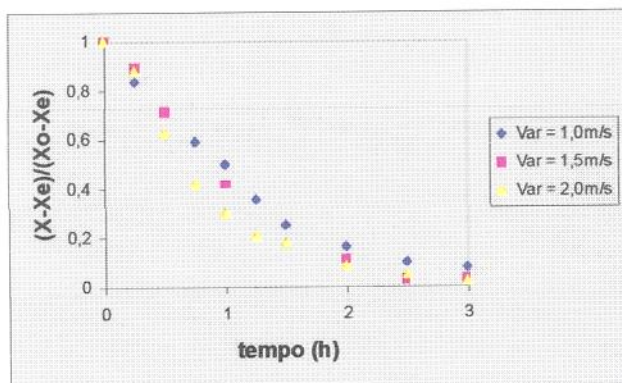


(c) - T = 65°C

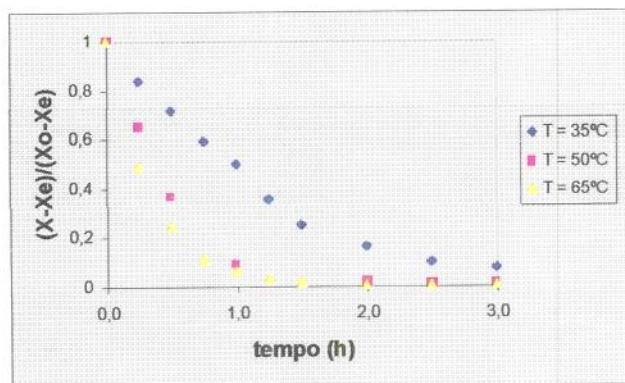


(f) - Var = 2,0m/s

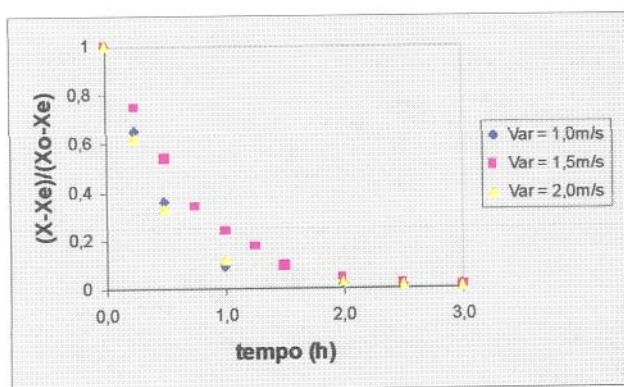
Figura 4.19 - Efeito da velocidade do ar de secagem (a), (b), (c) e temperatura (d), (e) e (f) sobre o conteúdo de umidade do gengibre para o caso UMIDCC1



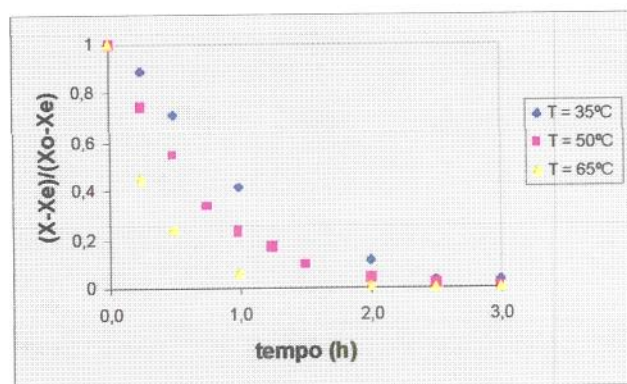
(a) - T = 35°C



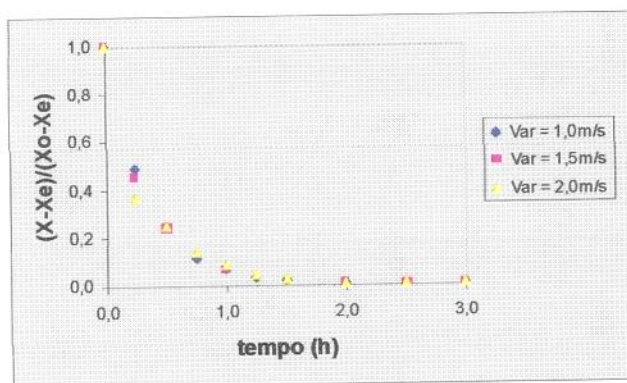
(d) - Var = 1,0 m/s



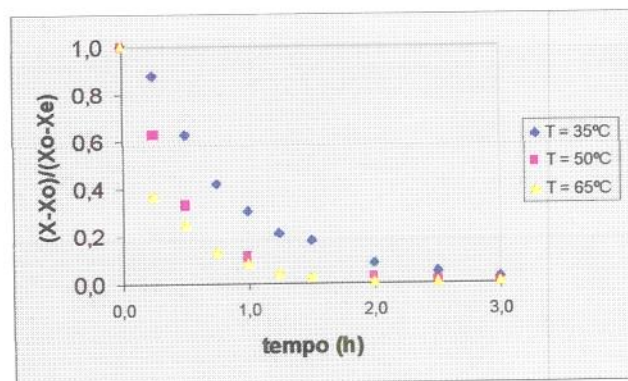
(b) - T = 50°C



(e) - Var = 1,5 m/s



(c) - T = 65°C



(f) - Var = 2,0 m/s

Figura 4.20 - Efeito da velocidade do ar de secagem (a), (b), (c) e temperatura (d), (e) e (f) sobre o conteúdo de umidade do gengibre para o caso UMIDCC2

Estudou-se a velocidade do ar de entrada no secador, fixando a temperatura para os quatro cortes: UMIDSC1, UMIDSC2, UMIDCC1 e UMIDCC2, variando-se a velocidade do ar em 1,0; 1,5 e 2,0 m/s. As figuras 4.17 a 4.20 (a), (b), e (c) mostra que ocorre uma pequena diferença significativa para o caso (a), onde para a velocidade do ar 1,0m/s e temperatura de 35°C, a secagem se faz de forma mais lenta, estando de acordo com YOSHIDA (1997) que secou milho e PRADO (1998) na secagem de tâmaras.

O efeito da temperatura do ar de secagem teve influência sobre a velocidade do ar apenas para a temperatura de 35°C e velocidade do ar de 1,0m/s, ou seja, a medida que se aumenta a temperatura e velocidade do ar, estas diferenças não são observadas, questão esta ocorridas em estudos com SILVA (1991) e LIMA (1992), os quais trabalharam com a secagem de urucum e umbu, respectivamente.

4.7 - Modelo difusional

Os resultados levam a afirmar que no período de taxa decrescente a migração de água por difusão se comportou conforme a segunda lei de Fick, considerando não só a hipótese do encolhimento como também a do não encolhimento.

Consideraram-se as amostras de gengibre como uma placa plana infinita (Equação 2.19) e utilizou-se este modelo para obtenção dos valores de difusividade efetiva estimada para o ajuste linear das curvas, considerando apenas o primeiro termo da equação, devido o comportamento da curva de secagem Ter sido aproximadamente linear (Apêndice E).

Os resultados dos ajustes com valores de espessura média, encontram-se nas Tabelas 4.25 e 4.26, onde são apresentados os valores de difusividade efetiva, desvio médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2), para os cortes UMIDSC1, UMIDSC2, UMIDCC1 e UMIDCC2 que representam os cortes sem e com casca, transversal e longitudinal, respectivamente. Verifica-se ainda que a difusividade é da ordem de $10^{-6} \text{m}^2/\text{h}$. Observa-se que o valor da difusividade aumenta com o aumento da temperatura. Este fato foi verificado em um estudo feito por MURR (1992) quando secou fatias de batatas e PRADO (1998) ao secar tâmaras para obtenção da tâmara-passa.

Em se tratando da velocidade do ar de secagem para o corte UMIDSC1 e UMIDSC2, na Tabela 4.25, observa-se que os valores de difusividade efetiva são muito próximos, indicando que a velocidade do ar não tem influência sobre os resultados. No entanto, quando a temperatura é de 65°C para a velocidade do ar de $2,0 \text{m/s}$ ocorre uma queda em seu valor.

Tabela 4.25 – Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional considerando a espessura média das amostras nas temperaturas de 35, 50 e 65°C

Corte	Var (m/s)	Difusividade efetiva ($10^{-6} \text{m}^2/\text{h}$)		
		35°C	50°C	65°C
		L_m (espessura média, m)	L_m (espessura média, m)	L_m (espessura média, m)
SC1	1,0	1,81 (4,47*/0,996**)	2,10 (14,7*/0,986**)	4,05 (3,93*/0,998**)
	1,5	1,50 (7,38*/0,996**)	2,48 (9,69*/0,992**)	4,34 (27,4*/0,914**)
	2,0	1,83 (8,47*/0,990**)	2,31 (15,0*/0,960**)	2,82 (18,9*/0,988**)
SC2	1,0	1,03 (17,7*/0,984**)	2,08 (24,6*/0,968**)	1,97 (11,6*/0,980**)
	1,5	1,04 (19,4*/0,984**)	2,24 (27,4*/0,962**)	2,90 (11,9*/0,998**)
	2,0	1,19 (13,7*/0,992**)	2,34 (13,9*/0,984**)	2,46 (23,1*/0,996**)
CC1	1,0	1,74 (8,99*/0,984**)	2,74 (12,4*/0,982**)	4,40 (8,85*/0,996**)
	1,5	1,32 (11,6*/0,974**)	3,60 (9,91*/0,990**)	4,14 (10,4*/0,980**)
	2,0	2,46 (6,56*/0,996**)	2,77 (6,61*/0,994**)	3,19 (21,1*/0,970**)
CC2	1,0	0,70 (8,99*/0,984**)	1,64 (6,13*/0,988**)	4,06 (7,05*/0,998**)
	1,5	1,24 (7,21*/0,988**)	2,21 (12,6*/0,984**)	2,75 (5,98*/0,998**)
	2,0	1,37 (6,56*/0,996**)	1,60 (6,59*/0,992**)	2,65 (20,9*/0,992**)

* Desvio médio relativo (P, %)

** Coeficiente de determinação (R^2)

Para os cortes UMIDCC1 e UMIDCC2, a velocidade do ar de secagem possui resultados menores a medida que se aumenta a sua velocidade para todos os casos.

Analisando-se a velocidade do ar para as três temperaturas estudadas, 35, 50 e 65°C relacionando-as ao coeficiente de determinação e desvio médio relativo que os piores resultados encontram-se para o corte UMIDSC2, uma vez que apesar do valor do coeficiente de determinação ser razoável, os desvios relativos médios estão acima do recomendado por LOMAURO et al. (1985) e BARROS NETO et al. (1995).

Resultados e discussão

Observa-se através da Tabela 4.26 melhores resultados quando se considera o encolhimento, uma vez que os valores dos desvios médios relativos e coeficiente de determinação são menores que os anteriores, podendo concluir que o modelo difusional com um único termo é suficiente para o ajustes das curvas de secagem. Caso semelhante a este foi observado durante a secagem de maçãs e cenouras por SERENO e MEDEIROS (1990).

Tabela 4.26 – Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional considerando o encolhimento para as amostras de gengibre nas temperaturas de 35, 50 e 65°C

Corte	Var (m/s)	Difusividade efetiva ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$)		
		35°C	50°C	65°C
SC1	1,0	0,76 (10,6*/0,904**)	2,50 (0,30*/0,986**)	2,96 (3,07*/0,988**)
	1,5	0,91 (9,52*/0,945**)	1,46 (8,28*/0,992**)	2,11 (15,3*/0,992**)
	2,0	1,30 (8,42*/0,988**)	2,08 (11,1*/0,986**)	2,10 (18,2*/0,990**)
SC2	1,0	1,02 (9,83*/0,935**)	1,94 (14,9*/0,992**)	2,54 (10,5*/0,990**)
	1,5	1,11 (5,38*/0,943**)	1,76 (12,1*/0,982**)	2,79 (9,98*/0,992**)
	2,0	1,08 (10,9*/0,951**)	3,46 (11,4*/0,982**)	3,86 (8,43*/0,996**)
CC1	1,0	0,90 (6,57*/0,990**)	3,31 (9,59*/0,992**)	3,43 (5,76*/0,992**)
	1,5	0,95 (5,60*/0,992**)	2,02 (5,31*/0,978**)	2,27 (4,61*/0,992**)
	2,0	1,52 (4,64*/0,992**)	2,74 (10,2*/0,937**)	3,24 (13,46*/0,992**)
CC2	1,0	0,37 (8,64*/0,992**)	2,39 (10,1*/0,982**)	2,71 (7,11*/0,992**)
	1,5	0,81 (6,16*/0,968**)	1,23 (11,4*/0,980**)	2,02 (5,67*/0,992**)
	2,0	1,05 (10,7*/0,950**)	1,64 (8,03*/0,982**)	1,80 (9,23*/0,992**)

* Desvio médio relativo (P%)

** Coeficiente de determinação (R^2)

Ao se analisar os resultados da difusividade considerando o encolhimento (Tabela 4.26), para UMIDSC1 e UMIDSC2, verifica-se que a temperatura de 35°C é pouco influenciada, embora exista uma tendência positiva ao se aumentar a velocidade do ar de secagem. Para 50°C o menor resultado foi encontrado ao se utilizar a velocidade média. No caso de 65°C observa-se que a difusividade tem resultados diferenciados. O aumento de velocidade diminui seu valor e vice-versa. Considerando-se os cortes UMIDCC1 e UMIDCC2 é verificado que existe influência da velocidade, ou seja, o valor da difusividade aumenta com o decréscimo da velocidade do ar de secagem.

4.8 – Energia de ativação

A energia de ativação é um parâmetro importante na análise final do processo de secagem, uma vez que ela indica a dificuldade na retirada de umidade de um produto. Ela é calculada através da equação de Arrhenius

$$D_{ef} = A \exp(-E_a/RT) \quad (4.1)$$

Onde:

D_{ef} = difusividade efetiva (m^2/s);

A = constante;

E_a = energia de ativação (kJ/mol);

R = constante universal dos gases ($8,314 \text{ kJ/mol} \cdot ^\circ K$);

T = temperatura absoluta ($^\circ K$)

Esta equação apresenta-se como função linear relacionada com a difusividade e o inverso da temperatura.

O cálculo da energia de ativação foi efetuado, usando os valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional considerando o encolhimento (Tabela 4.27).

Nesse estudo observou-se que a energia de ativação tende a aumentar com o aumento da velocidade do ar de secagem. Isto também ocorreu com MURR (1992) quando secou batatas.

Tabela 4.27 - Valores da energia de ativação em função da velocidade do ar de secagem e temperaturas de 35, 50 e 65°C

Corte	Var (m/s)	Equação	R ² (%)	Ea (KJ/mol)
S	1,0	$\ln(D) = -2592,5x - 4,4830$	0,976	21,55
C	1,5	$\ln(D) = -4038,0x - 0,1976$	0,994	33,57
1	2,0	$\ln(D) = -3707,3x - 1,0358$	0,998	30,82
S	1,0	$\ln(D) = -2298,3x - 6,0300$	0,981	19,11
C	1,5	$\ln(D) = -3627,6x - 1,3857$	0,910	30,16
2	2,0	$\ln(D) = -3781,9x - 0,9640$	0,918	31,44
C	1,0	$\ln(D) = -3405,6x - 2,0371$	0,998	28,31
C	1,5	$\ln(D) = -4003,7x - 0,1704$	0,972	33,29
1	2,0	$\ln(D) = -4592,0x + 1,4130$	0,900	38,18
C	1,0	$\ln(D) = -4857,0x + 2,0500$	0,994	19,66
C	1,5	$\ln(D) = -2840,8x - 4,0455$	0,953	23,62
2	2,0	$\ln(D) = -2364,9x - 5,3393$	0,965	40,36

Valores da energia de ativação foram calculados por diversos autores. NUCCI e MURR (1995) encontraram valores para gengibre sem casca de 24,5kJ/mol e gengibre com casca de 26,8kJ/mol. MAZZA e Le MAGEUR (1980) encontraram uma energia de 21,66kJ/mol quando secou fatias de cebola. DAUDIN (1983) apresentou uma série de resultados para diversos produtos, como: abacate (40kJ/mol), batata (52kJ/mol) e beterraba (29kJ/mol).

Observando-se os dados da Tabela 4.27, pode-se dizer que a magnitude dos valores de energia de ativação para o gengibre obtido neste trabalho estão de acordos com os referenciados pelos pesquisadores acima relacionados, cuja faixa de energia de ativação é de 21,66 a 52kJ/mol e 19,11 a 40,36 kJ/mol, respectivamente.

Pode-se verificar que nem termos de valores absolutos não existe grande variações um corte para o outro. Essa diferença ocorre quando se analisa a amostra de gengibre sem casca com aqueles com casca, ou seja, os valores de energia de ativação para o gengibre com casca são superiores ao gengibre sem casca.

4.9 – Estudo do encolhimento

Com os valores experimentais de densidade inicial (ρ_0) e densidade de equilíbrio(ρ_e) (Apêndice F) , conteúdo de umidade(X), conteúdo de umidade de equilíbrio(X_e) e A/A_0 , obtidos através de fotografias tiradas durante a secagem e de um planímetro (Apêndice I) foi possível obter através de regressão não linear os valores do coeficiente de encolhimento (n).

Nas Tabelas 4.28 a 4.31, encontram-se os resultados ajustados pelos modelos de SUZUKI et al. (1976) através de regressão não linear, apresentados nos itens 2.4.3.1, 2.4.3.2 e 2.4.3.3.

Foram construídos gráficos para cada curva de secagem, considerando as amostras de gengibre como uma placa plana infinita. Nas Figuras 4.21 a 4.24, cujos resultados estão no Apêndice G, encontram-se os modelos de SUZUKI et al. (1976) comparados com os nossos dados experimentais, para cada condição de secagem nos casos UMIDSC1, UMIDSC2, UMIDCC1 e UMIDCC2.

