



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
Departamento de Engenharia de Alimentos.

**Secagem a Vácuo de Cenoura (*Daucus carota*) e Abóbora
(*Cucurbita máxima*): Estudo das Características do Processo.**

PARECER

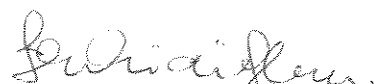
Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por **Aroldo Arévalo Pinedo** aprovada pela Comissão Julgadora em 28 de março de 2003.

Aroldo Arévalo Pinedo

Mestre em Engenharia de Alimentos

Engenheiro de Alimentos.

Campinas, 28 de março de 2003.


Profa. Dra. Fernanda Elizabeth Xidieh Murr
Presidente da Banca

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.

Campinas, 2003

São Paulo – Brasil.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIDADE	Be
Nº CHAMADA	Ar34s
UNICAMP	
V	EX
TOMBO BCI	54525
PROC.	16-12403
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	02/07/03
Nº CPD	

CM00186555-0

DE 13 294960

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

Ar34s

Arévalo Pinedo, Aroldo

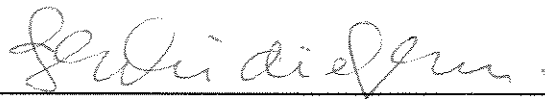
Secagem a vácuo de cenoura (*Daucus carota*) e abóbora (*Cucurbita máxima*): estudo das características do processo / Aroldo Arévalo Pinedo. – Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Fernanda Elizabeth Xidieh Murr

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia de Alimentos.

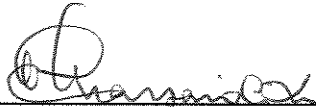
1.Secagem. 2.Vácuo. 3.Cenoura. 4.Abóbora. I.Murr, Fernanda Elizabeth Xidieh. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III.Título.

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Fernanda Elizabeth Xidieh Murr

Orientadora



Prof. Dr. Antônio Marsaioli Jr

Membro



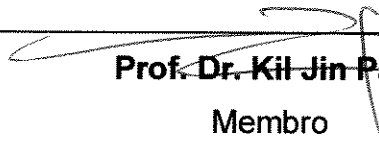
Prof. Dr. Diego Palmiro Ramirez Ascheri

Membro



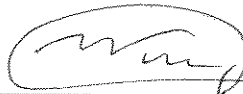
Prof. Dr. Kil Jin Park

Membro



Prof. Dr. Satoshi Tobinaga

Membro



Prof. Caciano Pelayo Zapata Noreña

Membro

Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto

Membro

200802032

Dedico este trabalho a Deus pela vida; a meus pais: Hernán (in memoriam) e Auristela pela formação e exemplo e por terem me ensinado a ter coragem de encarar a vida de frente e a minha esposa Zilda pela compreensão amor e carinho e incentivo e ao Fábio, meu filho, motivo maior da minha alegria e luta.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar registrado os meus agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial:

A Professora Dra. Fernanda Elizabeth Xidieh Murr pela orientação, amizade e pelos ensinamentos fornecidos durante a elaboração deste trabalho.

Aos Professores Dr. Antônio Marsaioli Jr, Dr. Diego Palmiro Ramirez Ascheri, Dr. Kil Jin Park, Dr. Satoshi Tobinaga, Dr. Caciano Pelayo Zapata Noreña e Dr. Carlos Alberto Gasparetto pelas correções e valiosas sugestões.

Aos meus irmãos Gledis, Clever, Lerner, Rosalinda e Linder, pelo companheirismo e pela força nos momentos de saudade. A meus sobrinhos Lucas, Carla, Jorge Luis, Carolina.

Aos meus cunhados Sônia e Gersinho Nogueira e a minha sogra Genoefa pela consideração e valiosa ajuda prestada.

Aos queridos amigos, Antônio Pasquel, Caciano, Segundo, Silvia, Diego, Marina e Eduardo pelos auxílios e valiosa ajuda prestada.

Aos funcionários, técnicos e colegas do Departamento de Engenharia de Alimentos pela amizade e ajuda prestada a nível profissional e pessoal.

Ao Curso de Engenharia de Alimentos da Fundação Universidade Federal do Tocantins – UNITINS, pelo apoio concedido.

À Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas pela Oportunidade de realização do Doutorado.

Aos Professores da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidad Nacional de la Amazonia Peruana – UNAP, Iquitos/Peru, pelos ensinamentos transmitidos.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	x
RESUMO.....	xiv
SUMMARY.....	xv
1.INTRODUÇÃO.....	1
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Matéria-prima.....	3
2.1.1 Cenoura.....	3
2.1.2 Abóbora.....	5
2.2 Secagem.....	6
2.2.1 Mecanismos da Secagem.....	6
2.2.1.1 Período de taxa constante de secagem.....	8
2.2.1.2 Período de taxa Decrescente.....	10
2.2.2 Modelos da Cinética de Secagem.....	11
2.2.2.1 Correlações Empíricas.....	11
2.2.2.2 Modelos Difusivos.....	13
2.2.2.3 Modelos que consideram o encolhimento.....	16

2.2.2.3.1 Modelo Uniforme 1.....	20
2.2.2.3.2 Modelo Uniforme 2.....	21
2.2.2.3.3 Modelo Central.....	22
2.2.3 Fatores que afetam a taxa de secagem.....	23
2.2.4 A secagem a vácuo.....	24
2.2.4.1 Pré-tratamentos.....	26
2.2.4.1.1 Branqueamento.....	26
2.2.4.1.2 Congelamento.....	27
2.3 Planejamento de Experimentos.....	28
2.3.1 Metodologia de Superfície de Resposta.....	28
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1 Matéria prima.....	31
3.2 Equipamento de secagem.....	31
3.2.1 Operação do equipamento.....	33
3.3 Métodos.....	34
3.3.1 Determinação da umidade.....	34
3.3.2 Determinação dos lipídeos.	34
3.3.3 Determinação da proteína.	34
3.3.4 Determinação de fibras.	34
3.3.5 Determinação de cinzas.	35