Resultados e discussão

Tabela 4.28 - Valores do coeficiente de encolhimento (n) desvio médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) entre os modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 para todas as condições de secagem (UMIDSC1)

T (°C)	Var (m/s)	Coeficiente de encolhimento (n)		
		Uniforme 1	Uniforme 2	Central
29	1,5	0,42 (2,56*/0,98**)	0,50 (2,10*/0,99**)	0,40 (1,37*/0,98**)
35	1,0	0,66 (3,41*/0,98**)	0,80 (7,45*/0,97**)	0,64 (6,88*/0,99**)
35	2,0	0,88 (6,97*/0,99**)	0,89 (33,8*/0,99**)	0,85 (3,80*/0,99**)
50	0,8	0,33 (8,33*/0,99**)	0,38 (8,80*/0,98**)	0,32 (8,19*/0,99**)
50	1,5	0,58 (9,65*/0,99**)	0,67 (10,0*/0,99**)	0,57 (11,7*/0,99**)
50	2,2	0,69 (4,10*/0,98**)	0,74 (3,84*/0,99**)	0,68 (4,48*/0,99**)
65	1,0	0,44 (2,43*/0,99**)	0,52 (4,13*/0,99**)	0,42 (2,10*/0,99**)
65	2,0	0,54 (16,9*/0,99**)	0,58 (38,3*/0,97**)	0,53 (16,8*/0,98**)
71	1,5	0,78 (9,32*/0,99**)	0,79 (9,27*/0,99**)	0,79 (9,30*/0,99**)

* Desvio médio relativo (P , %)

** Coeficiente de determinação (R^2)

Tabela 4.29 - Valores do coeficiente de encolhimento (n) desvio médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) entre os modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 para todas as condições de secagem (UMIDSC2)

T (°C)	Var (m/s)	Coeficiente de encolhimento (n)		
		Uniforme 1	Uniforme 2	Central
29	1,5	0,35 (3,27*/0,97**)	0,38 (3,83*/0,98**)	0,34 (3,26*/0,97**)
35	1,0	0,33 (1,03*/0,98**)	0,37 (1,42*/0,98**)	0,32 (1,46*/0,98**)
35	2,0	0,33 (4,52*/0,98**)	0,36 (4,77*/0,99**)	0,33 (4,47*/0,98**)
50	0,8	0,20 (5,53*/0,99**)	0,20 (5,51*/0,99**)	0,12 (9,16*/0,99**)
50	1,5	0,40 (0,96*/0,99**)	0,43 (15,2*/0,99**)	0,40 (1,01*/0,99**)
50	2,2	0,52 (0,37*/0,98**)	0,53 (20,1*/0,96**)	0,42 (0,34*/0,99**)
65	1,0	0,42 (4,32*/0,97**)	0,41 (5,63*/0,98**)	0,42 (4,34*/0,97**)
65	2,0	0,47 (1,99*/0,98**)	0,47 (33,4*/0,97**)	0,47 (1,99*/0,98**)
71	1,5	0,55 (1,77*/0,98**)	0,55 (1,75*/0,99**)	0,55 (1,77*/0,98**)

* Desvio médio relativo (P , %)

** Coeficiente de determinação (R^2)

Resultados e discussão

Tabela 4.30 - Valores do coeficiente de encolhimento (n) desvio médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) entre os modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 para todas as condições de secagem (UMIDCC1)

T (°C)	Var (m/s)	Coeficiente de encolhimento (n)		
		Uniforme 1	Uniforme 2	Central
29	1,5	0,24 (4,61*/0,97**)	0,27 (4,55*/0,98**)	0,23 (4,63*/0,97**)
35	1,0	0,26 (4,16*/0,96**)	0,28 (3,79*/0,97**)	0,25 (4,22*/0,96**)
35	2,0	0,31 (9,24*/0,98**)	0,34 (9,83*/0,99**)	0,31 (9,12*/0,98**)
50	0,8	0,19 (9,92*/0,99**)	0,18 (9,70*/0,99**)	0,20 (9,96*/0,99**)
50	1,5	0,41 (6,86*/0,99**)	0,33 (6,14*/0,99**)	0,40 (6,93*/0,99**)
50	2,2	0,41 (5,99*/0,99**)	0,47 (6,01*/0,99**)	0,40 (6,0*/0,99**)
65	1,0	0,36 (8,32*/0,98**)	0,46 (8,39*/0,98**)	0,46 (8,30*/0,97**)
65	2,0	0,44 (5,48*/0,99**)	0,52 (11,32*/0,97**)	0,43 (5,25*/0,98**)
71	1,5	0,49 (5,22*/0,99**)	0,51 (15,5*/0,91**)	0,48 (5,20*/0,99**)

* Desvio médio relativo (P , %)

** Coeficiente de determinação (R^2)

Tabela 4.31 - Valores do coeficiente de encolhimento (n) desvio médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) entre os modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 para todas as condições de secagem (UMIDCC2)

T (°C)	Var (m/s)	Coeficiente de encolhimento (n)		
		Uniforme 1	Uniforme 2	Central
29	1,5	0,29 (5,03*/0,95**)	0,56 (11,8*/0,93**)	0,48 (4,97*/0,95**)
35	1,0	0,32 (3,08*/0,97**)	0,80 (3,07*/0,97**)	0,32 (3,08*/0,97**)
35	2,0	0,49 (4,75*/0,97**)	0,17 (4,59*/0,96**)	0,19 (4,78*/0,97**)
50	0,8	0,12 (4,95*/0,99**)	0,10 (4,75*/0,98**)	0,12 (4,97*/0,99**)
50	1,5	0,22 (2,11*/0,97**)	0,21 (2,11*/0,97**)	0,22 (2,11*/0,97**)
50	2,2	0,43 (4,47*/0,91**)	0,45 (4,47*/0,91**)	0,43 (4,47*/0,91**)
65	1,0	0,20 (9,39*/0,99**)	0,20 (9,26*/0,99**)	0,20 (9,41*/0,99**)
65	2,0	0,33 (2,86*/0,99**)	0,30 (2,90*/0,98**)	0,34 (2,86*/0,99**)
71	1,5	0,34 (2,17*/0,98**)	0,32 (2,73*/0,97**)	0,35 (2,10*/0,98**)

* Desvio médio relativo (P , %)

** Coeficiente de determinação (R^2)

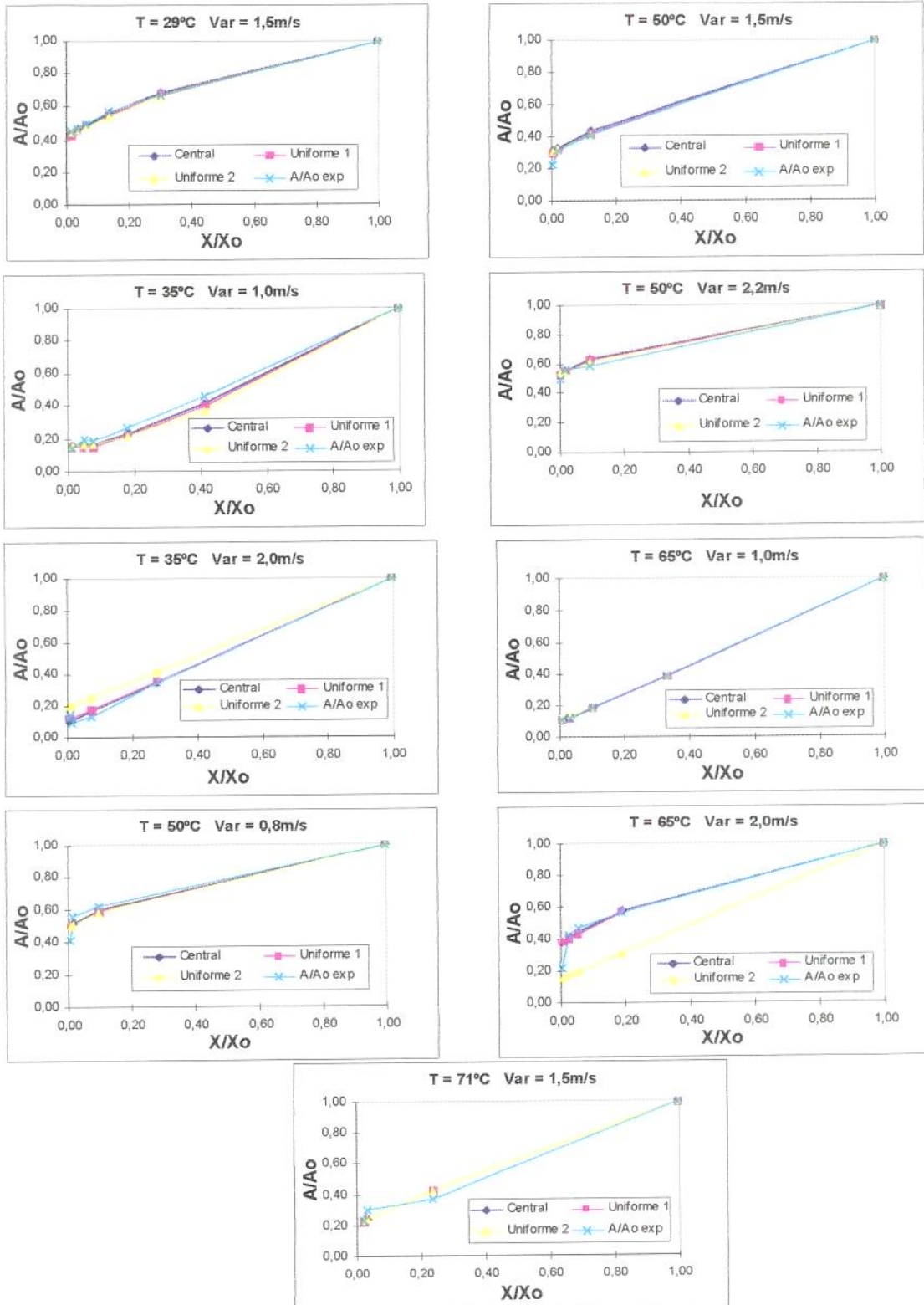


Figura 4.21 – Comparação entre os Modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 para todas as condições de secagem (UMIDSC1).

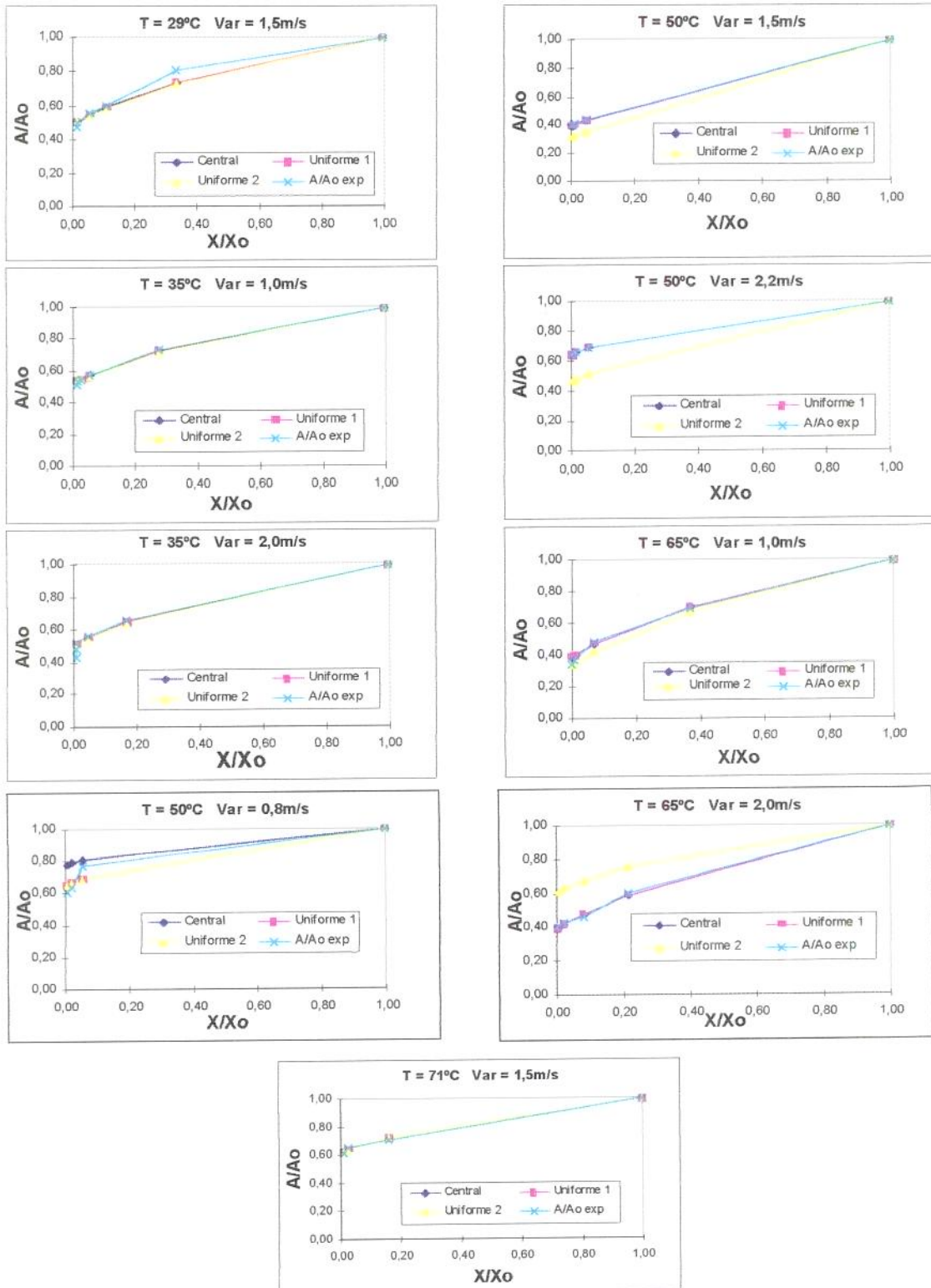


Figura 4.22 – Comparação entre os Modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 para todas as condições de secagem (UMIDSC2).

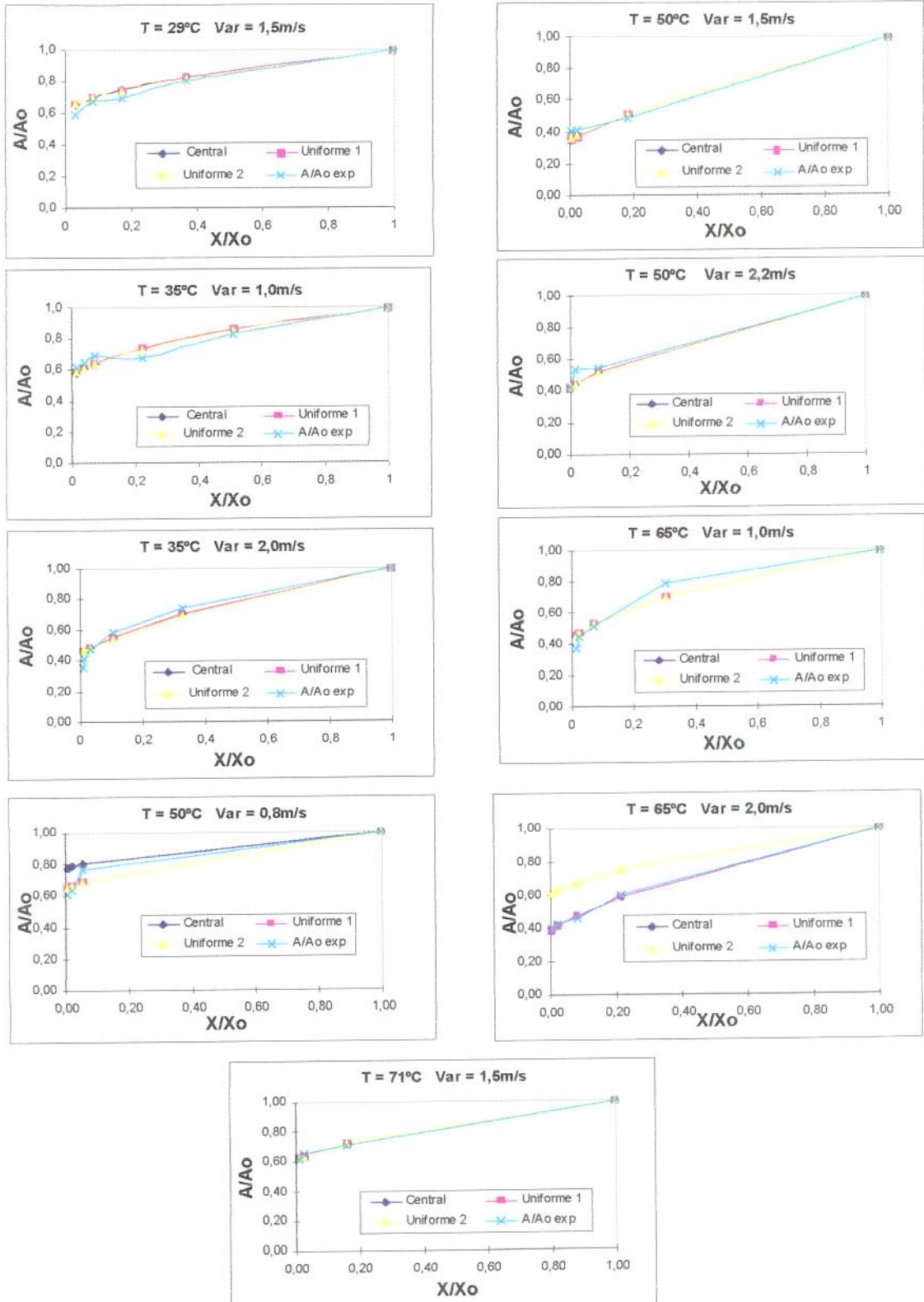


Figura 4.23 – Comparação entre os modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 para todas as condições de secagem (UMIDCC1).

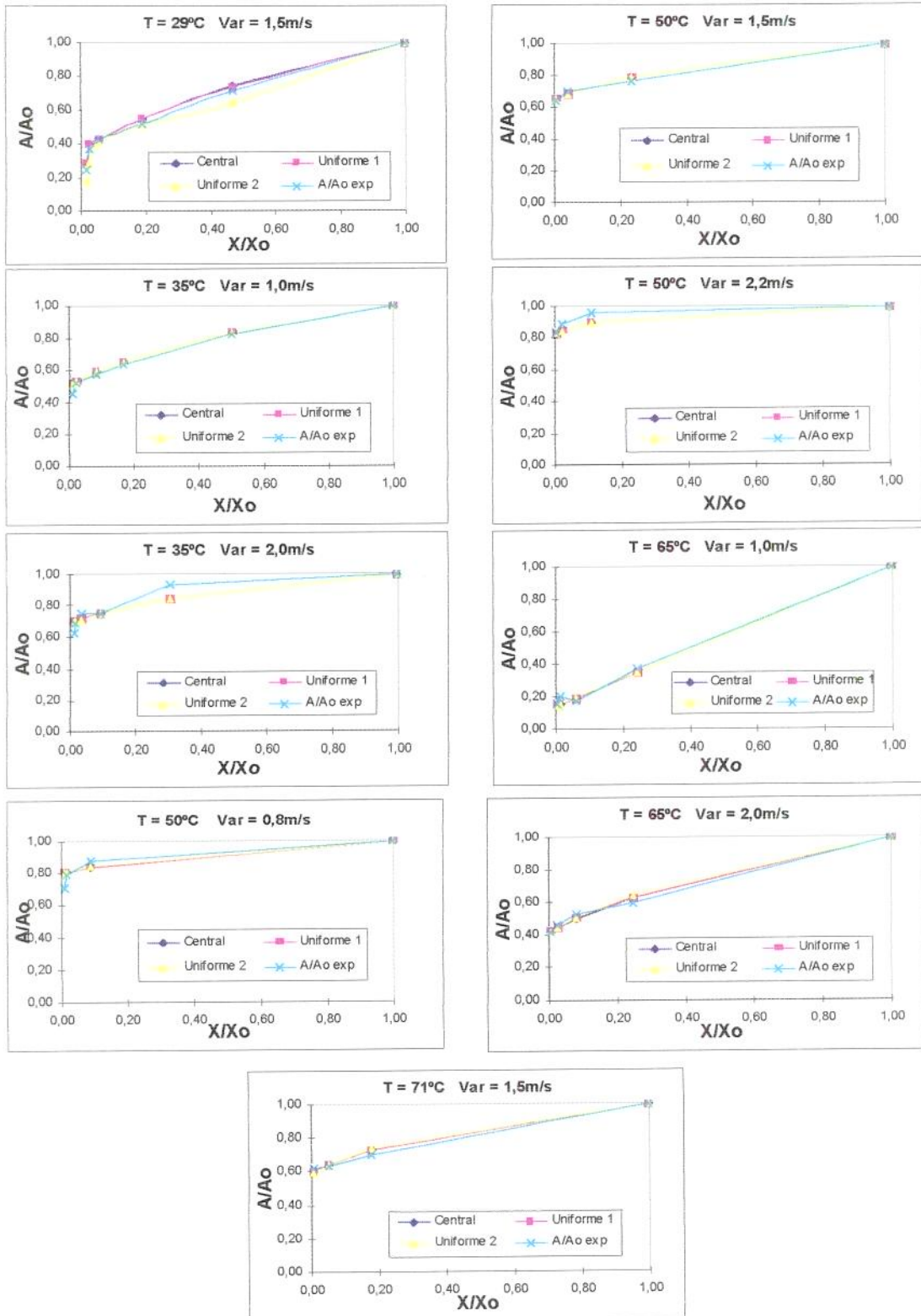


Figura 4.24 – Comparação entre os modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 para todas as condições de secagem (UMIDCC2).

Analisando-se a Figura 4.21 e Tabela 4.28 observa-se que os modelos Central, Uniforme 1 e Uniforme 2 de SUZUKI et al. (1976) se ajustam bem aos nossos dados experimentais, para todas as temperaturas, independente da velocidade do ar de secagem. Exceto para as temperaturas de 35° e 65°C com velocidade do ar de secagem de 1,0m/s e 2,0m/s, respectivamente, onde se nota que apesar do bom ajuste, o desvio relativo médio é maior que 10% conforme LOMAURO et al. (1985) e BARROS NETO et al. (1995), havendo uma discrepância considerável com relação ao modelo Uniforme 2 para maior velocidade do ar de secagem. Para temperatura de 71°C o ajuste foi muito bom para os três modelos estudados.

Analisando-se a Figura 4.22 e Tabela 4.29, verifica-se que os dados experimentais se ajustam muito bem aos três modelos estudados, exceção apenas para o modelo Uniforme 2 na temperatura de 50°C para velocidades de 1,5 e 2,2m/s, bem como à 65°C para velocidade de 2,0m/s, cujos desvios relativos médios são grandes. Podemos dizer que os melhores resultados encontram-se para 35°C, independente da velocidade do ar de secagem.

No caso da Figura 4.23 e Tabela 4.30 todos os modelos se ajustaram muito bem em relação a todas as temperaturas e velocidades do ar de secagem. No entanto, para temperatura de 65°C e velocidade do ar de secagem de 2,0m/s e 71°C, o modelo Uniforme 2 apresentou desvio médio relativo grande. Para a Figura 4.24 e Tabela 4.31 pode ser observado que apenas para temperaturas mais baixa, o modelo Uniforme 2 não se mostrou satisfatórios.

Analisando-se todos os gráficos aqui relacionados podemos concluir que de uma forma geral os três modelos se ajustaram satisfatoriamente aos nossos dados experimentais. O modelo de secagem Uniforme 1, provavelmente se ajusta melhor, uma vez que sua equação é função de quatro parâmetros (X , X_o , X_e e ρ_e).

5 – CONCLUSÕES

Para as condições em que foi realizado o trabalho, pode-se concluir que:

1 - O gengibre apresenta um alto teor de umidade, com densidades em torno de $0,96\text{g/cm}^3$ e pode ser considerado como um produto açucarado.

2 - Dos modelos estudados, o de GAB se ajustou melhor aos dados experimentais das isotermas de sorção;

3 - Os dados experimentais de adsorção apresentou valores de umidade de equilíbrio maior que os da dessorção;

4 - O calor isostérico de sorção do gengibre aumenta a medida que o conteúdo de umidade decresce e a equação triparmétrica de TOLABA e SUAREZ (1995) apresentou um bom ajuste aos dados experimentais podendo ser utilizada para prever o calor isostérico do gengibre para umidades de equilíbrio de até $0,3\text{ g/g}$;

5 - A cinética de secagem ocorre no período de taxa decrescente e a difusão é o mecanismo que governa o movimento de umidade;

6 - Os valores de difusividades efetiva sem encolhimento foram $0,70 \cdot 10^{-6}$ a $4,40 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ e considerando o encolhimento foram de $0,37 \cdot 10^{-6}$ a $3,86 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$, respectivamente.

7 - Os três modelos de encolhimento estudados representaram bem os dados experimentais, sendo os modelos Uniforme 1 e Central melhores.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCOT, K e LABUZA, T. P. Microbial growth response to water sorption preparation. Journal of Food Technology, v.10, p.603-611, 1975.
- AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C. e VIOLLAZ, P. E. The temperature dependence of isosteric heat of sorption of some cereal grains. International Journal of Food Science and Technology, v.23, p.141-145, 1988.
- ANDERSON, R. B. Modifications of the BET equation. Journal of American Chemical Society, v.68, p.686, 1946.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). Official methods of analysis. 14 ed. Arlington, Virginia, 1984. 1v. (várias paginações).
- BARROS NETO, B. de; SCARMÍNIO, I. S. e BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos. Campinas, Editora da UNICAMP, 1995. 299p.
- BECKER, H. A. e SALLANS, H. R. A study of the desorption isotherms of wheat at 25°C and 50°C. Cereal Chemistry, v.33, p.79-91, 1956.
- BENDER, E. Dicionário de nutrição e tecnologia de alimentos, ed. Livraria Rocca, São Paulo, 1982. 85p.
- BOER de, J. H. The dynamical character of adsorption. Clarendon Press, Oxford, 1953.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G. e HUNTER, J. S. Statistics for experimenters. An introduction designs, data analysis and model building. Nova York; Wiley, 1978.
- BOX, G. E. P. e WETZ, J. Criteria for judging adequacy of estimation by an approximate response function. University of Wisconsin Tec. Report. n.9, 1993.
- BOX, G. E. P. e WILSON, K. B. On the experimental attainment of optimum conditions. J. Roy Statist. Soc. p.38, 1951.

Referências Bibliográficas

- BROD, F.P.R., SILVA, J. E. A. R. e PARK, K. J. " Construção de secador vertical convectivo ", In: XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campinas. Programas e Resumos. Jaboticabal: SBEA, p.260, 1994.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W. e HALL, C. W. Drying Cereal Grains. Connecticut, The AVI Publishing Company, Inc., 1974. 265p.
- BRUNAUER, S., EMMET, T. H. e TELLER, F. Adsorption of gases in multimolecular layers. Journal of American Chemistry Society; v.60, n.2, p.309-19, 1938.
- CASTAÑON, C. A. e BARRAL, A. O. Sorption isotherms of raw squid (*Illex argentinus*) muscle. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie., v.21, n.4., p.212-215, 1988.
- CHARM, S. E. Dehydration of foods. The fundamentals of food engineering, Westport. The AVI Publishing Company Inc., p.252-277, 1963.
- CHEN, S. C. e JOHNSON, W. H. Kinetics of moisture movement in higroscopic materials. . Transactions of the American Society of Agricultural Engineers., v.12, n.1, p.101, 1969.
- CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: MUJUNDAR, A. S. (ed.) Advances in drying. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1981, p.73-102.
- CHIRIFE, J e IGLESIAS, H. A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1 - a review. Journal of Food Technology, v.13, p.159-174, 1978.
- CHUNG, D. S.; PFOST, H. B. Adsorption and desorption water vapour by cereal grains and their products. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, v. 10, n.4, p.149-157, 1967.
- CRANK, J. The mathematics of diffusion. 2ed., Clarendon Press, 1975, 414p.
- DAUDIN, J. D., Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaudes. Science Aliments., v.3, n.1, p.1-36, 1983.
- De BOER, J. H. The dynamical character of adsorption. Clarend Press, 1953.
- DURAL, N. H. e HINES, A. L. A new theoretical isotherm equation for water vapor-food systems: multilayer adsorption on heterogeneous surfaces. Journal of Food Engineering. v.20, n.1, p.75-96, 1993.

Referências Bibliográficas

- EDWARDS, D. The market for dried, preserved and fresh ginger. London, Tropical Products Institute.p.4-12, 1975.
- ENCICLOPÉDIA BARSA, Rio de Janeiro, Enc. Britannica, v.7, 1965, 3036p.
- FARREL, K. T.; Spices, condiments, and seasonings. Second edition. An AVI Book., Published by Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- FORTES, M. e OKOS, M. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. In: Advances in Drying, ed. Arum S. Mujundar, Hemisphere Publishing Corporation. Washington. v.1, p.119-154, 1980.
- FRANCO, G. Tabela de composição química dos alimentos. São Paulo, Atheneu, 1992, 160 p.
- FUSCO, A. J.; AVANZA, J. R. e GABITTO, J. F. Diffusional model for drying with volume change. Drying Technology, v.9, n. 2, p.397-417, 1991.
- GÁL, S. Recent advances in techniques for determination of sorption isotherms. In. International Symposium, Glasgow, 1974. Proceedings of an: London, Academic, 1975. p.139-54.
- GUIA RURAL. Horta. São Paulo, abril, 1990. 250p.
- GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. Journal. of Research of Standards A. Physics and Chemistry. v.81, n.1, p.92-93, 1977.
- GUGGENHEIM, E. A. Applications of statistical mechanics. Clarendon Press, Oxford, 1966, 86p.
- HAAG, H.; SAITO, S.; DECHEN, A. R. e CARMELO, Q. A. C. Acúmulo de massa seca e extração de macro e micronutrientes por uma cultura de gengibre. Anais. ESALQ, Piracicaba. v.47, n.2., p.435-457, 1990.
- HALL, C. W. Drying farm crops. Ann Arbor, Edwards Brothers, 1971, 336p.
- HEIDELBAUG, N. D. e KAREL, M. Stability of low and intermediate moisture foods. In: GOLDBLITH, S. A.; REY, L.; ROTHMAYR, W. W. Freeze Drying and Advance Food Technology. New York: Academic Press, 1975, p.643-674.
- IGLESIAS, H. e CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. Journal of Food Technology, v.11, p.109-116, 1976.

Referências Bibliográficas

- ISHIMURA, I.; SUGUINOSITA, L. N. e PENTEADO, L. A. C. Informações sobre a cultura do gengibre. CATI, São Paulo., 1988.
- ISSE, M. G.; SCHUCHMANN, H. e SCHUBERT, H. Divided sorption isotherm concept: an alternative way to describe sorption isotherm data. v.16., n.2, p.147-157, 1983.
- JOWITT, R.; ESCHER, F.; HALLSTOM, B.; MEFFERT, H. F. T.; SPIESS, W. E. L. e VOS, G. Physical properties of foods. Applied Science Publishers, London and New York, 1983.
- KAPSALIS, J. G. Influences of hysteresis and temperature on moisture sorption isotherms. In: ROCKLAND, L. B. (ed.). Water activity: theory and applications to food. New York: Marcel Dekker, 1981, v.9, p.173-213.
- KEEY, R. B. Moisture: solid relationships. Drying principle and practices. Oxford. 1972. p.19-49.
- KILPATRICK, P. W.; LOWE, E. e ARSDEL, W. B. Tunnel dehydrators for fruits and vegetables. Advances in food research, New York, Academic Press, v.6, 1955. 360p.
- KING, C. J. Rates of moisture sorption and desorption in porous dried foodstuffs. Food Technology, v. 22, p.165-171, 1968.
- LABUZA, T. P. Sorption phenomena in foods. Food Technology, v.22, n.3: 263-272, 1968.
- LABUZA, T. P; TANNENBAUM, S. R. e KAREL, M. Water content and stability of low - Moisture and Intermediate - Moisture Food Technology, n.24, p.543, 1972.
- LACERDA FILHO, A. F. Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do café. Viçosa, UFV, 1986. 136p. (Dissertação de Mestrado)
- LANGMUIR, I. The adsorption of gases plane surfaces of glass, mica and platinum. Journal. of American Chemical. Society, v. 46, p.1361-1403, 1918.
- LIMA, M. F. M. de. Desidratação de polpa de umbu em leite de jorro - Estudos fluidodinâmicos e térmicos. Campina Grande: Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba. 1992. 118p. (Dissertação de Mestrado).
- LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S. e LABUZA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: Fruit, vegetable and meat products. Lebensmittel-Wissenschaft and Technologies, v.18, p.112-22, 1985.

Referências Bibliográficas

- LOZANO, J. E.; ROTSTEIN, E. e URBICAIN, M. J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. Journal of Food Science, v.48, p.1497-1502, 1983.
- MAIA, N. B.; BOVI, D. A. e DUARTE, F. R. Obtenção e análise do óleo essencial do gengibre: efeito de secagem e processamento. Tecnologia de pós-colheita. Bragantia, Campinas, v.50, n.1, p.83-92, 1991.
- MAKOWER, B. e DYE, W. B. Equilibrium moisture content and crystallization of amorphous sucrose and glucose. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v.4, p.42-86, 1955.
- MAZZA, G. e Le MAGUER, M. Water sorption properties of yellow globe onion (*Allium cepa* L.) Canadian Institute Science Technology Journal, v.11, n.4., p.189-193, 1978.
- MISRA, R. N. e YOUNG, J. H. Numerical solution of simultaneous diffusion and shrinkage during soybean drying. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, v.23, n.5, p.1277-1282, 1980.
- MOWLAH, G.; TAKANO, K.; KAMOI, I. e OBARA, T. Water transport mechanism and some aspects of quality changes during air dehydration of bananas. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie. v.16, n.2, p.103-7, 1983.
- MURR, F. E. X. Estudo comparativo dos fenômenos de secagem de batata (*Solanum tuberosum*, L. Cultivar Bintje). Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1992. 188p. (Tese de Doutorado).
- NUCCI, M. C. C.; MURR, F. E. X.; Influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem na qualidade do gengibre seco. Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1994. 45p. (Trabalho de Iniciação Científica).
- OTMHER, D. Correlating vapor pressure and latent heat data. Ind. Eng. Chemistry, v.32, n.6, 841, 1940.
- PARK, K. J. Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem. Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1987. 54p. (Tese, Livre Docência em Fenômenos de Transporte).
- PARK, K. J. e NOGUEIRA, R. I. Modelos para ajuste de isoterma de sorção de alimentos. Revista Engenharia Rural, Piracicaba, v.3, n.1, p.80-86, 1992.

Referências Bibliográficas

- PEIXOTO, A. R.; Gengibre e suas aplicações. Chácaras e quintais, São Paulo, v.113, n.3, p.207-210, 1966.
- PEREIRA, A. M., QUEIROZ, D. M. de. Higroscopia, CENTREINAR, 1987. 28p.
- PARRY, J. W. Spices - Vol II, Chemical Publishing Co., 1969
- PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. Journal of Food Process Engineering, v.16, n.1, p.21-37, 1993.
- PERRY, J. H. Chemical Engineer's Handbook, 6 ed. N.Y. Mc Graw-Hill, 1984. 1v..
- PRADO, M. E. T.; Secagem de tâmaras (*Phoenix dactylifera* L.) para a obtenção de tâmara passa. Campinas -SP. Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas. 1998. 149p. (Tese de Doutorado).
- PUZZI, D. Manual de armazenamento de grãos: armazéns e silos, São Paulo, Agronômica Ceres, 1986. 405p.
- RAO, M. A., RIZVI, S. S. H. Engineering Properties of Foods. Nova Iorque, Marcel Dekker, 1986. 398p.
- ROSENGARTEN Jr., F. The Book of Spices, Livingston publishing Co., 1969.
- SANCHEZ, C. V. Modelagem e predição de atividade de água em fluidos alimentícios. Exame de qualificação de área. UNICAMP. 1994.
- SARAVACOS, G. D.; TSIOURVAS, D. A. e TSAMI, E. Effect of temperature on the water adsorption isotherms of Sultana raisins. Journal of Food Science, v.51, n.2, p.381-7, 1986.
- SCARPARE FILHO, J. A. A cultura do gengibre. ESALQ, Piracicaba. 18p. 1988.
- SERENO, A. M. e MEDEIROS, G. L. Simplified model for the prediction of drying rates for foods. Journal of Food Engineering, v.12, n.1, p.1-11, 1990.
- SILVA, G. F. Processamento de urucum em leite de jorro. Campina Grande: Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba. 1991. 120p. (Dissertação de Mestrado).
- SPIESS, W. E. L. e WOLF, W. F. The results of the Cost 90 project on water activity. In: JOWITT, R. (ed) Physical Properties of Foods. London and New York: Applied Science Publishers, 1983, p.65-91

Referências Bibliográficas

- SUAREZ, C. e VIOLLAZ, P. E. Shrinkage effect on drying behavior of potato slabs. Journal of Food Engineering., v.13, n.2, p.103-114, 1991.
- SUZUKI, K; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T. e HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root, vegetables. J. of Food Science., v. 41, p.1189-1194, 1976.
- TEIXEIRA NETO, R. O. e QUAST, D. G. Isotermas de adsorção de umidade em alimentos. Coletânea do ITAL, Campinas, v.8, p.141-197, 1977.
- TREYBALL, R. E. Drying. In: Mass transfer operations. New York, McGraw-Hill, 1968, p.569-75.
- TSAMI, E.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. e SARAVACOS, G. D. Heat of sorption of water in dried fruits. J. F. Sci. and Tech., v.25, p.350-62, 1990.
- TOLABA, M. P e SUAREZ, C. Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusion model. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, v.21, n.2., p.83-85, 1995.
- VACCAREZZA, L. M.; LOMBARDI, J. L. e CHIRIFE, J. Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. Journal of Food Technology., v.9, p.317-327, 1974.
- VAGENAS, G. K.; MARINOS-KOURIS, D. Finite element simulation of drying of agricultural products with volumetric changes. Appl. Math. Modeling., v.15, n.9, p.475-482, 1991.
- VAN ARSDEL, W. B.; COPLEY, M. e MORGAN Jr., A. Foods dehydration. The AVI Publishing Company Inc., v.2, 1973. 529p.
- WANG, N. e BRENNAN, J. G. Thermal conductivity of potato as a function of moisture contents. Journal of Food Engineering, v.17, n.2, p.153-160, 1991.
- WOLF, W. SPIESS, W. E. L. e JUNG, G. Die wasserdampft-sorptions isotherms einiger in the Literature brisling weenie berucksichtigter Lebensmittel. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie., v.6., n.3., p.94, 1973.
- YOSHIDA, C. M. P.; Cinética de secagem do milho superdoce. Campinas -SP. Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas. 1997. 149p. (Dissertação de Mestrado).
- YOUNG, J. H. e NELSON, G. L. Theory of histerese between sorption and desorption isotherms in biological materials. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, v.10, n.2, p.260-263, 1976.