3.3.6 Determinação dos açúcares.	35
3.3.7 Planejamento Experimental.	35
3.3.8 Secagem.....	37
3.3.8.1 Preparação das amostras	37
3.3.8.2 Branqueamento.....	38
3.3.8.3 Congelamento.. ..	38
3.3.8.4 Modelo de difusão sem encolhimento.	38
3.3.8.5 Modelo de difusão com encolhimento.	39
3.3.8.6 Estudo do encolhimento.	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1 Composição Química da Matéria Prima.....	41
4.2 Curvas de Secagem.	42
4.2.1 Efeito da temperatura e da pressão de secagem.	43
4.2.1.1 Efeito da temperatura e pressão de secagem na cenoura e abóbora.....	43
4.3 Efeito dos Pré-tratamentos.	48
4.3.1 Efeito dos pré-tratamentos sobre a cenoura e abóbora.	48
4.4 Modelo Difusional.	52
4.4.1 Modelo difusional para amostras de cenoura.....	52
4.4.2 Modelo difusional para amostras de abóbora.	56
4.5 Planejamento experimental do Processo de Secagem.....	61

4.5.1 Planejamento experimental para secagem de cenoura.....	61
4.5.2 Planejamento experimental para secagem de abóbora.....	75
4.6 Modelo difusional considerando o encolhimento.....	87
4.6.1 Modelo difusional considerando o encolhimento para amostras de cenoura.....	87
4.6.2 Modelo difusional considerando o encolhimento para amostras de abóbora.....	92
4.7 Estudo do Encolhimento.	97
4.8 Energia de Ativação.	104
5. CONCLUSÕES.	107
6. BIBLIOGRAFIA.	109
APENDICE A.....	119
APENDICE B.....	127
APENDICE C.....	145
APENDICE D.....	153
APENDICE E.....	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Composição química da cenoura (g/100g).	5
Tabela 1.2: Conteúdo de vitaminas em 100 gramas de cenoura.....	5
Tabela 1.3: Conteúdo de minerais da cenoura em 100 g.....	5
Tabela 3.1: Níveis das variáveis independentes estudadas no Processo de secagem.....	36
Tabela 3.2: Matriz do planejamento experimental completo 3^2	37
Tabela 4.1: Composição química de cenoura (<i>Daucus carota</i>).. . . .	41
Tabela 4.2: Composição química da abóbora (<i>cucúrbita máxima</i>).....	42
Tabela 4.3: Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional de cenoura congelada nas diferentes condições de secagem.....	55
Tabela 4.4: Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional de cenoura branqueada nas diferentes condições de secagem.....	55
Tabela 4.5: Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional de cenoura “in natura” nas diferentes condições de secagem.....	56
Tabela 4.6: Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional de abóbora congelada nas diferentes condições de secagem.....	59

Tabela 4.7: Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional de abóbora branqueada nas diferentes condições de secagem.....	60
Tabela 4.8: Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional de abóbora “in natura” nas diferentes condições de secagem.....	60
Tabela 4.9: Variáveis reais e valores da difusividade efetiva calculados para cenoura congelada, branqueada e “in natura”	61
Tabela 4.10: Parâmetros do modelo estatístico da difusividade efetiva, os efeitos principais, erro padrão e coeficiente p para a secagem de cenoura congelada.....	62
Tabela 4.11: Parâmetros do modelo estatístico da difusividade efetiva, os efeitos principais, erro padrão e coeficiente p para a secagem de cenoura branqueada.....	62
Tabela 4.12: Parâmetros do modelo estatístico da difusividade efetiva, os efeitos principais, erro padrão e coeficiente p para a secagem de cenoura “in natura”	63
Tabela 4.13: Análise de Variância para o modelo de 2ª ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), para secagem de cenoura congelada.....	68
Tabela 4.14: Análise de Variância para o modelo de 2ª ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), para secagem de cenoura branqueada.....	69
Tabela 4.15: Análise de Variância para o modelo de 2ª ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), para secagem de cenoura “in natura”	69
Tabela 4.16: Variáveis reais e valores da difusividade efetiva calculados para abóbora congelada, branqueada e “in natura”	76

Tabela 4.17: Parâmetros do modelo estatístico da difusividade efetiva, os efeitos principais, erro padrão e coeficiente p para a secagem de abóbora congelada.....	76
Tabela 4.18: Parâmetros do modelo estatístico da difusividade efetiva, os efeitos principais, erro padrão e coeficiente p para a secagem de abóbora branqueada.....	77
Tabela 4.19: Parâmetros do modelo estatístico da difusividade efetiva, os efeitos principais, erro padrão e coeficiente p para a secagem de abóbora in natura.....	77
Tabela 4.20: Análise de Variância para o modelo de 2ª ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), para secagem de abóbora congelada.....	80
Tabela 4.21: Análise de Variância para o modelo de 2ª ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), para secagem de abóbora branqueada.....	80
Tabela 4.22: Análise de Variância para o modelo de 2ª ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), para secagem de abóbora “in natura”.....	81
Tabela 4.23: Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional , com encolhimento para cenoura congelada	91
Tabela 4.24: Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional, com encolhimento para cenoura branqueada.....	91
Tabela 4.25: Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional, com encolhimento para cenoura “in natura”	92
Tabela 4.26: Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional , com encolhimento para abóbora congelada.....	95
Tabela 4.27: Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional , com encolhimento para abóbora branqueada.....	96