1 - Determinação do teor de umidade

Existem diferentes técnicas para determinação do conteúdo de água dos alimentos, porém, basicamente são utilizados processos gravimétricos (com e sem emprego de calor) e processos químicos, sendo porém os gravimétricos mais utilizados. Para a determinação do conteúdo de água do gengibre foi utilizado o método descrito pela A.O.A.C. (1984). A determinação foi feita em triplicata e foram utilizados cadinhos de papel alumínio secos a 100°C em estufa (marca FANEM modelo 320-SE) e de massa conhecida. As amostras foram levadas a estufa de circulação forçada a 100°C por 3 horas. Todas as medidas de massa foram feitas em balança analítica, marca BOSCH, modelo SAE 200. A massa de amostra obtida após esse processo é chamada de massa seca. O conteúdo de umidade pode ser calculado da seguinte forma:

$$X = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{água}} + m_s} = \frac{m_a - m_f}{m_a} \quad (\text{A.1})$$

Onde:

X = umidade da amostra em base úmida;

m_a = massa da amostra antes da secagem;

m_f = massa da amostra após a secagem;

m_s = massa seca da amostra;

$m_{\text{água}}$ = massa de água da amostra.

O conteúdo de umidade também pode ser expresso em umidades de massa seca ou umidade em base seca, calculada conforme a equação abaixo, onde X_{bs} é a umidade da amostra em base seca;

$$X_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_s} = \frac{m_a - m_f}{m_f} \quad (\text{A.2})$$

2 - Determinação de lipídeos

Os lipídeos geralmente são extraídos dos alimentos com auxílio de solventes orgânicos (éter etílico, éter de petróleo). O tempo de extração é variável, dependendo da natureza do produto examinado. O ponto final da extração é indicado quando uma gota do solvente recém-destilado não acusar mais presença de gordura. A metodologia e a extração contínua é feita em aparelho tipo Soxhlet. É um processo gravimétrico, baseado na perda de peso do material submetido à extração com éter etílico, ou na quantidade de material dissolvido pelo solvente. O material dessecado a ser usado na extração, deve estar finamente dividido, para permitir melhor atuação do solvente. Materiais que se aglomeram facilmente formando pastas consistentes devem ser manipulados com areia lavada e seca antes de serem colocados no cartucho. Após ser dessecado o material é então colocado no cartuchos de Soxhlet.

Materiais:

Cartuchos de Soxhlet;

Extrator tipo Soxhlet;

Éter etílico anidro e algodão desengordurado;

Balões de fundo chato de 250ml;

Dessecador e estufa regulada a 105°C.

Pesar 2 a 5g de material dessecado, transferir quantitativamente para o cartucho do Soxhlet e cobrir a amostra no cartucho com algodão. Extrair em aparelho de Soxhlet com éter etílico, utilizando balão de fundo chato (250ml) previamente dessecado e tarado. Extrair por aproximadamente 6 horas. Evaporar o solvente e colocar o balão com resíduo em estufa a 105°C. Resfriar em dessecador até a temperatura ambiente e pesar. Calcular a quantidade de lipídeos para 100g de produto dessecado e relacionar para 100g de produto integral.

3 - Determinação da proteína

Método: Micro-Kjeldahl (AOAC). Baseia-se na determinação de nitrogênio total da amostra, que através de cálculo é convertida em nitrogênio proteico. Para tanto, considera-se que cada 100g de proteína contém em média 16g de nitrogênio, obtendo-se desse modo o fator 6,25 que multiplicado pelo percentual de nitrogênio total da amostra, dará o percentual de proteína da mesma. Uma massa conhecida da amostra seca e desengordurada (inferior a 100 g) foi colocada no balão de Kjeldahl. Adicionou-se ao balão 1,9±0,1g de K₂SO₄, 40mg de HgO e 3 a 5ml de H₂SO₄. Foram colocadas no balão 3 a 4 pérolas de vidro e a amostra foi digerida (em capela) até se tornar incolor. Em seguida foi transferida (sem as pérolas de vidro) para o aparelho destilador, lavando o balão 2 a 3 vezes com porções de 4 a 5ml de água destilada.

Adicionou-se ao destilador 10ml de solução de NaOH - Na₂S₂O₃. O destilado foi coletado em erlenmeyer contendo 5 ml da solução saturada de ácido bórico (H₃BO₃) e 3 a 5 gotas de indicador (verde de bromocresol - vermelho de metila). Foi coletada aproximadamente 50ml do destilado, que foi titulado com solução de HCl 0,02N até o aparecimento da cor vermelha ou rosa. A porcentagem de nitrogênio total pode ser calculada da seguinte forma:

$$\%N = \frac{N_{HCl} \cdot V \cdot 14}{A} \quad (A.3)$$

Onde:

%N = porcentagem de nitrogênio total na amostra;

N_{HCl} = normalidade da solução de HCl (0,02N);

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

A = massa da amostra (tomada para ensaio).

Para calcular a porcentagem de proteína na amostra, basta multiplicar a porcentagem de nitrogênio total por 6,25.

Preparo das soluções:

- 1 - Solução de NaOH. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: Dissolver 600g NaOH em 700ml de água destilada aproximadamente; dissolver 50g de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ em 150ml de H_2O destilada aproximadamente; juntar à solução de NaOH lentamente, evitando aquecimento. Completar o volume para 1000 ml.
- 2 - Indicador: preparar solução alcoólica de vermelho de metila a 0,2% e de verde de bromocresol a 0,2%. Misturar 1 parte da solução de vermelho de metila com 5 partes da solução de bromocresol.
- 3 - Solução de HCl 0,02N: medir 1,97ml de HCl e diluir para 1000 ml com H_2O destilada. Fatorar com solução de NaOH 0,02N.
- 4.- Solução de NaOH 0,02N: pesar 0,825mg de NaOH e diluir para 1000ml com água destilada. Fatorar com solução de ácido oxálico 0,02N.
- 5 - Solução de ácido oxálico 0,02N: pesar exatamente 0,3152g de ácido oxálico e diluir para 250 ml com água destilada.
- 6.- Solução de ácido bórico: pesar 20g e acrescentar 1000ml de água destilada.
- 7 - Para achar o fator de correção de NaOH: pipetar 5ml de ácido oxálico 0,02N no erlenmeyer. Pingar três gotas de fenolftaleína a 1% em um pouco de H_2O (aproximadamente 20ml). Colocar na bureta NaOH 0,02N. Fazer a titulação.
- 8 - Para achar o fator de correção de HCl 0,02N: pipetar 5ml de NaOH 0,02N no erlenmeyer com um pouco de H_2O . Pingar 3 gotas de fenolftaleína 1%. Colocar na bureta HCl 0,02N. Fazer a titulação.

4 - Determinação de fibras

A fração de fibras representa o resíduo das substâncias das paredes celulares e além da celulose e lignina, a areia e outras substâncias minerais presas aos tecidos celulares. O processo mais utilizado para essa determinação é o de Hennemberg que, apesar de datar de 1864, vem sendo utilizado com alguma modificação. O método visa simular *in vitro*, o processo da digestão *in vivo*. Consta fundamentalmente de uma digestão em meio ácido, seguida por uma digestão em meio alcalino. O resíduo dessas digestões representa a fibra bruta. O resíduo da incineração desse material fornece os subsídios para o cálculo da fração de fibras.

Antes de iniciar a prática foi preparado um cadinho de Gooch com algodão de vidro, aquecido em forno mufla a 550°C e tarado. Colocou-se em um béquer (graduado até 500ml) uma massa conhecida de amostra seca e desengordurada (aproximadamente 2g). Em seguida acrescentou-se uma solução de H_2SO_4 1,25% aquecida a ebulição sobre o material do béquer, até a marca de 200ml. A solução foi fervida por exatamente 30 minutos. Filtrou-se à vácuo o líquido ainda quente, sobre papel de filtro comum. O béquer foi lavado com água destilada quente, sem transferir para o funil de Buchner os resíduos por acaso existentes. Quando a filtração estava perto do final, uma solução de NaOH 1,25% foi aquecida à ebulição. Os resíduos do papel foram transferidos para o béquer com auxílio da solução de NaOH e o volume completado até 200ml com essa solução quente. Essa solução foi levada novamente à ebulição por 30min. O material foi filtrado ainda quente à vácuo, usando cadinho de Gooch, e o béquer foi lavado com água destilada quente. Lavou-se o resíduo do cadinho com água destilada quente, até que toda a alcalinidade tivesse desaparecido e em seguida 2 vezes com álcool etílico e 2 vezes com éter etílico.

Esse material foi dessecado em estufa a 105°C, pesado, incinerado em mufla a 550°C e outra vez pesado. O peso da fibra total é a diferença entre a massa do cadinho e do material dessecado. A diferença entre a parte mineral e a fibra total, dará a fração fibra do alimento (ou seja a diferença entre a massa do material que saiu da estufa e do material que saiu da mufla).

5 - Determinação de cinzas

Conforme normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz. Pesou-se com exatidão em cadinho calcinado e tarado cerca de 2g da amostra dessecada. Iniciou-se a incineração lentamente em bico de gás, procurando-se aquecer igualmente todas as faces do cadinho. Depois de completamente carbonizado, o cadinho foi levado à mufla a 550°C para total destruição da matéria orgânica. depois de frio o material foi pesado. A diferença entre a massa do cadinho e do calcinado fornece a quantidade de cinzas da amostra.

6 - Densidade

Foi determinada com solução de tolueno. Uma massa conhecida foi colocada numa proveta com um volume conhecido de tolueno. Conhecendo-se o volume de tolueno deslocado, a densidade pode ser calculada como:

$$\rho = m / (V_f - V_i) \quad (A.4)$$

Onde:

ρ = densidade;

m = massa do gengibre;

V_i = volume de tolueno;

V_f = volume de tolueno + gengibre.

7 - Determinação de açúcares - antrona

-Fundamento:

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

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

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

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

-Material:

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

Ácido sulfúrico concentrado p.a.

Solução padrão de glicose (200µg/ml)

-Vidraria: beakers de 250ml; bastão de vidro; Funil; pipetas de 10,1 e 0,1ml e tubos de ensaio.

-Equipamentos: banho-maria fervente; banho de gelo; balança analítica; espectrofotômetro e centrífuga.

-Técnica: Amostra sólida (extração de glicose AOAC, 1984); Pesar cerca de 2g da amostra em cápsula de porcelana. Transferir para erlenmeyer de 250ml com o auxílio de 50ml de álcool, aproximadamente, a 70% e adicionar cerca de 0,5g de carbonato de cálcio.

Manter em banho-maria a 80-85°C por uma hora sob refluxo com auxílio de funil de gargalo ou haste de vidro. Retirar o erlenmeyer do banho e deixar em repouso por 15 horas sob temperatura ambiente. Completar o volume para 100ml com álcool a 95%. Agitar, filtrar em papel de filtro para becker de 250ml; Colocar o becker em chapa aquecedora para evaporar até cerca de 10ml. Adicionar cerca de 10ml de água destilada lavando as paredes do becker para retirar o resíduo e deixar aquecer na chapa. Transferir para balão volumétrico de 100ml.

Extração da sacarose:

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

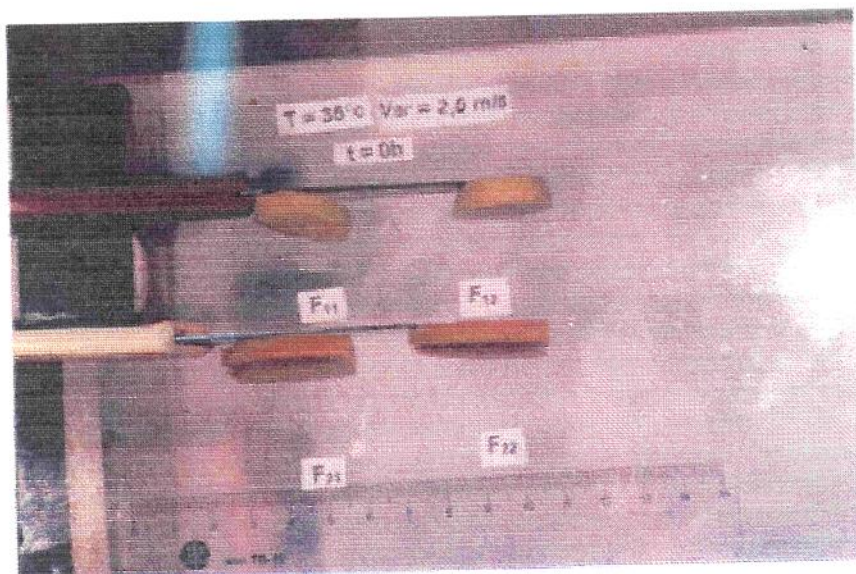
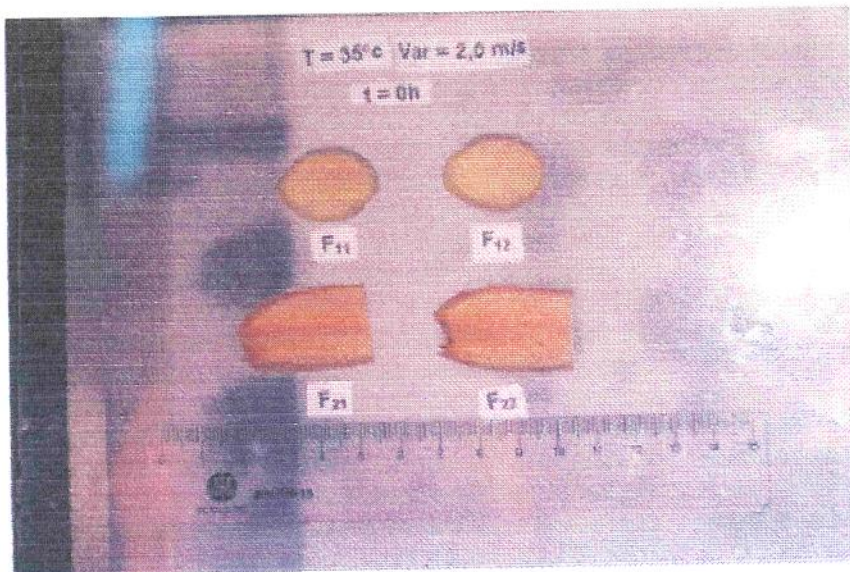
Adicionar 0.5ml de HCl, ferver 15 minutos em banho-maria.

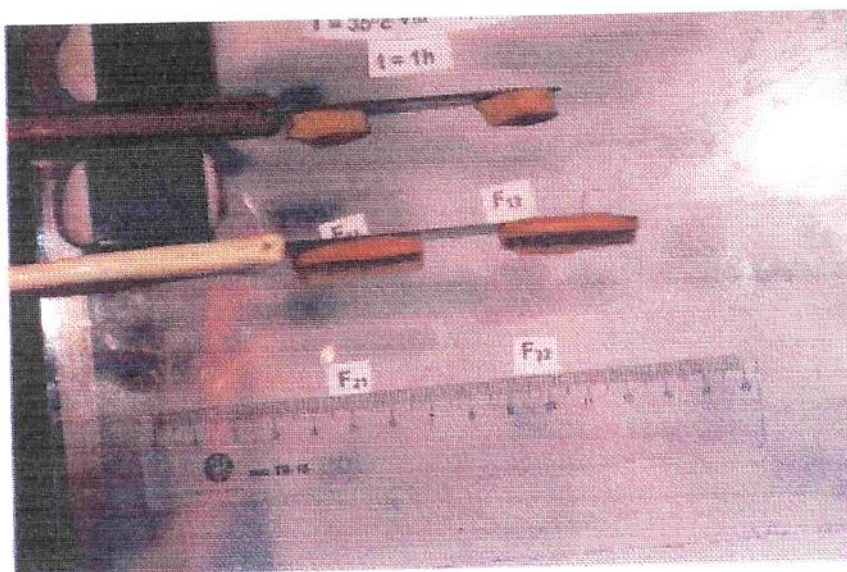
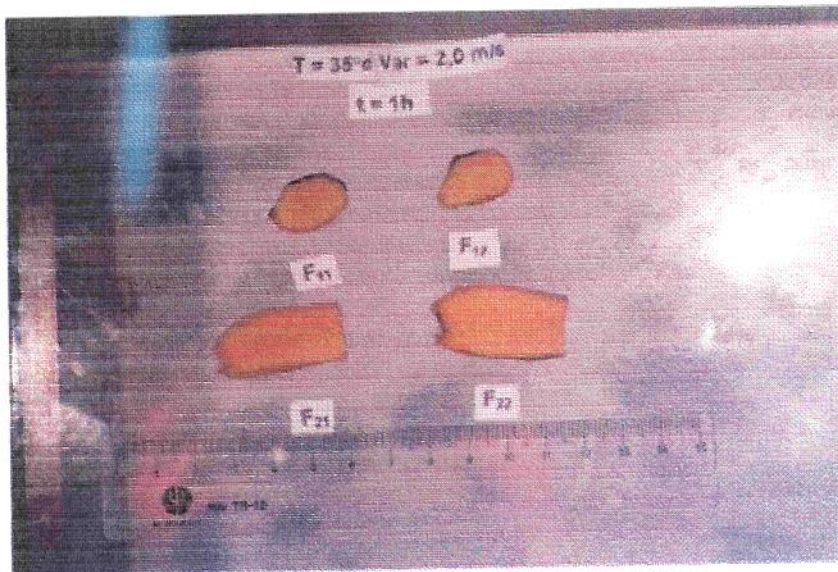
Resfriar e neutralizar com solução saturada de Na_2CO_3 .

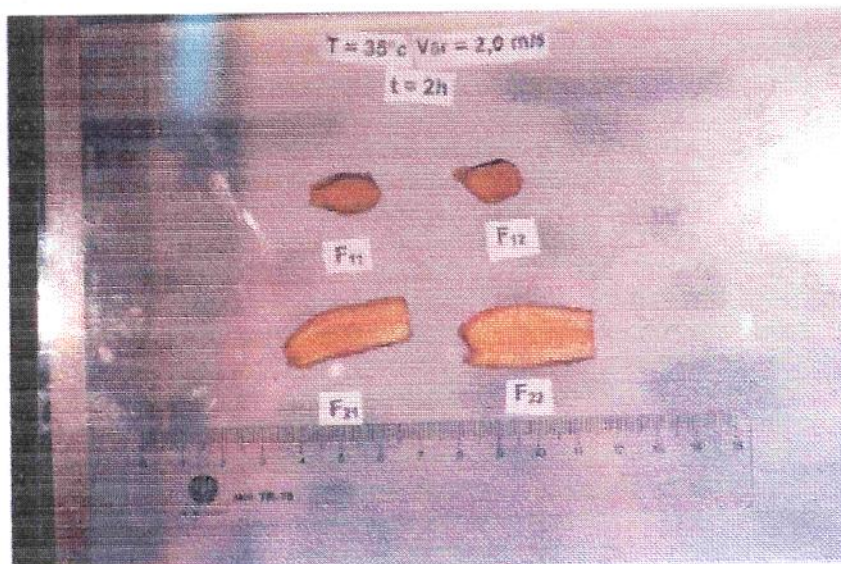
Completar o volume para 50ml com água destilada. Dosear.

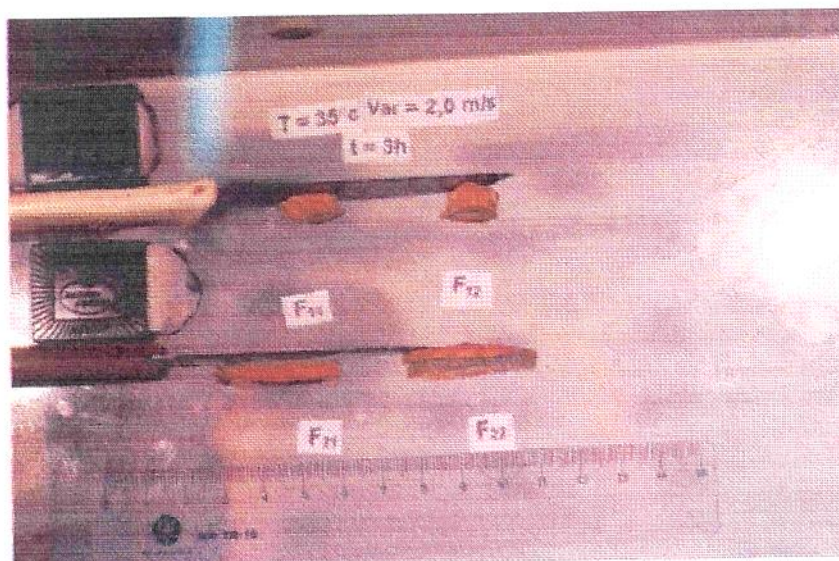
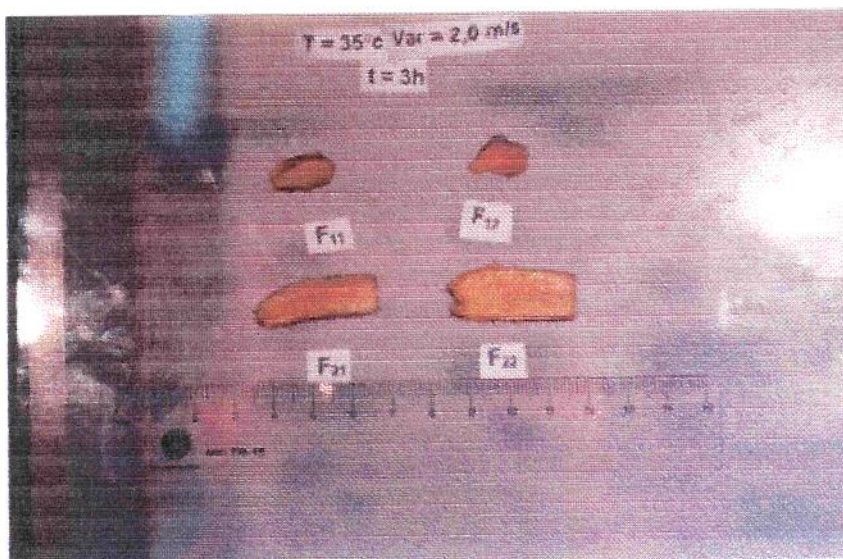
Apêndice B

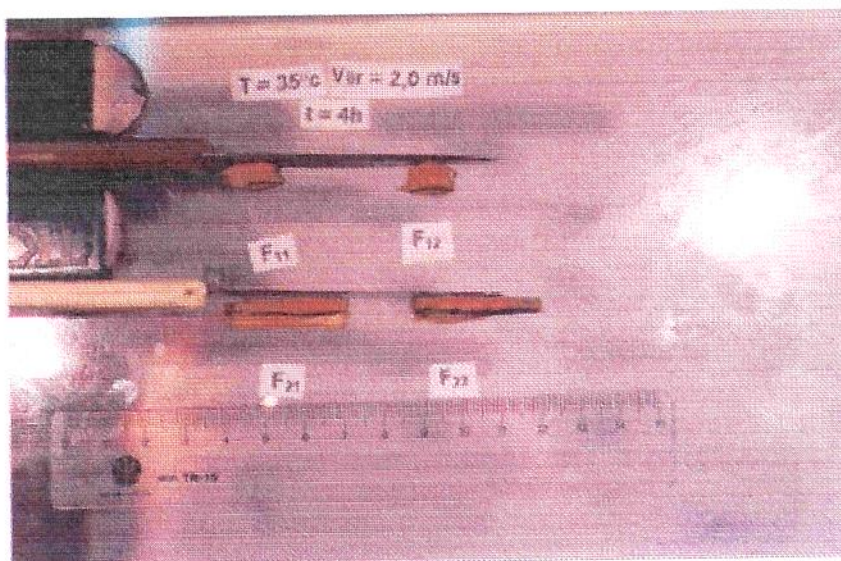
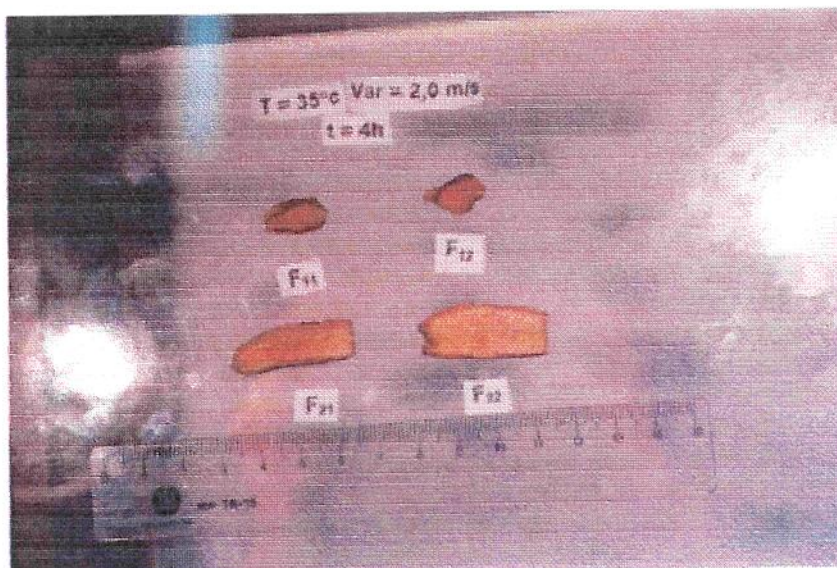
Fotos 1 – Fotos de amostra de gengibre sem casca em diferentes períodos de secagem, utilizadas para planimetria ($T = 35^{\circ}\text{C}$ – $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$). Na parte superior, corte transversal e na superior, longitudinal as fibras

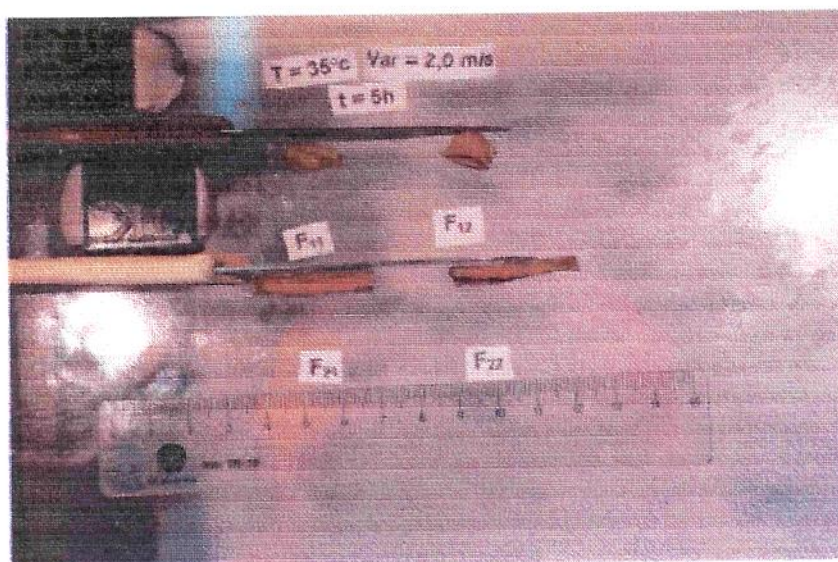
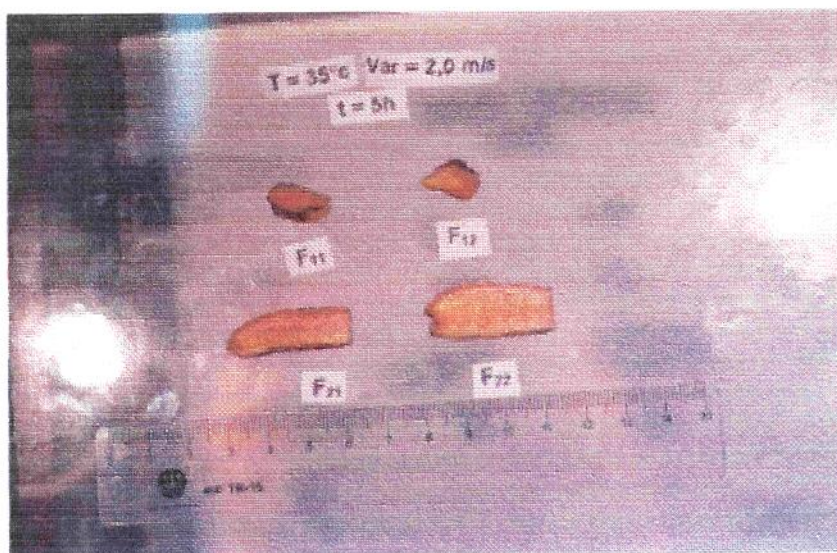












UMIDSC1

C.1- ANOVA para o tempo = 0,25h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1ª ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,0594	0,0944	2	2	0,0297	0,0472
Resíduos	$2,78 \cdot 10^{-3}$	0,0178	4	8	$6,96 \cdot 10^{-4}$	$2,22 \cdot 10^{-3}$
F. de ajuste	$2,49 \cdot 10^{-3}$	0,0175	2	6	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$2,92 \cdot 10^{-3}$
Erro puro	$2,92 \cdot 10^{-4}$	$2,92 \cdot 10^{-4}$	2	2	$1,46 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-4}$
Total	0,0622	0,1122	6	10		
teste F 1a.ordem	teste F 2a.ordem	R ² 1a.ordem	R ² 2ª.ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
42,70	21,45	0,96	0,84	Ft R	6,94	4,35
				Fc/Ft r	6,15	$4,69 \cdot 10^{-3}$
8,53	20,00			Ft Fa	19,00	19,35
				Fc/Ft Ep	0,45	1,03

Modelo Linear → $Adm = 0,6 - 0,105T - 0,062Var$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,632 - 0,089T - 0,062Var$

C.2 – ANOVA para o tempo = 0,5h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,0980	0,1358	2	1	0,0490	0,1358
Resíduos	$1,06 \cdot 10^{-3}$	0,0327	4	9	$2,66 \cdot 10^{-4}$	$3,27 \cdot 10^{-3}$
F. de ajuste	$1,00 \cdot 10^{-3}$	0,0316	2	7	$5,00 \cdot 10^{-4}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
Erro puro	$1,06 \cdot 10^{-3}$	0,0011	2	2	$5,31 \cdot 10^{-4}$	$5,31 \cdot 10^{-4}$
Total	0,0990	0,1685	6	10		
teste F 1a.ordem	teste F 2a.ordem	R ² 1a.ordem	R ² 2a.ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
184,31	41,57	0,99	0,81	Ft R	6,94	5,12
				Fc/Ft r	26,56	8,12
$9,40 \cdot 10^{-4}$	8,50			Ft Fa	19,00	19,35
				Fc/Ft Ep	$4,90 \cdot 10^{-5}$	0,44

Modelo Linear → $Adm = 0,4 - 0,14T - 0,07Var$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,387 - 0,13T$

C.3 – ANOVA para o tempo = 1,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,0782	0,1151	2	3	0,0391	0,0384
Resíduos	0,0170	0,0232	4	7	$4,24 \cdot 10^{-3}$	$3,32 \cdot 10^{-3}$
F. de ajuste	0,0167	0,0229	2	5	$8,34 \cdot 10^{-3}$	$4,59 \cdot 10^{-3}$
Erro puro	$2,73 \cdot 10^{-4}$	$2,73 \cdot 10^{-4}$	2	2	$1,36 \cdot 10^{-4}$	$1,36 \cdot 10^{-4}$
Total	0,0952	0,1383	6	10		
teste F 1a.ordem	teste F 2a.ordem	R ² 1a.ordem	R ² 2a.ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
9,23	11,57	0,82	0,83	Ft R	6,94	4,35
				Fc/Ft r	1,33	2,66
6,11	33,75			Ft Fa	19,00	19,30
				Fc/Ft Ep	0,32	1,75

Modelo Linear → $Adm = 0,17 - 0,132T - 0,046Var$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,126 - 0,112T - 0,024Var + 0,04T^2$

Apêndice C

C. – ANOVA para o tempo = 2,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,0185	0,0288	3	4	$6,18 \cdot 10^{-3}$	$7,19 \cdot 10^{-3}$
Resíduos	$3,95 \cdot 10^{-3}$	$3,30 \cdot 10^{-3}$	3	6	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$
F. de ajuste	$3,81 \cdot 10^{-3}$	$3,16 \cdot 10^{-3}$	1	4	$3,81 \cdot 10^{-3}$	$7,90 \cdot 10^{-4}$
Erro puro	$1,38 \cdot 10^{-4}$	$1,38 \cdot 10^{-4}$	2	2	$6,92 \cdot 10^{-5}$	$6,92 \cdot 10^{-5}$
Total	0,0225	0,0320	6	10		
teste F 1a. ordem	teste F 2a. ordem	R ² 1a. ordem	R ² 2a. ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a. ordem
4,69	13,09	0,82	0,90	Ft R	9,28	4,46
				Fc/Ft r	0,51	2,94
55,22	11,44			Ft Fa	18,51	19,33
				Fc/Ft Ep	2,98	0,60

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,043 - 0,058T - 0,026\text{Var} + 0,025T \cdot \text{Var}$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = 0,021 - 0,05T - 0,014\text{Var} + 0,029T^2 + 0,025T \cdot \text{Var}$

C.6 – ANOVA para o tempo = 3,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	$3,39 \cdot 10^{-3}$	$5,16 \cdot 10^{-3}$	3	4	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$
Resíduos	$5,94 \cdot 10^{-4}$	$4,71 \cdot 10^{-4}$	3	6	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$7,85 \cdot 10^{-5}$
F. de ajuste	$5,94 \cdot 10^{-4}$	$4,71 \cdot 10^{-4}$	1	4	$5,94 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$
Erro puro	$5,00 \cdot 10^{-8}$	$5,00 \cdot 10^{-8}$	2	2	$2,50 \cdot 10^{-8}$	$2,50 \cdot 10^{-8}$
Total	$3,99 \cdot 10^{-3}$	0,0056	6	10		
teste F 1a. ordem	teste F 2a. ordem	R ² 1a. ordem	R ² 2a. ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a. ordem
5,71	16,43	0,85	0,92	Ft R	9,28	9,15
				Fc/Ft r	0,62	1,80
23760	4720			Ft Fa	18,51	28,71
				Fc/Ft Ep	1283,6	164,4

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,011 - 0,018T - 0,016\text{Var} + 0,016T \cdot \text{Var}$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = -0,018T - 0,009\text{Var} + 0,013T^2 + 0,003\text{Var}^2 + 0,016T \cdot \text{Var}$

C.7 – ANOVA para o tempo = 4,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$1,34 \cdot 10^{-3}$	3	4	$3,42 \cdot 10^{-4}$	$3,35 \cdot 10^{-4}$
Resíduos	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-4}$	3	6	$6,17 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-5}$
F. de ajuste	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-4}$	1	4	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$3,75 \cdot 10^{-5}$
Erro puro	$5,00 \cdot 10^{-8}$	$5,00 \cdot 10^{-8}$	2	2	$2,50 \cdot 10^{-8}$	$2,50 \cdot 10^{-8}$
Total	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-3}$	6	10		
teste F 1a. ordem	teste F 2a. ordem	R ² 1a. ordem	R ² 2a. ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a. ordem
5,55	13,4	0,85	0,90	Ft R	9,28	4,53
				Fc/Ft r	0,60	2,96
7400	1,5			Ft Fa	18,51	19,25
				Fc/Ft Ep	399,8	0,08

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,006 - 0,01T - 0,009\text{Var} + 0,009T \cdot \text{Var}$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = -0,009T - 0,005\text{Var} + 0,006T^2 + 0,002\text{Var}^2 + 0,009T \cdot \text{Var}$

Apêndice C

C.8 – ANOVA para o tempo = 5,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$3,30 \cdot 10^{-5}$	3	4	$5,00 \cdot 10^{-6}$	$8,25 \cdot 10^{-6}$
Resíduos	$3,00 \cdot 10^{-6}$	$3,00 \cdot 10^{-6}$	3	6	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-7}$
F. de ajuste	$3,00 \cdot 10^{-6}$	$3,00 \cdot 10^{-6}$	1	4	$3,00 \cdot 10^{-6}$	$7,50 \cdot 10^{-7}$
Erro puro	$5,00 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-6}$	2	2	$2,50 \cdot 10^{-6}$	$2,50 \cdot 10^{-6}$
Total	$1,80 \cdot 10^{-5}$	$3,80 \cdot 10^{-5}$	6	10		
teste F 1a. ordem	teste F 2a. ordem	R^2 1a. ordem	R^2 2a. ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a. ordem
5,00	16,50	0,83	0,91	Ft R	9,28	4,53
				Fc/Ft r	0,54	3,64
120	10			Ft Fa	18,51	19,25
				Fc/Ft Ep		0,52

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,001 - 0,001T - 0,001\text{Var} + 0,001T \cdot \text{Var}$

Modelo Quad. $\rightarrow \text{Adm} = -0,0003 - 0,0005T - 0,0013\text{Var} + 0,013\text{Var}^2 + 0,0013T \cdot \text{Var}$

C.9 – ANOVA para o tempo = 6,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	$3,04 \cdot 10^{-7}$	$1,35 \cdot 10^{-5}$	0	3	0	$4,30 \cdot 10^{-6}$
Resíduos	$1,96 \cdot 10^{-7}$	$7,00 \cdot 10^{-8}$	6	7	$3,27 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$
F. de ajuste	$1,46 \cdot 10^{-7}$	$7,00 \cdot 10^{-8}$	4	5	$3,65 \cdot 10^{-8}$	$1,40 \cdot 10^{-8}$
Erro puro	$5,00 \cdot 10^{-8}$	$5,00 \cdot 10^{-8}$	2	2	$2,50 \cdot 10^{-8}$	$2,50 \cdot 10^{-8}$
Total	$5,00 \cdot 10^{-7}$	$2,00 \cdot 10^{-5}$	6	10		
teste F 1a. ordem	teste F 2a. ordem	R^2 1a. ordem	R^2 2a. ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a. ordem
0	4,30	0,62	0,67	Ft R	-	4,35
				Fc/Ft r	-	0,99
1,46	56,0			Ft Fa	19,25	19,30
				Fc/Ft Ep	0,08	2,90

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,0005$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = -0,0003T^2 - 0,0008\text{Var} + 0,001\text{Var}^2 + 0,0003T \cdot \text{Var}$

UMIDSC2

C.10 - ANOVA para o tempo = 0,25h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,0533	0,0834	2	2	0,0266	0,0417
Resíduos	$5,96 \cdot 10^{-3}$	0,0367	4	8	$1,49 \cdot 10^{-3}$	$4,83 \cdot 10^{-3}$
F. de ajuste	$5,55 \cdot 10^{-3}$	0,0382	2	6	$2,77 \cdot 10^{-3}$	$6,38 \cdot 10^{-3}$
Erro puro	$4,15 \cdot 10^{-4}$	$4,15 \cdot 10^{-4}$	2	2	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$
Total	0,0592	0,1221	6	10		
teste F 1a. ordem	teste F 2a. ordem	R^2 1a. ordem	R^2 2a. ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a. ordem
17,87	8,63	0,90	0,68	Ft R	6,94	4,46
				Fc/Ft r	2,57	1,93
13,35	30,36			Ft Fa	19,00	19,33
				Fc/Ft Ep	0,70	1,57