Tabela 4.28: Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional , com encolhimento para as amostras de abóbora “in natura”.....	96
Tabela 4.29. Valores do encolhimento (n) dos modelos uniforme 1 e 2 e central para cenoura congelada a diferentes condições de secagem.....	99
Tabela 4.30. Valores do encolhimento (n) dos modelos uniforme 1 e 2 e central para cenoura branqueada a diferentes condições de secagem.....	100
Tabela 4.31. Valores do encolhimento (n) dos modelos uniforme 1 e 2 e central para cenoura “in natura” a diferentes condições de secagem.....	100
Tabela 4.32. Valores do encolhimento (n) dos modelos uniforme 1 e 2 e central para abóbora congelada a diferentes condições de secagem.....	102
Tabela 4.33. Valores do encolhimento (n) dos modelos uniforme 1 e 2 e central para abóbora branqueada a diferentes condições de secagem.....	103
Tabela 4.34. Valores do encolhimento (n) dos modelos uniforme 1 e 2 e central para abóbora “in natura” a diferentes condições de secagem.....	103
Tabela 4.35 Valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de cenoura congelada.....	105
Tabela 4.36 Valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de cenoura branqueada.....	105
Tabela 4.37 Valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de cenoura “in natura”.....	106

Tabela 4.38 Valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de abóbora congelada.....	106
Tabela 4.39 Valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de abóbora branqueada.....	106
Tabela 4.40 Valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de abóbora “in natura”	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema do processo de secagem de material sólido.	7
Figura 2.2: Diagrama de fases da água pura: Liofilização ($a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$); secagem a vácuo ($a \rightarrow b'$) (KING <i>et al</i> , 1989).....	25
Figura 3.1: Esquema da câmara de secagem a vácuo.....	32
Figura 4.1. Umidade adimensional em função do tempo para secagem de cenoura congelada a temperatura de 50, 60 e 70° C a pressão de 5kPa.	44
Figura 4.2. Umidade adimensional em função do tempo para secagem de cenoura branqueada a temperatura de 50, 60 e 70° C a pressão de 5 kPa.....	44
Figura 4.3. Umidade adimensional em função do tempo para secagem de cenoura “in natura” a temperaturas de 50, 60 e 70° C a pressão de 5 kPa	45
Figura 4.4. Umidade adimensional em função do tempo para secagem de abóbora congelada a temperaturas de 50, 60 e 70° C a pressão de 5 kPa	46
Figura 4.5. Umidade adimensional em função do tempo para secagem de abóbora branqueada a temperaturas de 50, 60 e 70° C a pressão de 5 kPa....	47
Figura 4.6. Umidade adimensional em função do tempo para secagem de abóbora “in natura” a temperaturas de 50, 60 e 70° C a pressão de 5 kPa	47
Figura 4.7. Efeitos dos pré-tratamentos sobre a cinética de secagem da cenoura a 60 °C nas pressões de: (a) 5 kPa, (b) 15 kPa e (c) 25 kPa.....	50

Figura 4.8. Efeitos dos pré-tratamentos sobre a cinética de secagem da abóbora a 60 °C nas pressões de: (a) 5 kPa, (b) 15 kPa e (c) 25 kPa.....	51
Figura 4.9. Curvas de secagem de cenoura congelada ajustadas pelo modelo difusional a temperaturas de 50, 60 e 70° C e pressão de 5 kPa.....	53
Figura 4.10. Curvas de secagem de cenoura branqueada ajustadas pelo modelo difusional a temperaturas de 50, 60 e 70° C a pressão de 5 kPa.....	54
Figura 4.11. Curvas de secagem de cenoura “in natura” ajustadas pelo modelo difusional a temperaturas de 50, 60 e 70° C a pressão de 5 kPa.....	54
Figura 4.12. Curvas de secagem de abóbora congelada ajustadas pelo modelo difusional a temperaturas de 50, 60 e 70° C a pressão de 5 kPa.....	58
Figura 4.13. Curvas de secagem de abóbora branqueada ajustadas pelo modelo difusional a temperaturas de 50, 60 e 70° C a pressão de 5 kPa.....	58
Figura 4.14. Curvas de secagem de abóbora “in natura” ajustadas pelo modelo difusional a temperaturas de 50, 60 e 70° C a pressão de 5 kPa.....	59
Figura 4.15. Estimativa dos efeitos para a difusividade D_{ef} da secagem de cenoura pré-tratada por congelamento e branqueamento e “in natura”.....	63
Figura 4.16. Comparação entre os valores preditos Vs valores experimentais para cenoura congelada.....	70
Figura 4.17. Comparação entre os valores preditos Vs valores experimentais para cenoura branqueada.....	70
Figura 4.18. Comparação entre os valores preditos Vs valores experimentais para cenoura “in natura”.....	71

Figura 4.19. Superfície de resposta (a) e Curvas de nível (b) para $D_{ef}(m^2/s)$ em função da pressão e temperatura de secagem para cenoura congelada.....	72
Figura 4.20. Superfície de resposta (a) e Curvas de nível (b) para $D_{ef}(m^2/s)$ em função da pressão e temperatura de secagem para cenoura branqueada.....	73
Figura 4.21: Superfície de resposta (a) e Curvas de nível (b) para $D_{ef}(m^2/s)$ em função da pressão e temperatura de secagem para cenoura “in natura”.....	74
Figura 4.22. Estimativa dos efeitos para a difusividade D_{ef} durante a secagem de amostras de abóbora pré-tratadas por congelamento e branqueamento e “in natura”.....	78
Figura 4.23. Comparação entre os valores preditos vs valores observados experimentalmente para abóbora congelada.....	82
Figura 4.24. Comparação entre os valores preditos vs valores observados experimentalmente para abóbora branqueada.....	82
Figura 4.25: Comparação entre os valores preditos vs valores observados experimentalmente para abóbora “in natura”.....	83
Figura 4.26. Superfície de resposta (a) e curvas de nível (b) para $D_{ef} (m^2/s)$ em função da pressão e temperatura de secagem para abóbora congelada.....	84
Figura 4.27. Superfície de resposta (a) e curvas de nível (b) para $D_{ef} (m^2/s)$ em função da pressão e temperatura de secagem para abóbora branqueada.....	85