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,585 - 0,055T - 0,101\text{Var}$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = 0,606 - 0,089T - 0,046\text{Var}$

C.11 - ANOVA para o tempo = 0,5h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,0545	0,1328	2	4	0,0272	0,0332
Resíduos	0,0164	0,0314	4	6	$4,10 \cdot 10^{-3}$	$5,23 \cdot 10^{-3}$
F. de ajuste	0,0162	0,0310	2	4	$8,12 \cdot 10^{-3}$	$7,76 \cdot 10^{-3}$
Erro puro	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-4}$	2	2	$6,85 \cdot 10^{-5}$	$6,85 \cdot 10^{-5}$
Total	0,0709	0,1641	6	10		
teste F	teste F	R ²	R ²	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
1a.ordem	2a.ordem	1a.ordem	2a.ordem	Ft R	6,94	4,53
6,65	6,35	0,77	0,81	Fc/Ft r	0,96	1,40
				Ft Fa	19,00	19,25
118,52	113,23			Fc/Ft Ep	6,24	5,88

Modelo Linear → $Adm = 0,328 - 0,076T - 0,09Var$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,273 - 0,113T - 0,04Var + 0,055T^2 + 0,029Var^2$

C.12 - ANOVA para o tempo = 1,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,0262	0,0955	3	3	$8,78 \cdot 10^{-3}$	0,0318
Resíduos	0,0172	$7,79 \cdot 10^{-3}$	3	7	$5,73 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$
F. de ajuste	0,0169	$7,53 \cdot 10^{-3}$	1	5	0,0169	$1,50 \cdot 10^{-3}$
Erro puro	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$2,55 \cdot 10^{-4}$	2	2	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$
Total	0,0435	0,1033	6	10		
teste F	teste F	R ²	R ²	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
1a.ordem	2a.ordem	1a.ordem	2a.ordem	Ft R	9,28	4,35
1,53	28,61	0,60	0,92	Fc/Ft r	0,16	6,58
				Ft Fa	18,51	19,30
132,74	11,81			Fc/Ft Ep	7,17	0,61

Modelo Linear → $Adm = 0,104 - 0,072T - 0,024Var + 0,029T \cdot Var$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,058 - 0,089T + 0,068T^2 + 0,029Var$

C.13 - ANOVA para o tempo = 1,5h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	$5,48 \cdot 10^{-3}$	0,0207	1	2	$5,48 \cdot 10^{-3}$	0,0103
Resíduos	$2,49 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$	5	8	$4,98 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-4}$
F. de ajuste	$2,28 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	3	6	$7,60 \cdot 10^{-4}$	$1,72 \cdot 10^{-4}$
Erro puro	$2,12 \cdot 10^{-4}$	$2,12 \cdot 10^{-4}$	2	2	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$
Total	0,0080	0,0219	6	10		
teste F	teste F	R ²	R ²	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
1a.ordem	2a.ordem	1a.ordem	2a.ordem	Ft R	6,61	4,46
11,0	66,68	0,69	0,94	Fc/Ft r	1,66	14,95
				Ft Fa	19,16	19,35
7,17	1,62			Fc/Ft Ep	0,34	0,08

Modelo Linear → $Adm = 0,037 - 0,037T$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,022 - 0,043T + 0,03T^2$

Apêndice C

C.14 - ANOVA para o tempo = 2,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	-	$6,74 \cdot 10^{-3}$	-	2	-	$3,37 \cdot 10^{-3}$
Resíduos	-	$7,90 \cdot 10^{-3}$	-	8	-	$9,90 \cdot 10^{-5}$
F. de ajuste	-	$7,27 \cdot 10^{-4}$	-	6	-	$1,21 \cdot 10^{-4}$
Erro puro	-	$6,30 \cdot 10^{-5}$	-	2	-	$3,15 \cdot 10^{-5}$
Total	-	0,0075	-	10	-	-
teste F 1a.ordem	teste F 2a.ordem	R ² 1a.ordem	R ² 2a.ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
-	34,13	-	0,90	Ft R	-	4,46
-	-	-	-	Fc/Ft r	-	7,65
-	3,84	-	-	Ft Fa	-	19,35
-	-	-	-	Fc/Ft Ep	-	0,20

Modelo Linear → Adm =

Modelo Quadrático → Adm = $0,012 - 0,025T + 0,016T^2$

C.15 - ANOVA para o tempo = 3,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-3}$	3	3	$7,49 \cdot 10^{-5}$	$4,60 \cdot 10^{-4}$
Resíduos	$4,10 \cdot 10^{-5}$	$2,92 \cdot 10^{-4}$	3	7	$1,37 \cdot 10^{-5}$	$4,17 \cdot 10^{-5}$
F. de ajuste	$4,10 \cdot 10^{-5}$	$2,99 \cdot 10^{-4}$	1	5	$4,10 \cdot 10^{-5}$	$5,84 \cdot 10^{-5}$
Erro puro	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$1,40 \cdot 10^{-7}$	2	2	$7,00 \cdot 10^{-8}$	$7,00 \cdot 10^{-8}$
Total	$2,66 \cdot 10^{-4}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$	6	10	-	-
teste F 1a.ordem	teste F 2a.ordem	R ² 1a.ordem	R ² 2a.ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
5,48	11,03	0,85	0,82	Ft R	9,28	4,35
-	-	-	-	Fc/Ft r	0,54	2,53
-	-	-	-	Ft Fa	18,51	19,30
-	-	-	-	Fc/Ft Ep	69,10	43,20

Modelo Linear → Adm = $0,003 - 0,005T - 0,004Var + 0,004T \cdot Var$

Modelo Quadrático → Adm = $-0,01T - 0,003Var + 0,009T^2 + 0,004T \cdot Var$

C.16 - ANOVA para o tempo = 4,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	$4,59 \cdot 10^{-5}$	$7,20 \cdot 10^{-5}$	3	4	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$1,80 \cdot 10^{-5}$
Resíduos	$8,14 \cdot 10^{-6}$	$3,14 \cdot 10^{-6}$	3	6	$2,71 \cdot 10^{-6}$	$5,20 \cdot 10^{-7}$
F. de ajuste	$8,00 \cdot 10^{-6}$	$3,00 \cdot 10^{-6}$	1	4	$8,00 \cdot 10^{-6}$	$7,50 \cdot 10^{-7}$
Erro puro	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$1,40 \cdot 10^{-7}$	2	2	$7,00 \cdot 10^{-8}$	$7,00 \cdot 10^{-8}$
Total	$5,40 \cdot 10^{-5}$	$7,59 \cdot 10^{-5}$	6	10	-	-
teste F 1a.ordem	teste F 2a.ordem	R ² 1a.ordem	R ² 2a.ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
5,64	34,39	0,85	0,96	Ft R	9,28	4,53
-	-	-	-	Fc/Ft r	0,61	7,59
-	-	-	-	Ft Fa	18,51	19,25
-	-	-	-	Fc/Ft Ep	6,71	0,56

Modelo Linear → Adm = $0,002 - 0,002T - 0,002Var + 0,002T \cdot Var$

Apêndice C

Modelo Quad. $\rightarrow \text{Adm} = -0,002T - 0,002\text{Var} + 0,001T^2 + 0,001\text{Var}^2 + 0,00192T.\text{Var}$

C.17 - ANOVA para o tempo = 5,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$3,89 \cdot 10^{-5}$	3	3	$6,10 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-5}$
Resíduos	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$5,14 \cdot 10^{-6}$	3	7	$8,70 \cdot 10^{-6}$	$7,34 \cdot 10^{-7}$
F. de ajuste	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$5,00 \cdot 10^{-6}$	1	5	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$
Erro puro	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$1,40 \cdot 10^{-7}$	2	2	$7,00 \cdot 10^{-8}$	$7,00 \cdot 10^{-8}$
Total	$2,09 \cdot 10^{-5}$	$4,40 \cdot 10^{-6}$	6	10		
teste F	teste F	R ²	R ²	Fc (95%)	1a. ordem	2a. ordem
1a. ordem	2a. ordem	1a. ordem	2a. ordem	Ft R	9,28	4,35
7,04	17,64	0,87	0,89	Fc/Ft r	0,76	4,06
				Ft Fa	18,51	19,30
371,43	14,29			Fc/Ft Ep	20,07	0,74

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,001 - 0,001T - 0,001\text{Var} + 0,001T.\text{Var}$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = -0,0006 - 0,001\text{Var} + 0,001\text{Var}^2 + 0,001T.\text{Var}$

UMIDCCC1

C.18 - ANOVA para o tempo = 0,25h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,1350	0,2145	1	2	0,1350	0,1072
Resíduos	0,0609	0,0460	5	8	0,0122	$5,71 \cdot 10^{-3}$
F. de ajuste	0,0593	0,0441	3	6	0,0200	$7,30 \cdot 10^{-3}$
Erro puro	0,0016	0,0016	2	2	$8,15 \cdot 10^{-4}$	$8,15 \cdot 10^{-4}$
Total	0,1960	0,2602	6	10		
teste F	teste F	R ²	R ²	Fc (95%)	1a. ordem	2a. ordem
1a. ordem	2a. ordem	1a. ordem	2a. ordem	Ft R	6,61	4,46
11,09	18,78	0,69	0,82	Fc/Ft r	1,68	4,21
				Ft Fa	19,16	19,35
24,24	9,01			Fc/Ft Ep	1,27	0,47

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,699 - 0,184T$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = 0,734 - 0,15T - 0,055\text{Var}$

C.19 - ANOVA para o tempo = 0,5h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,1527	0,2470	2	3	0,0764	0,0823
Resíduos	0,0114	0,0144	4	7	$2,84 \cdot 10^{-3}$	$2,06 \cdot 10^{-3}$
F. de ajuste	0,0106	0,0136	3	5	$5,29 \cdot 10^{-3}$	$2,72 \cdot 10^{-3}$
Erro puro	0,0008	0,0008	2	2	$3,94 \cdot 10^{-4}$	$3,94 \cdot 10^{-4}$
Total	0,1641	0,2612	6	10		
teste F	teste F	R ²	R ²	Fc (95%)	1a. ordem	2a. ordem
1a. ordem	2a. ordem	1a. ordem	2a. ordem	Ft R	6,94	4,35
26,88	40,02	0,93	0,94	Fc/Ft r	3,87	9,20
				Ft Fa	19,0	19,30
13,42	6,90			Fc/Ft Ep	0,71	0,36

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,479 - 0,187T - 0,058\text{Var}$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = 0,523 - 0,155T - 0,05\text{Var} - 0,08\text{Var}^2$

Apêndice C

C.20 - ANOVA para o tempo = 1,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,1449	0,1838	3	5	0,0482	0,03680
Resíduos	0,0049	0,0323	3	5	0,0165	6,46X10 ⁻⁶
F. de ajuste	0,0047	0,0321	1	3	0,0048	0,01070
Erro puro	0,0002	0,0002	2	2	9,5*10 ⁻⁵	9,5*10 ⁻⁵
Total	0,1498	0,2161	6	10		
teste F	teste F	R ²	R ²	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
1a.ordem	2a.ordem	1a.ordem	2a.ordem	Ft R	9,28	5,05
29,27	5,69	0,97	0,85	Fc/Ft r	3,15	1,13
				Ft Fa	18,51	19,16
50,11	112,65			Fc/Ft Ep	2,71	5,88

Modelo Linear → $Adm = 0,214 - 0,178T - 0,054Var + 0,039T \cdot Var$

Modelo Quad. → $Adm = 0,184 - 0,141T - 0,026Var + 0,035T^2 - 0,024Var^2 + 0,039T \cdot Var$

C.21 - ANOVA para o tempo = 2,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,0222	0,0409	1	2	0,0222	0,0204
Resíduos	0,0140	0,0113	5	8	2,79*10 ⁻³	1,41*10 ⁻³
F. de ajuste	0,0135	0,011	3	6	4,50*10 ⁻³	1,80*10 ⁻³
Erro puro	0,0004	0,004	2	2	2,12*10 ⁻⁴	2,12*10 ⁻⁴
Total	0,0362	0,0522	6	10		
teste F	teste F	R ²	R ²	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
1a.ordem	2a.ordem	1a.ordem	2a.ordem	Ft R	6,61	4,46
7,96	14,51	0,61	0,78	Fc/Ft r	1,20	3,25
				Ft Fa	19,16	19,35
21,28	8,53			Fc/Ft Ep	1,11	0,44

Modelo Linear → $Adm = 0,057 - 0,075T$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,028 - 0,064T + 0,035T^2$

C.22 - ANOVA para o tempo = 2,5h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	9,56*10 ⁻³	0,0188	3	4	3,18*10 ⁻³	4,71*10 ⁻³
Resíduos	2,07*10 ⁻³	1,20*10 ⁻³	3	6	6,90*10 ⁻⁴	2,00*10 ⁻⁴
F. de ajuste	0,0020	0,0012	1	4	0,0020	2,90*10 ⁻⁴
Erro puro	3,60*10 ⁻⁵	3,60*10 ⁻⁵	2	2	1,80*10 ⁻⁵	1,80*10 ⁻⁵
Total	0,01163	0,0200	6	10		
teste F	teste F	R ²	R ²	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
1a.ordem	2a.ordem	1a.ordem	2a.ordem	Ft R	9,28	4,53
5,50	23,55	0,82	0,94	Fc/Ft r	0,59	5,20
				Ft Fa	18,51	19,25
113,10	16,11			Fc/Ft Ep	6,11	0,84

Modelo Linear → $Adm = 0,028 - 0,039T - 0,02Var + 0,021T \cdot Var$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,011 - 0,039T - 0,01Var + 0,026T^2 + 0,021T \cdot Var$

C.23 - ANOVA para o tempo = 3,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	$2,78 \cdot 10^{-3}$	$6,30 \cdot 10^{-3}$	3	5	$9,27 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$
Resíduos	$7,30 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$	3	5	$2,43 \cdot 10^{-4}$	$4,40 \cdot 10^{-5}$
F. de ajuste	$7,79 \cdot 10^{-4}$	$2,19 \cdot 10^{-4}$	1	3	$7,79 \cdot 10^{-4}$	$7,30 \cdot 10^{-5}$
Erro puro	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$	2	2	$5,00 \cdot 10^{-7}$	$5,00 \cdot 10^{-7}$
Total	0,0035	0,0065	6	10		
teste F 1a. ordem	teste F 2a. ordem	R ² 1a. ordem	R ² 2a. ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a. ordem
3,81	28,64	0,78	0,97	Ft R	9,28	5,05
				Fc/Ft r	0,41	5,67
1,558	146,0			Ft Fa	18,51	19,16
				Fc/Ft Ep	84,17	7,62

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,015 - 0,021T - 0,0109\text{Var} + 0,011T.\text{Var}$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = 0,003 - 0,022T - 0,006\text{Var} + 0,017T^2 + 0,011T.\text{Var}$

C.24 - ANOVA para o tempo = 4,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	$6,82 \cdot 10^{-4}$	$7,28 \cdot 10^{-4}$	3	5	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-4}$
Resíduos	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^{-4}$	3	5	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$3,04 \cdot 10^{-5}$
F. de ajuste	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	1	3	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$5,03 \cdot 10^{-5}$
Erro puro	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$	2	2	$5,00 \cdot 10^{-7}$	$5,00 \cdot 10^{-7}$
Total	$8,06 \cdot 10^{-4}$	$8,80 \cdot 10^{-4}$	6	10		
teste F 1a. ordem	teste F 2a. ordem	R ² 1a. ordem	R ² 2a. ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a. ordem
5,45	4,80	0,85	0,83	Ft R	9,28	5,05
				Fc/Ft r	0,59	0,95
248	100,67			Ft Fa	18,51	19,16
				Fc/Ft Ep	13,40	5,25

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,008 - 0,008T - 0,007\text{Var} + 0,007T.\text{Var}$

Modelo Quad. $\rightarrow \text{Adm} = 0,003 - 0,006T - 0,04\text{Var} + 0,03T^2 + 0,002\text{Var}^2 + 0,007T.\text{Var}$

UMIDCC2

C.25 - ANOVA para o tempo = 0,25h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,1934	0,2608	2	3	0,0967	0,0869
Resíduos	0,0202	0,0239	4	7	$5,06 \cdot 10^{-3}$	$3,42 \cdot 10^{-3}$
F. de ajuste	0,0196	0,0233	2	5	$9,80 \cdot 10^{-3}$	$4,66 \cdot 10^{-3}$
Erro puro	0,0006	0,0006	2	2	$3,06 \cdot 10^{-4}$	$3,06 \cdot 10^{-4}$
Total	0,2137	0,2847	6	10		
teste F 1a. ordem	teste F 2a. ordem	R ² 1a. ordem	R ² 2a. ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a. ordem
19,11	25,45	0,90	0,92	Ft R	6,94	4,35
				Fc/Ft r	2,75	5,85
32,08	15,23			Ft Fa	19,00	19,30
				Fc/Ft Ep	1,69	0,80

Apêndice C

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,684 - 0,216T - 0,041T \cdot \text{Var}$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = 0,722 - 0,171T - 0,056\text{Var}^2 - 0,041T \cdot \text{Var}$

C.26 - ANOVA para o tempo = 0,5h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,1773	0,3601	1	2	0,1773	0,1801
Resíduos	0,0168	0,0165	5	8	$3,37 \cdot 10^{-3}$	$2,06 \cdot 10^{-3}$
F. de ajuste	0,0151	0,0147	3	6	$5,03 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$
Erro puro	0,0018	0,0018	2	2	$8,79 \cdot 10^{-4}$	$8,79 \cdot 10^{-4}$
Total	0,1941	0,3766	6	10		
teste F	teste F	R ²	R ²	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
1a.ordem	2a.ordem	1a.ordem	2a.ordem			
52,61	87,58	0,91	0,96	Ft R	6,61	4,46
				Fc/Ft r	7,96	19,64
				Ft Fa	19,16	19,33
5,73	2,79			Fc/Ft Ep	0,30	0,14

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,491 - 0,21T$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = 0,511 - 0,201T - 0,075\text{Var}^2$

C.27 - ANOVA para o tempo = 1,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,1189	0,2226	2	3	0,0594	0,0742
Resíduos	$9,46 \cdot 10^{-3}$	0,0209	4	7	$2,37 \cdot 10^{-3}$	$2,98 \cdot 10^{-3}$
F. de ajuste	0,0082	0,0196	2	5	$4,10 \cdot 10^{-3}$	$3,92 \cdot 10^{-3}$
Erro puro	0,0013	0,0013	2	2	$6,36 \cdot 10^{-4}$	$6,36 \cdot 10^{-4}$
Total	0,1284	0,2435	6	10		
teste F	teste F	R ²	R ²	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
1a.ordem	2a.ordem	1a.ordem	2a.ordem			
25,08	24,89	0,93	0,91	Ft R	6,94	4,35
				Fc/Ft r	3,60	5,72
				Ft Fa	19,00	19,30
6,45	6,16			Fc/Ft Ep	0,34	0,32