Figura 4.28. Superfície de resposta (a) e curvas de nível (b) para D_{ef} (m^2/s) em função da pressão e temperatura de secagem para abóbora “in natura”	86
Figura 4.29. Curvas de secagem de cenoura congelada ajustadas pelo modelo difusional, com encolhimento, escala monolog.....	88
Figura 4.30. Curvas de secagem de cenoura branqueada ajustadas pelo modelo difusional, com encolhimento, escala monolog	88
Figura 4.31. Curvas de secagem de cenoura “in natura” ajustadas pelo modelo difusional, com encolhimento, escala monolog	89
Figura 4.32. Curvas de secagem de abóbora congelada ajustadas pelo modelo difusional, com encolhimento, escala monolog	93
Figura 4.33. Curvas de secagem de abóbora branqueada ajustadas pelo modelo difusional, com encolhimento, escala monolog	93
Figura 4.34. Curvas de secagem de abóbora “in natura” ajustadas pelo modelo difusional, com encolhimento, escala monolog	94
Figura 4.35. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e centra para cenoura congelada na pressão de 5 kPa e temperatura de 60 °C.....	98
Figura 4.36. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e centra para cenoura branqueada na pressão de 5 kPa e temperatura de 60 °C.....	98
Figura 4.37. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura “in natura” na pressão de 5 kPa e temperatura de 60 °C.....	99

Figura 4.38. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora congelada na pressão de 5 kPa e temperatura de 60 °C.....	101
Figura 4.39. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e centra para abóbora branqueada na pressão de 5 kPa e temperatura de 60 °C.....	101
Figura 4.40. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e centra para abóbora “in natura” na pressão de 5 kPa e temperatura de 60 °C.....	102

TESE DE DOUTORADO

Autor: Arévalo Pinedo, Aroldo

Título: Secagem a vácuo de cenoura (*Daucus carota*) e abóbora (*Cucúrbita máxima*): estudo das características do processo.

Orientadora Prof^a. Dr^a. Fernanda Elizabeth Xidieh Murr

Departamento de Engenharia de Alimentos – DEA, FEA, UNICAMP.

RESUMO

Neste trabalho estudou-se experimentalmente a cinética de secagem a vácuo de cenoura e abóbora “in natura” e pré-tratadas por congelamento e branqueamento. As corridas experimentais foram conduzidas em um secador a vácuo, nas pressões de 5, 15 e 25 kPa e temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Estudou-se a influência da pressão e temperatura, assim como os pré-tratamentos adotados, sobre a cinética de secagem. A análise do efeito dos pré-tratamentos e dos parâmetros pressão e temperatura sobre a velocidade de secagem, revelou que os melhores valores foram obtidos com a temperatura de 70 °C e pressão de 5 kPa para as amostras pré-tratadas por congelamento. Quanto ao tipo de matéria-prima utilizado a abóbora apresentou maiores velocidades de secagem que as de cenoura independente do tratamento recebido e da condição de secagem utilizada. As curvas experimentais de secagem foram ajustadas ao modelo difusional de Fick para uma placa plana infinita considerando ou não o encolhimento. Os valores da difusividade efetiva considerando o encolhimento da amostra são menores que os calculados sem considerar este fenômeno.

Palavras chaves: secagem a vácuo, difusividade efetiva, cenoura, abóbora.

THESIS OF DOCTORATE

Author: Arévalo Pinedo, Aroldo

Title: Vacuum drying of carrot (*Daucus carota*) and pumpkin (*Cucúrbita máxima*): Study of the characteristic of the process.

Supervisor: Profa. Dra. Fernanda Elizabeth Xidieh Murr

Department of Food Engineering – DEA, FEA, UNICAMP.

SUMMARY

In this work it was studied experimentally the kinetics of carrot and pumpkin under vacuum drying in nature and pre-treatment by freezing and bleaching. The experimental runs were driven in a dryer under vacuum, at pressures of 5, 15 and 25 kPa and temperatures of 50, 60 and 70°C. The influences on the drying kinetics of the pressures and temperature were studied, as well as effect of adopting pre-treatment. It was observed that the best values were obtained at the temperature of 70°C and pressure of 5 kPa for the samples pretreatment by freezing. As concerns to the raw material employed pumpkin presented higher drying speeds than the one shown by carrot, independently of the treatment received and of the operational condition of drying. The experimental curves of drying were adjusted to the diffusional model of Fick for an infinite slab with or without shrinkage. The values of effective diffusivity obtained by considering the samples shrinkage were smaller than those calculated without considering this phenomenon.

Key words: vacuum drying, diffusivity effective, carrot, pumpkin.

1. INTRODUÇÃO.

Os recentes desenvolvimentos tecnológicos aplicados na agricultura têm incrementado substancialmente a produção mundial de frutas e legumes. Junto com esta produção também incrementou-se o consumo destes vegetais seja “in natura” ou processados devido aos altos teores de micronutrientes que apresentam na sua composição. Dentre estes vegetais a cenoura e a abóbora apresentam um interesse evidente nas indústrias de alimentos secos devido principalmente a seu alto teor de carotenoides e minerais. O mercado Europeu de cenoura desidratada aproxima-se a 4000 TM por ano, com grandes tendências de crescimento (DEBS-LOUKA, *et al*, 1996 ; KOMPANY *et al*, 1990a). Existem poucos trabalhos referentes à secagem de abóbora, os motivos são desconhecidos, segundo HOOVER (1973) talvez deve-se aos problemas apresentados durante a secagem e pela alta umidade, porém, conforme MANSOUR (1993), estes produtos tem grande aceitação no mercado de consumo, especialmente na indústria de sopas, massas e snacks.

A secagem é empregada visando diversas finalidades. Para os produtos agrícolas e alimentícios é empregada principalmente na preservação, permitindo também o transporte e armazenamento sem refrigeração. A perda de massa que ocorre quando um alimento é seco, diminui consideravelmente os custos de transporte e manuseio.

Apesar de todos esses benefícios trazidos pela secagem, existem algumas conseqüências da mesma que, se não forem bem monitoradas e controladas, podem depreciar a qualidade do produto final. Tais conseqüências são, na maioria, características dos produtos desidratados, como encolhimento, endurecimento superficial, alterações de cor e aroma, perdas por evaporação e desnaturação de proteínas, etc. A utilização de pré-tratamentos, feitos anteriormente à secagem, é uma boa maneira de se evitar alterações que possam prejudicar a qualidade do produto final. Estes pré-tratamentos também influenciam

na cinética de secagem, possibilitando menor gasto de tempo e energia no processo.

Vários métodos de secagem utilizados para vegetais são apresentados na literatura, porém, atualmente dois tipos de processos são os mais utilizados (ROQUES & CORNISH, 1980 citado por KOMPANY, 1990b): a secagem tradicional com ar quente por exemplo, que opera a temperaturas relativamente elevadas, afetando em muitos casos a qualidade do produto final, e a liofilização que oferece melhores produtos em termos de qualidade final, porém, este processo é oneroso, o custo de operação proibitivos para secar frutas e legumes (KOMPANY *et al*, 1993; KING *et al*, 1989 e KING & ZALL, 1992).

A secagem a vácuo pode ser considerada um método intermediário entre a secagem tradicional e liofilização, pois pode trabalhar a baixas pressões com temperaturas moderadas (menores que 100° C), obtendo-se maiores taxas de evaporação da umidade e um produto final de melhor qualidade se comparado com a secagem tradicional com ar quente (KOMPANY *et al*, 1990; DEBS-LOUKA *et al*, 1996, KROKIDA *et al*, 1997; KROKIDA & MAROULIS, 1997a,b)).

Dentro deste contexto, os objetivos deste trabalho são:

- 1- Estudar a cinética de secagem para diferentes condições de temperatura e pressão.
- 2 - Avaliar o efeito dos diversos pré-tratamentos na cinética de secagem.

2 . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 MATÉRIA-PRIMA.

2.1.1 Cenoura.

A cenoura (*Daucus carota*) constitui-se em interessante matéria-prima para a indústria de alimentos, podendo ser processada para conserva enlatada, em mistura com outras hortaliças ou na forma desidratada. A cenoura pode ser ainda empregada, em larga escala, para o consumo popular, em programas de merenda escolar, na forma “in natura” ou quando processada na forma desidratada. Este legume é um produto rico em caroteno, por isso recomendado para a dieta diária na alimentação humana.

Botanicamente, é uma planta classificada de *Daucus carota*, pertence à família Umbelliferae. A substância de reserva deste legume está acumulada na raiz. As variedades de cenoura diferenciam-se pelo ciclo, forma, comprimento e coloração das raízes; a cor predominante é alaranjada, mas existem variedades amarelas e mesmo brancas, utilizadas, entretanto, somente como forrageiras (CAMARGO, 1972; GEIDA/FCTPTA, 1992).

Quanto ao comprimento, as cenouras podem ser divididas da seguinte forma: curtas, quando atingem apenas 12 cm; médias de 12 a 18 cm e as compridas, com mais de 18 cm. A cenoura tipo “Nantes” de melhor valor comercial, é de média precocidade, apresentando raízes completamente desenvolvidas após 120 a 130 dias de semeadura. Sua forma predominante é a cilíndrica meio comprida, em média 15 cm de comprimento, com 3 cm de diâmetro. As melhores variedades desse tipo têm coloração laranja avermelhada, externa e internamente (DUCKWORTH, 1968).

A cenoura destinada ao consumo “in natura” deve estar fisiologicamente desenvolvida, não lenhosa, limpa, com coloração uniforme, livre de danos mecânicos, de pragas, doenças e isenta de substâncias nocivas à saúde (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 1978).

Comercialmente, é classificada em duas classes:

Classe I: cilíndrica, na qual encontramos principalmente a variedade “Nantes”.

Classe II: cônica, que abrange as demais variedades. De acordo com a espécie e apresentação, a cenoura é classificada em três tipos, observadas as exigências de peso médio e as seguintes especificações: tipo extra, tipo especial e de primeira (GEIDA/FCTPTA, 1992; MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 1978).

Na indústria, a classificação é feita quanto à forma, tamanho e coloração. É dada preferência às raízes de forma cilíndrica e que sejam curtas, a fim de se evitar maiores perdas que ocorrem com a eliminação das pontas. Quanto à coloração, esta deve ser totalmente de cor laranja avermelhada, não se aconselhando variedades que apresentem coloração esverdeada na proximidade da inserção da parte aérea da planta. No Brasil, o cultivar que apresenta características adequadas para o processamento é o da variedade “Nantes” (GEIDA/FCTPTA, 1992).

A composição centesimal média da cenoura pode ser observada nas Tabelas 1.1, 1.2 e 1.3. A primeira apresenta a composição para cada 100 g de produto. Na segunda temos a quantidade de vitaminas e a terceira fornece a quantidade de alguns constituintes inorgânicos (HOLLAND & UNWIN, 1991).

Tabela 1.1 - Composição química da cenoura (g/100 gramas).

Água (g)	Nitrogênio (g)	Proteínas (g)	Gorduras (g)	Carboidratos (g)	Valor energético (kcal)
89,8	0,10	0,60	0,30	7,90	25,0

Fonte: HOLLAND & UNWIN, 1991

Tabela 1.2 - Conteúdo de vitaminas da cenoura (mg/100 gramas).

Caroteno (μg)	Vitamina B6 (mg)	Vitamina E (mg)	Vitamina C (mg)	Riboflavina (mg)
8115*	0,14	0,56	6	0,01

Fonte: HOLLAND & UNWIN , 1991 (*)valores oscilando entre 4300 e 11000 μg.

Tabela 1.3 - Conteúdo de minerais da cenoura (mg/100 gramas).

Na (mg)	K (mg)	Ca (mg)	Mg (mg)	P (mg)	Fe (mg)	Cu (mg)	Zn (mg)	S (mg)	Cl (mg)	Mn (mg)
25	170	25	3	15	0,3	0,02	0,1	7	33	0,1

Fonte: HOLLAND & UNWIN, 1991.