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,234 - 0,164T + 0,054T \cdot \text{Var}$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = 0,257 - 0,153T - 0,06\text{Var}^2 + 0,054T \cdot \text{Var}$

C.28 - ANOVA para o tempo = 2,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	0,0139	0,0292	1	1	0,0139	0,0293
Resíduos	$4,96 \cdot 10^{-3}$	$9,94 \cdot 10^{-3}$	5	9	$9,96 \cdot 10^{-4}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$
F. de ajuste	0,0040	0,0090	3	7	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$
Erro puro	$9,43 \cdot 10^{-4}$	$9,43 \cdot 10^{-4}$	2	2	$4,72 \cdot 10^{-4}$	$4,72 \cdot 10^{-4}$
Total	0,0189	0,0390	6	10		
teste F	teste F	R ²	R ²	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
1a.ordem	2a.ordem	1a.ordem	2a.ordem			
13,96	26,48	0,74	0,74	Ft R	6,61	5,12
				Fc/Ft r	2,11	5,17
				Ft Fa	19,16	19,35
2,86	2,72			Fc/Ft Ep	0,15	0,14

Modelo Linear $\rightarrow \text{Adm} = 0,053 - 0,059T$

Modelo Quadrático $\rightarrow \text{Adm} = 0,053 - 0,06T$

C.29 - ANOVA para o tempo = 2,5h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	$5,75 \cdot 10^{-3}$	$7,60 \cdot 10^{-3}$	3	3	$1,92 \cdot 10^{-3}$	$2,53 \cdot 10^{-3}$
Resíduos	$8,98 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$	3	7	$2,99 \cdot 10^{-4}$	$2,04 \cdot 10^{-4}$
F. de ajuste	$8,54 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$	1	5	$8,54 \cdot 10^{-4}$	$2,77 \cdot 10^{-4}$
Erro puro	$4,40 \cdot 10^{-5}$	$4,40 \cdot 10^{-5}$	2	2	$2,20 \cdot 10^{-5}$	$2,20 \cdot 10^{-5}$
Total	0,00665	0,0090	6	10		
teste F 1a. ordem	teste F 2a. ordem	R ² 1a. ordem	R ² 2a. ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
6,41	12,39	0,87	0,84	Ft R	9,28	4,35
				Fc/Ft r	0,69	2,85
38,82	12,61			Ft Fa	18,51	19,30
				Fc/Ft Ep	2,10	0,65

Modelo Linear → $Adm = 0,028 - 0,033T - 0,013Var + 0,013T.Var$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,017 - 0,028T - 0,012T^2 + 0,013T.Var$

C.30 - ANOVA para o tempo = 3,0h

Fonte de Variação	SQ 1a ordem	SQ 2a ordem	gl 1a ordem	gl 2a ordem	MQ 1a ordem	MQ 2a ordem
Regressão	$4,37 \cdot 10^{-3}$	$4,41 \cdot 10^{-3}$	3	5	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$8,82 \cdot 10^{-4}$
Resíduos	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$8,76 \cdot 10^{-4}$	3	5	$3,36 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$
F. de ajuste	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$8,76 \cdot 10^{-4}$	1	3	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$2,92 \cdot 10^{-4}$
Erro puro	$3,50 \cdot 10^{-7}$	$3,50 \cdot 10^{-7}$	2	2	$1,75 \cdot 10^{-7}$	$1,75 \cdot 10^{-7}$
Total	0,0045	0,0053	6	10		
teste F 1a. ordem	teste F 2a. ordem	R ² 1a. ordem	R ² 2a. ordem	Fc (95%)	1a. ordem	2a ordem
43,52	5,03	0,78	0,83	Ft R	9,28	5,05
				Fc/Ft r	4,69	1,00
573,14	1668,57			Ft Fa	18,51	19,16
				Fc/Ft Ep	30,96	87,09

Modelo Linear → $Adm = 0,017 - 0,023T - 0,013Var + 0,013T.Var$

Modelo Quad. → $Adm = 0,003 - 0,018T - 0,008Var + 0,012T^2 + 0,005Var^2 + 0,013T.Var$

D.1 – Resultados da cinética de secagem para UMIDSC1

	T = 29°C Var _{ar} = 1,5m/s	T = 35°C Var _{ar} = 1,0m/s	T = 35°C Var _{ar} = 2,0m/s	T = 50°C Var _{ar} = 0,8m/s	T = 50°C (a) Var _{ar} = 1,5m/s
	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*
tempo(h)	01	02	03	04	05
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,25	0,7474	0,7377	0,6510	0,7781	0,6258
0,50	0,5789	0,6100	0,4706	0,3100	0,4260
0,75	0,3482	0,5063	0,3524	0,2138	0,2565
1,00	0,2928	0,4108	0,2729	0,0966	0,1195
1,25	0,2328	0,3109	0,2166	0,0440	0,0673
1,50	0,2101	0,2595	0,1573	0,0264	0,0380
2,00	0,1232	0,1721	0,0697	0,0144	0,0151
2,50	0,0867	0,1155	0,0293	0,0050	0,0024
3,00	0,0482	0,0693	0,0053	0,0050	0,0003
4,00	0,0206	0,0206	0,0384	0,0033	
5,00	0,0001	0,0001	0,0050	0,0004	
6,00	0,0001	0,0001	0,0009	0,0004	

* adimensional de umidade = $(X-X_e)/(X_0-X_e)$

continuação

T = 50°C (b) Var _{ar} = 1,5m/s	T = 50°C (c) Var _{ar} = 1,5m/s	T = 50°C Var _{ar} = 0,8m/s	T = 65°C Var _{ar} = 1,0m/s	T = 65°C Var _{ar} = 2,0m/s	T = 71°C Var _{ar} = 1,5m/s
(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*
	01	02	03	04	05
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,779	0,779	0,826	0,822	0,792	0,748
0,506	0,506	0,704	0,562	0,402	0,544
0,342	0,342	0,588	0,429	0,222	0,352
0,188	0,188	0,508	0,322	0,089	0,191
0,152	0,152	0,416	0,248	0,046	0,131
0,100	0,100	0,347	0,176	0,025	0,037
0,038	0,038	0,217	0,097	0,014	0,018
0,013	0,013	0,123	0,041	0,007	0,004
0,002	0,002	0,067	0,023	0,007	0,035

* adimensional de umidade = $(X-X_e)/(X_0-X_e)$

D 2 – Resultados da cinética de secagem para UMIDSC2

	T = 29°C Var _{ar} = 1,5m/s	T = 35°C Var _{ar} = 1,0m/s	T = 35°C Var _{ar} = 2,0m/s	T = 50°C Var _{ar} = 0,8m/s	T = 50°C (a) Var _{ar} = 1,5m/s
	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*
tempo(h)	01	02	03	04	05
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,25	0,7687	0,7198	0,5121	0,6023	0,6019
0,50	0,5821	0,5450	0,3448	0,3078	0,2817
0,75	0,4306	0,3995	0,2456	0,1386	0,0967
1,00	0,3249	0,2719	0,1644	0,0537	0,0393
1,25	0,2261	0,1585	0,1073	0,0355	0,0177
1,50	0,1540	0,1028	0,0722	0,0301	0,0115
2,00	0,0951	0,0447	0,0401	0,0219	0,0068
2,50	0,0593	0,0288	0,0084	0,0058	0,0003
3,00	0,0419	0,0184	0,0024	0,0058	0,0003
4,00	0,0031	0,0086	0,0014		
5,00	0,0001	0,0055	0,0007		
6,00	0,0001	0,0003	0,0007		

* adimensional de umidade = $(X-X_e)/(X_0-X_e)$

continuação

T = 50°C (b) Var _{ar} = 1,5m/s	T = 50°C (c) Var _{ar} = 1,5m/s	T = 50°C Var _{ar} = 0,8m/s	T = 65°C Var _{ar} = 1,0m/s	T = 65°C Var _{ar} = 2,0m/s	T = 71°C Var _{ar} = 1,5m/s
(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*
	01	02	03	04	05
1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,6211	0,6301	0,6265	0,6049	0,4069	0,4187
0,2652	0,2723	0,3296	0,3694	0,2158	0,1587
0,0984	0,1511	0,1491	0,1706	0,1015	0,0771
0,0421	0,0601	0,0550	0,0700	0,0798	0,0251
0,0157	0,0480	0,0312	0,0185	0,0325	0,0189
0,0093	0,0298	0,0260	0,0062	0,0207	0,0128
0,0065	0,0177	0,0119	0,0013	0,0089	0,0037
0,0008	0,0116	0,0051	0,0013	0,0010	0,0019
0,0008	0,0007	0,0007	0,0003	0,0008	0,0001

* adimensional de umidade = $(X-X_e)/(X_0-X_e)$

D.3 – Resultados da cinética de secagem para UMIDCC1

	T = 29°C Var _{ar} = 1,5m/s	T = 35°C Var _{ar} = 1,0m/s	T = 35°C Var _{ar} = 2,0m/s	T = 50°C Var _{ar} = 0,8m/s	T = 50°C (a) Var _{ar} = 1,5m/s
	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*
tempo(h)	01	02	03	04	05
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,25	0,8625	0,8260	0,8225	0,7922	0,7476
0,50	0,6308	0,7046	0,5620	0,4022	0,5447
0,75	0,4365	0,5880	0,4294	0,2221	0,3517
1,00	0,3570	0,5081	0,3216	0,0888	0,1914
1,25	0,3023	0,4164	0,2475	0,0462	0,1311
1,50	0,2450	0,3472	0,1761	0,0247	0,0371
2,00	0,1551	0,2176	0,0970	0,0140	0,0184
2,50	0,1119	0,1228	0,0408	0,0074	0,0044
3,00	0,0666	0,0671	0,0229	0,0074	0,0035
4,00	0,0124	0,0338	0,0049		
5,00	0,0012	0,0055	0,0013		
6,00	0,0012	0,0008	0,0013		

* adimensional de umidade = $(X-X_e)/(X_o-X_e)$

continuação

T = 50°C (b) Var _{ar} = 1,5m/s	T = 50°C (c) Var _{ar} = 1,5m/s	T = 50°C Var _{ar} = 0,8m/s	T = 65°C Var _{ar} = 1,0m/s	T = 65°C Var _{ar} = 2,0m/s	T = 71°C Var _{ar} = 1,5m/s
(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*
	01	02	03	04	05
1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,7789	0,8046	0,6502	0,5736	0,3399	0,5359
0,5063	0,5168	0,2838	0,3049	0,2154	0,2809
0,3418	0,3097	0,1439	0,1620	0,0827	0,1630
0,1875	0,1729	0,0972	0,0734	0,0434	0,0658
0,1515	0,0883	0,0680	0,0338	0,0359	0,0344
0,1001	0,0622	0,0439	0,0243	0,0162	0,0242
0,0384	0,0101	0,0173	0,0104	0,0059	0,0019
0,0127	0,0069	0,0106	0,0028	0,0034	
0,0024	0,0023	0,0030	0,0027		

* adimensional de umidade = $(X-X_e)/(X_o-X_e)$

D 4 – Resultados da cinética de secagem para UMIDCC2

	T = 29°C Var _{ar} = 1,5m/s	T = 35°C Var _{ar} = 1,0m/s	T = 35°C Var _{ar} = 2,0m/s	T = 50°C Var _{ar} = 0,8m/s	T = 50°C (a) Var _{ar} = 1,5m/s
	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*
tempo(h)	01	02	03	04	05
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,25	0,8967	0,8339	0,8780	0,6487	0,7494
0,50	0,7219	0,7083	0,6248	0,3569	0,5046
0,75	0,5896	0,5908	0,4155	0,1828	0,3691
1,00	0,4587	0,4976	0,2984	0,0866	0,2493
1,25	0,3809	0,3517	0,2069	0,0553	0,1767
1,50	0,2988	0,2504	0,1764	0,0397	0,1163
2,00	0,1761	0,1613	0,0849	0,0164	0,0505
2,50	0,0633	0,0965	0,0452	0,0109	0,0167
3,00	0,0362	0,0762	0,0239	0,0094	0,0025
4,00	0,0084	0,0114	0,0056		
5,00	0,0006	0,0004	0,0013		
6,00	0,0006	0,0004	0,0013		

* adimensional de umidade = $(X-X_e)/(X_o-X_e)$

continuação

T = 50°C (b) Var _{ar} = 1,5m/s	T = 50°C (c) Var _{ar} = 1,5m/s	T = 50°C Var _{ar} = 0,8m/s	T = 65°C Var _{ar} = 1,0m/s	T = 65°C Var _{ar} = 2,0m/s	T = 71°C Var _{ar} = 1,5m/s
(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*
	01	02	03	04	05
1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,000
0,7562	0,7231	0,6220	0,4841	0,3637	0,540
0,5603	0,5500	0,3273	0,2448	0,2462	0,179
0,3244	0,3077	0,1907	0,1103	0,1320	0,117
0,2454	0,2038	0,1109	0,0617	0,0798	0,054
0,1806	0,1554	0,0720	0,0280	0,0407	0,021
0,0646	0,1000	0,0392	0,0168	0,0243	0,010
0,0517	0,0135	0,0206	0,0056	0,0048	0,006
0,0190	0,0100	0,0137	0,0037	0,0048	0,002
0,0033	0,0031	0,0034	0,0037	0,0047	

* adimensional de umidade = $(X-X_e)/(X_o-X_e)$

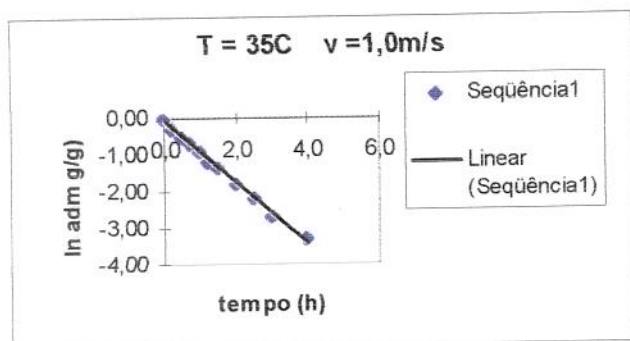


Figura 01 – Curva não linear - SC1 - $T=35^\circ\text{C}$ e $\text{Var}=1,0\text{m/s}$

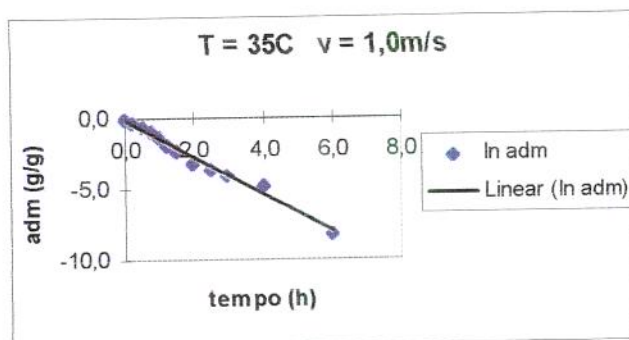


Figura 04 – Curva não linear – SC2 - $T=35^\circ\text{C}$ e $\text{Var}=1,0\text{m/s}$

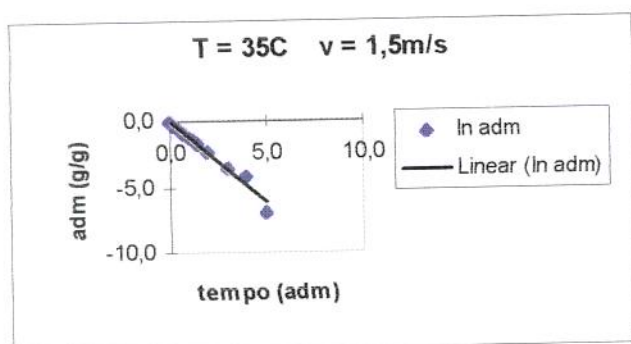


Figura 02 – Curva não linear - SC1 - $T=35^\circ\text{C}$ e $\text{Var}=1,5\text{m/s}$

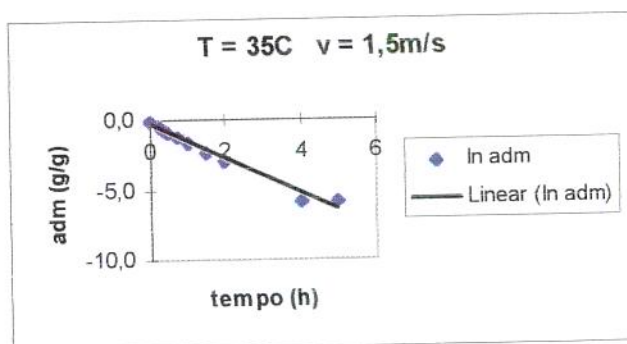


Figura 05 – Curva não linear – SC2 - $T=35^\circ\text{C}$ e $\text{Var}=1,5\text{m/s}$

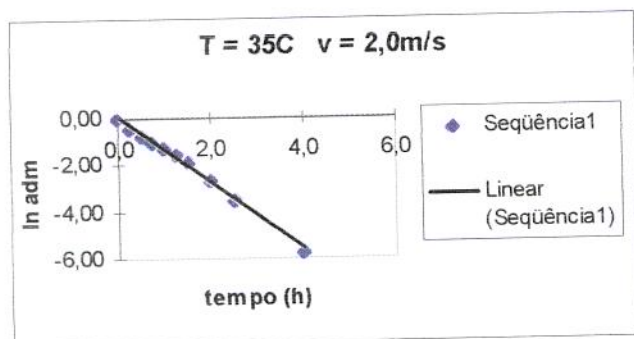


Figura 03 – Curva não linear - SC1 - $T=35^\circ\text{C}$ e $\text{Var}=2,0\text{m/s}$

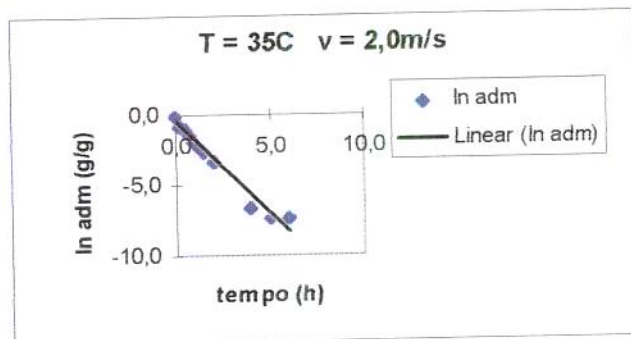


Figura 06 – Curva não linear – SC2 - $T=35^\circ\text{C}$ e $\text{Var}=2,0\text{m/s}$

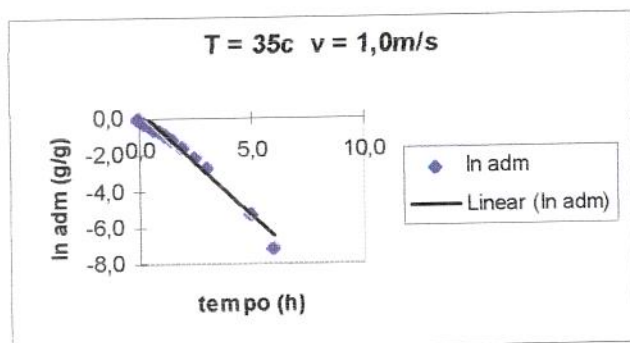


Figura 07 – Curva não linear - CC1 -
 $T=35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var}=1,0\text{m/s}$