2.1.2 Abóbora.

A abóbora pertence à família cucurbitaceae, a mesma da melancia, do melão, do chuchu e do pepino, é originaria das Américas. Constituíram, juntamente com o milho e o feijão, a base alimentar das civilizações antigas como os incas, astecas e maias. Até hoje são importantes na dieta e na alimentação dos povos nas regiões tropical e subtropical do mundo (IAC, 1998).

A abóbora é um legume cuja cultura é muito difundida no Brasil. No Norte, também é conhecida como jerimum. É uma planta anual, geralmente trepadeira, de talo oco e com grandes folhas verdes. Dá flores grandes, amarelas ou alaranjadas, conhecidas pelo nome de cambuquira. A abóbora tem tamanho e formato diferente conforme a variedade. Em geral, tem a pele lisa (apenas algumas variedades têm superfície rugosa) e aparência de gomos. Quanto à cor, a abóbora pode ser verde, amarela, branca, vermelha, alaranjada ou com listras coloridas. A abóbora têm alto valor nutritivo, por que contém caroteno, um elemento ótimo para fortalecer a visão, vitaminas do complexo B e sais minerais (cálcio, fósforo e ferro). Além de ter poucas calorias, é de fácil digestão, sendo um ótimo alimento para crianças ou para adultos com problemas no aparelho digestivo (IAC,1998).

Na família das cucurbitáceas há numerosas espécies de abóboras. As mais cultivadas no Brasil são: a abóbora de pescoço ou menina (*Cucúrbita máxima*), a abóbora comum ou moranga (*Cucúrbita pepo*), abóbora da Itália ou cheirosa (*Cucúrbita moschata*), a abóbora chila (*Cucúrbita ficifolia*) e a abóbora do campo (*Cucúrbita tenuifolia*) (IAC, 1998).

A espécie comumente empregada na indústria para a fabricação de doces em massa, cristalizadas, etc é a abóbora de pescoço ou menina (*Cucúrbita máxima*) devido a sua boa aceitação comercial e à cor e sabor (ITAL,1995).

2.2 SECAGEM.

2.2.1 Mecanismos de Secagem.

A aplicação do calor promove a evaporação de água dos tecidos vegetais e animais (frutas, legumes, pescados e carnes). Conforme KING (1968), na secagem de um produto sólido ocorrem simultaneamente vários fenômenos

físicos, (conforme está esquematizado na Figura 2.1):

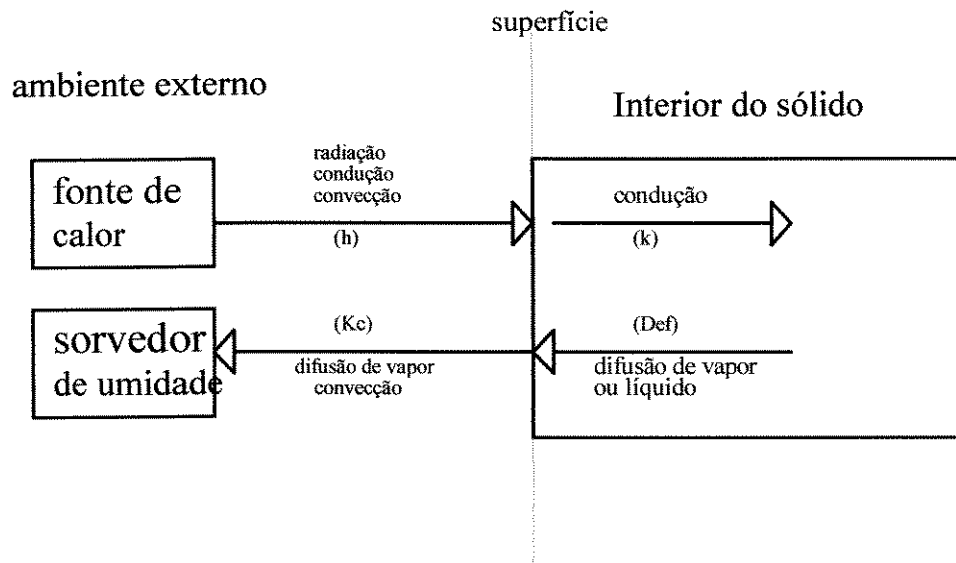


Figura 2.1 - Esquema do processo de secagem de material sólido. (TEIXEIRA, 1995)

os mais importantes são: a difusão de vapor devido ao gradiente de concentração, a difusão de água líquida em termos do gradiente de umidade e escoamento capilar. Conforme DAUDIN, 1983 as transferências internas de massa são influenciadas por dois parâmetros importantes para materiais biológicos:

- Migração de soluto: formação de crosta e
- A deformação do produto: encolhimento.

Dentro da complexidade deste comportamento e as dificuldades do conhecimento preciso das características do produto, procede-se geralmente a um estudo experimental desta cinética.

As informações obtidas são apresentadas em forma de curvas: Umidade (X) em função do tempo (t), e a velocidade de secagem (dX/dt) em função da umidade (X).

De acordo com CORMICK (1983), a secagem pode ser classificada em dois períodos: Período de taxa constante de secagem e período de taxa decrescente de secagem.

2.2.1.1 Período de taxa constante de secagem.

Quando um sólido saturado com água é submetido a uma condição favorável de secagem, ocorre inicialmente transferência de vapor da superfície do material para o meio ambiente externo. Nessa fase, o movimento de água dentro do sólido ocorre com velocidade suficiente para manter a condição de saturação na superfície do material. Como a superfície se mantém saturada, a transferência de massa ocorre de forma equivalente à evaporação de água pura e é essencialmente independente da natureza do sólido. Em regime estacionário, a temperatura da superfície do sólido é igual à temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, implicando numa taxa constante de transferência de calor, que resulta numa velocidade de secagem constante. Esta etapa é denominada período de taxa constante e seu final é marcado por uma redução na taxa de secagem, dando origem a um ponto chamado de umidade crítica (CHIRIFE, 1983).