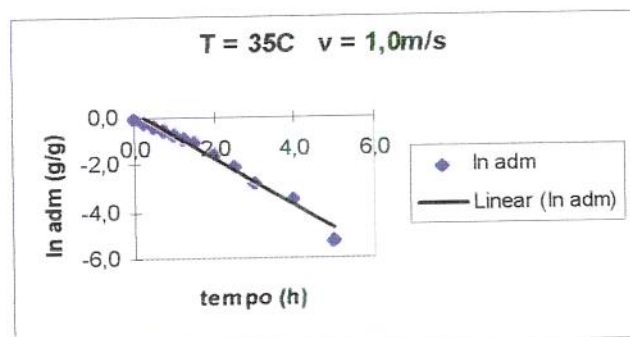


Figura 10 – Curva não linear – CC2 -
 $T=35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var}=1,0\text{m/s}$

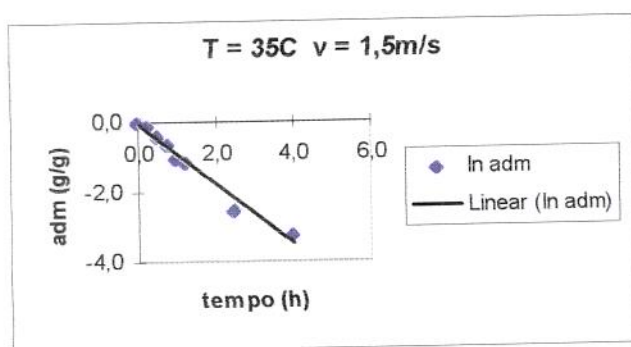


Figura 08 – Curva não linear - CC1 -
 $T=35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var}=1,5\text{m/s}$

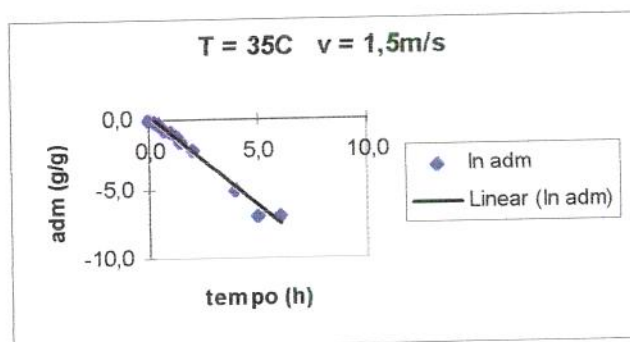


Figura 11 – Curva não linear – CC2 -
 $T=35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var}=1,5\text{m/s}$

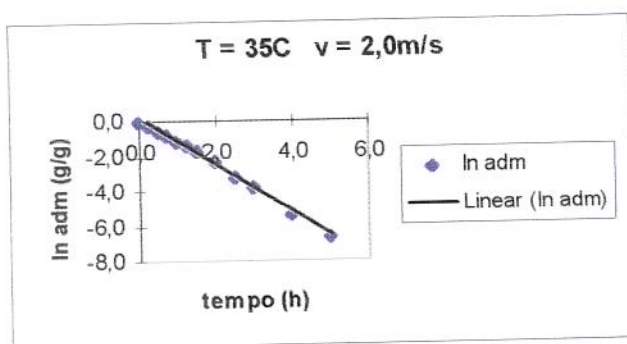


Figura 09 – Curva não linear - CC1 -
 $T=35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var}=2,0\text{m/s}$

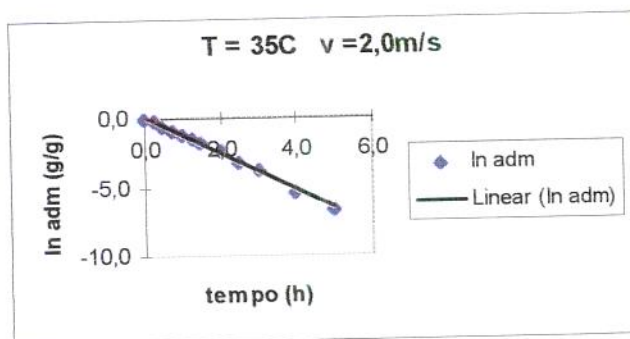


Figura 12 – Curva não linear – CC2 -
 $T=35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var}=2,0\text{m/s}$

Tabela F1 – Valores de densidades para cada secagem das amostras.

	Tempo (h)	UMIDSC1	UMIDSC2	UMIDCC1	UMIDCC2
		Densidade média (g/cm ³)			
T=29°C Var = 1,5m/s	0	0,911	0,947	0,920	0,923
T=29°C Var = 1,5m/s	1	0,887	0,908	0,899	0,901
T=29°C Var = 1,5m/s	2	0,874	0,891	0,889	0,881
T=29°C Var = 1,5m/s	3	0,860	0,884	0,879	0,874
T=29°C Var = 1,5m/s	4	0,860	0,873	0,874	0,872
T=29°C Var = 1,5m/s	5	0,861	0,878	0,865	0,871
T=35°C Var = 1,0m/s	0	0,900	0,942	0,952	0,988
T=35°C Var = 1,0m/s	1	0,872	0,896	0,912	0,918
T=35°C Var = 1,0m/s	2	0,859	0,890	0,879	0,895
T=35°C Var = 1,0m/s	3	0,856	0,874	0,864	0,879
T=35°C Var = 1,0m/s	4	0,851	0,875	0,865	0,877
T=35°C Var = 1,0m/s	5	0,851	0,871	0,862	0,875
T=35°C Var = 2,0m/s	0	0,897	0,961	0,949	1,007
T=35°C Var = 2,0m/s	1	0,868	0,902	0,891	0,927
T=35°C Var = 2,0m/s	2	0,857	0,889	0,866	0,887
T=35°C Var = 2,0m/s	3	0,858	0,886	0,859	0,875
T=35°C Var = 2,0m/s	4	0,856	0,881	0,856	0,884
T=35°C Var = 2,0m/s	5	0,864	0,884	0,851	0,875
T=50°C Var = 0,8m/s	0	0,937	0,987	1,005	1,024
T=50°C Var = 0,8m/s	1	0,861	0,885	0,883	0,903
T=50°C Var = 0,8m/s	2	0,852	0,865	0,865	0,875
T=50°C Var = 0,8m/s	3	0,856	0,873	0,849	0,870
T=50°C Var = 1,5m/s	0	0,960	0,958	0,961	0,999
T=50°C Var = 1,5m/s	1	0,875	0,876	0,887	0,892
T=50°C Var = 1,5m/s	2	0,875	0,872	0,859	0,874
T=50°C Var = 1,5m/s	3	0,874	0,872	0,857	0,872
T=50°C Var = 2,2m/s	0	0,922	0,964	0,931	0,968
T=50°C Var = 2,2m/s	1	0,860	0,875	0,877	0,898
T=50°C Var = 2,2m/s	2	0,853	0,870	0,864	0,881
T=50°C Var = 2,2m/s	3	0,854	0,867	0,858	0,873
T=65°C Var = 1,0m/s	0	0,955	0,997	0,980	0,979
T=65°C Var = 1,0m/s	1	0,890	0,914	0,894	0,898
T=65°C Var = 1,0m/s	2	0,870	0,897	0,865	0,868
T=65°C Var = 1,0m/s	3	0,865	0,894	0,855	0,866
T=65°C Var = 2,0m/s	0	0,926	0,984	0,923	1,013
T=65°C Var = 2,0m/s	1	0,874	0,895	0,863	0,900
T=65°C Var = 2,0m/s	2	0,865	0,888	0,853	0,880
T=65°C Var = 2,0m/s	3	0,858	0,885	0,846	0,879
T=71°C Var = 1,5m/s	0	0,949	0,976	0,958	1,018
T=71°C Var = 1,5m/s	1	0,872	0,885	0,876	0,899
T=71°C Var = 1,5m/s	2	0,859	0,873	0,858	0,880
T=71°C Var = 1,5m/s	3	0,856	0,872	0,856	0,868

UMIDSC 1

G.1 - Gengibre sem casca - Corte 1, para $T = 29^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,306	0,682	0,674	0,659	0,670
0,140	0,563	0,553	0,547	0,572
0,066	0,496	0,486	0,488	0,502
0,039	0,468	0,457	0,465	0,470
0,019	0,445	0,434	0,447	0,459

G.2 - Gengibre sem casca - Corte 1, para $T = 35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,0\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,418	0,417	0,404	0,376	0,468
0,183	0,231	0,219	0,216	0,211
0,081	0,167	0,157	0,168	0,158
0,051	0,165	0,155	0,166	0,156
0,018	0,162	0,152	0,164	0,150

G.3 - Gengibre sem casca - Corte 1, para $T = 35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 2,0\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,282	0,351	0,359	0,418	0,341
0,081	0,170	0,180	0,255	0,193
0,017	0,113	0,123	0,204	0,113
0,015	0,111	0,122	0,202	0,107

G.4 - Gengibre sem casca - Corte 1, para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 0,8\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,101	0,596	0,590	0,583	0,618
0,019	0,516	0,509	0,511	0,564
0,009	0,504	0,498	0,502	0,418

G.5 - Gengibre sem casca - Corte 1, para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$

X/Xo M	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,122	0,437	0,429	0,419	0,416
0,021	0,332	0,324	0,328	0,317
0,008	0,318	0,310	0,316	0,232

G.6 - Gengibre sem casca - Corte 1, para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 2,2\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,097	0,633	0,626	0,615	0,587
0,017	0,557	0,548	0,551	0,565
0,005	0,543	0,534	0,540	0,500

Apêndice G

G.7 - Gengibre sem casca - Corte 1, para $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,0\text{m/s}$

X/X_o	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	$A/A_o \text{ exp}$
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,333	0,393	0,390	0,392	0,397
0,105	0,191	0,188	0,198	0,191
0,035	0,130	0,128	0,141	0,126
0,011	0,110	0,108	0,121	0,117

G.8 - Gengibre sem casca - Corte 1, para $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 2,0\text{m/s}$

X/X_o	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	$A/A_o \text{ exp}$
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,193	0,574	0,567	0,313	0,571
0,058	0,448	0,440	0,200	0,475
0,028	0,413	0,405	0,175	0,432
0,008	0,388	0,379	0,159	0,223

G.9 - Gengibre sem casca - Corte 1, para $T = 71^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$

X/X_o	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	$A/A_o \text{ exp}$
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,240	0,431	0,431	0,431	0,371
0,035	0,243	0,243	0,243	0,303
0,024	0,233	0,233	0,233	0,236

UMIDSC2

G.10 - Gengibre sem casca - Corte 2, para $T = 29^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$

X/X_o	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	$A/A_o \text{ exp}$
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,339	0,742	0,739	0,731	0,812
0,113	0,598	0,593	0,590	0,608
0,061	0,553	0,547	0,548	0,561
0,020	0,512	0,506	0,511	0,506
0,020	0,512	0,506	0,511	0,479

G.11 - Gengibre sem casca - Corte 2, para $T = 35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,0\text{m/s}$

X/X_o	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	$A/A_o \text{ exp}$
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,282	0,729	0,725	0,717	0,735
0,059	0,577	0,571	0,571	0,573
0,033	0,553	0,547	0,549	0,546
0,023	0,543	0,537	0,541	0,539
0,020	0,540	0,534	0,538	0,514

G.12 - Gengibre sem casca - Corte 2, para $T = 35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 2,0\text{m/s}$

X/X_o	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	$A/A_o \text{ exp}$
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,176	0,653	0,652	0,647	0,659
0,053	0,553	0,553	0,552	0,563
0,016	0,514	0,515	0,517	0,525
0,015	0,513	0,513	0,516	0,488
0,014	0,512	0,513	0,515	0,438

G.13 - gengibre sem casca - Corte 2, para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 0,8\text{m/s}$

X/X_o	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,058	0,808	0,694	0,695	0,774
0,026	0,791	0,669	0,669	0,643
0,010	0,781	0,654	0,654	0,607

G.14 - gengibre sem casca - Corte 2, para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$

X	A/Ao			Experimental
X/X_o	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,053	0,440	0,439	0,356	0,441
0,016	0,406	0,407	0,328	0,421
0,007	0,396	0,397	0,321	0,397

G.15 - gengibre sem casca - Corte 2, para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 2,2\text{m/s}$

X/X_o	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,060	0,694	0,694	0,522	0,696
0,018	0,662	0,661	0,482	0,667
0,006	0,652	0,652	0,470	0,650

G.16 - gengibre sem casca - Corte 2, para $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,0\text{m/s}$

X/X_o	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,372	0,705	0,706	0,674	0,699
0,073	0,473	0,473	0,425	0,489
0,010	0,398	0,398	0,345	0,376
0,005	0,391	0,391	0,338	0,350

G.17 - gengibre sem casca - Corte 2, para $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 2,0\text{m/s}$

X	A/Ao			Experimental
X/X_o	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,220	0,591	0,591	0,755	0,606
0,084	0,480	0,480	0,675	0,463
0,025	0,421	0,421	0,629	0,433
0,006	0,399	0,399	0,611	0,403

G.18 - gengibre sem casca - Corte 2, para $T = 71^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$

X/X_o	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,162	0,728	0,728	0,727	0,714
0,028	0,637	0,637	0,637	0,659
0,016	0,626	0,626	0,627	0,615

UMIDCC1

G.19 - Gengibre com casca - Corte 1, para $T = 29^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,372	0,832	0,830	0,824	0,807
0,175	0,745	0,744	0,740	0,697
0,089	0,693	0,693	0,694	0,671
0,036	0,654	0,655	0,661	0,595

G.20 - Gengibre com casca - Corte 1, para $T = 35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,0\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,514	0,866	0,865	0,859	0,832
0,226	0,742	0,741	0,735	0,697
0,078	0,642	0,642	0,640	0,672
0,045	0,613	0,613	0,614	0,646
0,017	0,584	0,584	0,589	0,615

G.21 - Gengibre com casca - Corte 1, para $T = 35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 2,0\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,332	0,703	0,702	0,696	0,743
0,111	0,550	0,550	0,547	0,585
0,038	0,483	0,484	0,486	0,477
0,020	0,465	0,466	0,469	0,415
0,016	0,461	0,462	0,466	0,354

G.22 - Gengibre com casca - Corte 1, para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 0,8\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,093	0,748	0,748	0,751	0,804
0,019	0,702	0,701	0,700	0,672
0,012	0,697	0,697	0,695	0,543

G.23 - Gengibre com casca - Corte 1, para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,186	0,518	0,517	0,518	0,494
0,025	0,377	0,377	0,383	0,416
0,005	0,356	0,357	0,364	0,413

G.24 - Gengibre com casca - Corte 1, para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 2,2\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,100	0,525	0,524	0,515	0,546
0,020	0,441	0,441	0,444	0,543
0,006	0,423	0,424	0,430	0,429

G.25 - Gengibre com casca - Corte 1, para $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,0\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,306	0,704	0,704	0,703	0,795
0,075	0,530	0,530	0,530	0,517
0,026	0,477	0,477	0,477	0,448
0,018	0,460	0,460	0,461	0,379

G.26 - Gengibre com casca - Corte 1, para $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 2,0\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,216	0,592	0,589	0,535	0,609
0,045	0,430	0,430	0,392	0,469
0,025	0,406	0,407	0,376	0,391
0,007	0,382	0,384	0,261	0,344

G.27 - Gengibre com casca - Corte 1, para $T = 71^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,282	0,624	0,623	0,587	0,618
0,067	0,448	0,448	0,405	0,429
0,025	0,405	0,405	0,170	0,351

UMIDCC2

G.28 - Gengibre com casca - Corte 2, para $T = 29^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,470	0,741	0,738	0,644	0,716
0,194	0,553	0,551	0,515	0,524
0,057	0,427	0,428	0,405	0,428
0,029	0,397	0,399	0,283	0,375
0,021	0,287	0,289	0,176	0,250

G.29 - Gengibre com casca - Corte 2, para $T = 35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,0\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,504	0,831	0,831	0,832	0,824
0,172	0,656	0,657	0,657	0,640
0,088	0,592	0,592	0,593	0,582
0,024	0,531	0,531	0,531	0,527
0,013	0,519	0,519	0,518	0,462

G.30 - Gengibre com casca - Corte 2, para $T = 35^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 2,0\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,309	0,844	0,845	0,849	0,937
0,099	0,757	0,757	0,759	0,758
0,039	0,722	0,721	0,721	0,758
0,021	0,709	0,709	0,707	0,695
0,017	0,706	0,706	0,703	0,632

Apêndice G

G.31 - Gengibre com casca - Corte 2, para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 0,8\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,091	0,840	0,840	0,843	0,881
0,021	0,811	0,811	0,809	0,797
0,014	0,808	0,807	0,805	0,712

G.32 - Gengibre com casca - Corte 2, para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$

X/Xo M	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,236	0,789	0,790	0,793	0,759
0,042	0,681	0,682	0,682	0,696
0,006	0,653	0,653	0,651	0,638

G.33 - Gengibre com casca - Corte 2, para $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 2,2\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,114	0,903	0,903	0,903	0,957
0,024	0,852	0,852	0,852	0,881
0,007	0,834	0,834	0,834	0,843
	0,829	0,829	0,829	0,738

G.34 - Gengibre com casca - Corte 2, para $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,0\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,246	0,353	0,353	0,354	0,378
0,063	0,196	0,196	0,197	0,181
0,019	0,158	0,158	0,159	0,210
0,007	0,148	0,148	0,149	0,160

G.35 - Gengibre com casca - Corte 2, para $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 2,0\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,248	0,632	0,633	0,642	0,604
0,081	0,504	0,504	0,506	0,527
0,026	0,450	0,450	0,447	0,462
0,007	0,430	0,429	0,423	0,418

G.36 - Gengibre com casca - Corte 2, para $T = 71^{\circ}\text{C}$ e $\text{Var} = 1,5\text{m/s}$

X/Xo	Central	Uniforme 1	Uniforme 2	A/Ao exp
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,180	0,728	0,729	0,737	0,702
0,055	0,643	0,643	0,644	0,638
0,011	0,603	0,602	0,597	0,628

A umidade de equilíbrio depende do ambiente e é dada geralmente em função da umidade relativa, tendo a temperatura como parâmetro. Esta função é chamada isoterma.

O conhecimento da umidade de equilíbrio pode ser feito utilizando-se de métodos, sendo necessário apenas a manutenção da temperatura e umidade do ar constante. A determinação pode ser realizada de forma estática ou dinâmica, sendo que a segunda é preferível quando os dados vão ser usados em cálculos de secagem.

Para produtos com alto teor de umidade, como é o caso do gengibre, é notório um encolhimento muito grande, onde ocorre grandes modificações em sua forma original. Desta forma, este encolhimento deve estar previsto na modelagem da cinética de secagem, com o objetivo de uma melhor representação física do processo de secagem e maior confiabilidade nos coeficientes determinados.

Para a determinação das isotermas de equilíbrio higroscópico, as condições termodinâmicas do ar devem ser mantidas constantes. A temperatura do ar pode ser controlada por termostatos, enquanto que a umidade relativa pode ser controlada por soluções saturadas de sais (GRESANN, 1977).