O período de taxa constante é considerado de relativa importância quando o potencial de secagem do ar é muito baixo ou a umidade do alimento é muito alta, como é no caso de frutas (CHIRIFE, 1983). As curvas de taxa de secagem em função da umidade evidenciam o término de período de taxa constante, e consequentemente o valor da umidade crítica.

A taxa de secagem neste período pode ser calculada utilizando a equação

de balanço de calor. Devido à superfície do material estar úmida e a temperatura do material ser igual à temperatura de bulbo úmido do ar de secagem desprezando-se a transferência de calor por condução e radiação e a taxa de secagem é dada por:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{hA(T_a - T_{bu})}{H_{vap}} \quad (2.1)$$

onde:

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

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

A = área da superfície exposta (m^2);

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

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

H_{vap} = calor latente 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 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 & OKOS, 1980).

Para certos produtos alimentícios, a fase de taxa constante é quase inexistente devido a transferência interna é inexistente. VAN ARSDEL (1973) explica a ausência desta fase em razão dos fenômenos de encolhimento apresentados pelos produtos biológicos. Este fato foi observado por diferentes autores durante a secagem, da cenoura e batata (SUZUKI, *et al*, 1976) e de frutas

e legumes (SARAVACOS & CHARM, 1962).

2.2.1.2 Período de taxa decrescente.

Este período é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios.

Segundo STRUMILLO & KUDRA (1986), nesta etapa, a velocidade de secagem diminui continuamente ao longo de todo o ciclo de secagem restante. Esta etapa do processo caracteriza-se por um novo comportamento denominado período de taxa decrescente.

Este período inicia quando a migração interna de umidade começa a controlar o processo de secagem, e pode ser constituído por duas etapas (CHIRIFE *et al*, 1983). Para a primeira fase do período de taxa decrescente da secagem de alimentos sólidos, os principais mecanismos de transporte sugeridos são: escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor. Na segunda fase deste período, a difusão de vapor é provavelmente o mecanismo predominante de transporte de umidade (KING, 1968; DAUDIN, 1983).

Segundo KOMPANY *et al* (1990b) durante esta fase a temperatura do sólido aumenta progressivamente ao longo do tempo. Este período é sem duvida, o mais delicado para a proteção das características finais do produto.

2.2.2 Modelos da Cinética de Secagem.

Diferentes modelos matemáticos foram usados pelos pesquisadores para descrever o movimento da água durante a secagem de produtos alimentícios. Dentre eles temos os modelos empíricos, semi-empíricos e os difusivos baseados

na lei de difusão de Fick.

2.2.2.1 Correlações Empíricas.

Uma importante correlação na secagem de alimentos é a lei exponencial (VERSAVEL & MUIR, 1988; AJIBOLA, 1989). Sendo que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre do material na forma (WHITAKER *et al*, 1969):

$$\frac{dX}{dt} = -K(\bar{X} - X_e) \quad (2.1)$$

Onde: K = o fator de proporcionalidade denominado de constante de secagem e X_e Umidade de equilíbrio (g/g).

Esta equação é análoga à expressão da lei de resfriamento de Newton, este modelo assume que toda a resistência ao transporte de umidade concentra-se na camada limite, desconsiderando os efeitos no interior do material; é por isto chamado de modelo semi-empírico. A equação (2.1) é normalmente utilizada na forma integrada , como,

$$\left(\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} \right) = \exp(-Kt) \quad (2.2)$$

Onde:

$\bar{X}$ = umidade média volumétrica (g/g);

X_e = umidade de equilíbrio, (g/g)

X_o = umidade inicial, (g/g)

t = tempo (s);

Outras duas importantes modificações da lei exponencial, na forma integrada, a dois parâmetros que apresentam melhores ajustes experimentais são:

$$\left(\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} \right) = a \exp(-Kt) \quad (2.3)$$

$$\left(\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} \right) = \exp(-Kt^n) \quad (2.4)$$

Onde: a = constante da equação; n = fator exponencial.

Segundo CORMICK (1983), a equação (2.4) é similar à solução do modelo de Fick para tempos de secagem longos quando apenas o primeiro termo da solução série for significativo. Esta equação foi utilizada por muitos pesquisadores para secagem de produtos biológicos, para determinação do parâmetro de difusividade efetiva a partir da constante de secagem, como observado nos trabalhos de VACCAREZZA *et al* (1974) para raiz de beterraba açucareira, YUSHENG & POULSEN (1988) para batata e MAZZA & LEMAGUER (1980) para cebola e PINTO & TOBINAGA (1992) da seguinte forma:

$$K = \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L_0^2} \quad \text{para lâminas} \quad (2.5)$$

$$K = \frac{\pi^2 D_{ef}}{r^2} \quad \text{para esferas} \quad (2.6)$$

Onde: D_{ef} = Difusividade efetiva, (m^2/s), raio (m^2) e L_o = espessura inicial (m).

A equação (2.4) é chamada de modelo de Page, sendo de grande uso nos estudos da secagem de produtos agrícolas, em particular para grãos e sementes, por apresentar excelentes resultados (PATHAK *et al*, 1991).

Apesar das correlações empíricas não fornecerem informações físicas a respeito dos mecanismos internos de migração de umidade que ocorrem durante a secagem, constituem um importante procedimento para a determinação de parâmetros experimentais, como também são utilizadas para a comparação entre diferentes processos de secagem considerados.

2.2.2.2 Modelos Difusivos.

LEWIS (1921) foi um dos primeiros pesquisadores a interpretar a secagem como um fenômeno de difusão interna de água líquida. Neste trabalho, o período de taxa decrescente foi descrito em termos da lei de difusão de Fick, dada pela equação (2.7). A difusividade efetiva considera todos os mecanismos de transporte de água que ocorrem no interior do sólido para a superfície de evaporação (TEIXEIRA & TOBINAGA, 1998).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot [D_{ef} \nabla(X)] \quad (2.7)$$

Este modelo foi amplamente utilizado por diversos pesquisadores no estudo da secagem de Alimentos (TEIXEIRA, 1995; PARK, 1987; AGUERRE *et al*, 1985; MAZZA & LEMAGUER, 1980).

CRANK (1975), apresentou soluções analíticas para a equação de difusão, considerando diferentes condições inicial e de contorno. Tratou também de casos onde a difusividade varia linearmente ou exponencialmente com a concentração. No entanto, estas soluções somente se aplicam a sólidos com formas geométricas

simples e regulares. Em geral o coeficiente de difusão é obtido por ajustes das curvas teóricas aos dados experimentais de secagem e é denominado difusividade efetiva, por englobar efeitos de diferentes fenômenos durante a migração de umidade. Para materiais isotrópicos, em coordenadas cartesianas a equação (2.7) fica:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial X}{\partial x} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

Assumindo a forma geométrica de uma placa plana infinita, onde a transferência interna de umidade durante a secagem é apenas em uma direção, a equação (2.8) se reduz a:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial y} \right) \quad (2.9)$$

Considerando que seja:

- a secagem ocorra apenas por uma das fases,
- a difusividade efetiva, D_{ef} , constante,
- a umidade inicial, X_0 , uniformemente distribuída no interior do produto,
- a resistência externa ao transporte de massa, desprezível,
- a umidade na superfície, constante e seja igual a umidade de equilíbrio, X_e , do produto,
- a umidade de ar de secagem, constante,
- o encolhimento, desprezível.

A média volumétrica da solução da equação (2.9), obtida por BROOKER *et al*, 1974 e CRANK, 1975, é

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right] \quad (2.10)$$

Com as seguintes condições:

Inicial: $X = X_o$ em $t = 0$, $0 \leq y \leq L$

Contorno: $X = X_e$ em $t \geq 0$, $y = L$

$\frac{\partial X}{\partial t} = 0$ em $t \geq 0$, $y = 0$

Onde:

$\bar{X}$ = umidade média volumétrica (g/g);

X_e = umidade de equilíbrio, (g/g)

X_o = umidade inicial, (g/g)

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

D_{ef} = difusividade efetiva, (m²/s);

t = tempo (s);

L = espessura (m).

O termo da direita da equação (2.10) 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:

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = C \exp\left(-\pi^2 D_{ef} \frac{t}{4L^2}\right) \quad (2.11)$$

Apesar da complexidade dos mecanismos de transporte de umidade, VACCAREZZA *et al* (1974) encontraram que a lei de Fick pode ser usada para

predizer com razoável precisão o tempo médio de secagem, a distribuição de umidade interna e a temperatura da amostra durante a desidratação de beterraba açucareira.

2.2.2.3 Modelos que consideram o encolhimento.

Para produtos com alto teor de umidade, como é o caso de frutas e hortaliças, 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 MISRA & 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 à escassez de informações sobre o coeficiente de encolhimento e a relação funcional entre o encolhimento e difusividade mássica. Eles também verificaram que o encolhimento é função de uma retração livre, relacionada com a perda de água e é também elástico, o qual é provocada pelas células adjacentes.

SUAREZ & VIOLLAZ (1991) analisando a secagem de batata, compararam os uso da segunda lei de Fick com difusividade constante e sem encolhimento e com encolhimento, encontrando resultados diferentes. Alguns autores têm admitido que o decréscimo do volume durante a secagem seja equivalente ao volume removido de umidade (LOZANO *et al*, 1983).

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.

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

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

AREGBA *et al* (1990) abordaram o fenômeno de encolhimento, incluindo-o no equacionamento original. Desenvolveram um modelo difusivo de secagem,

onde aparece um termo convectivo (função da velocidade de deslocamento da fase sólida), o qual explica a transferência de umidade ligada ao encolhimento. Esse termo convectivo teve origem nas equações de fluxo da fase líquida relativamente à fase sólida (sistema bifásico) e na consideração do fluxo difusivo. Isto resultou em uma expressão para a velocidade de deslocamento da fase sólida em função do encolhimento volumétrico.

Um modelo para materiais que sofrem grandes deformações foi desenvolvido por KECHAOU & ROQUES (1989), secando gel em fatias. A partir de uma curva experimental correlacionando a densidade mássica do material com seu teor de umidade, concluíram que o volume poderia ser representado por uma função linear da umidade média durante o encolhimento. Considerando o material anisotrópico, optaram por uma equação que relacionava a espessura da fatia em função da umidade média.

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).

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 & 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 modelo de Fick com encolhimento para tempos de secagem relativamente pequeno 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 & 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 de água e a 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.

SERENO & 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 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 os 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 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.

2.2.2.3.1 Modelo uniforme 1.

No caso do modelo de secagem uniforme, o encolhimento foi considerado igual ao volume de água removida 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:

$$\frac{A}{A_o} = \left(\frac{V}{V_o} \right)^n \quad (2.12)$$

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:

$$\frac{A}{A_o} = \left(\frac{v_e + [m - m_e] / \rho_{H_2O}}{v_o + [m_o - m_e] / \rho_{H_2O}} \right)^n \quad (2.13)$$

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

$$\frac{A}{A_o} = \left(\frac{m + m_e(1/(\rho - 1))}{m_o + m_e(1/(\rho - 1))} \right)^n \quad (2.14)$$

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);

m = massa da amostra, (g);

m_e = massa da amostra no equilíbrio, (g);

m_o = massa da amostra inicial, (g),

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

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

n = coeficiente de encolhimento.

A equação (2.14) pode ser rearranjada da seguinte forma:

$$\frac{A}{A_o} = \left(\frac{X + a}{X_o + a} \right)^n \quad (2.15)$$

Sendo:

$$a = X_e \left(\frac{1}{\rho_e - 1} \right) + \frac{1}{\rho_e} \quad (2.16)$$

Onde:

X = umidade da amostra, (g);

X_e = umidade de equilíbrio da amostra, (g).

2.2.2.3.2 Modelo uniforme 2.

Este modelo é função da umidade e densidade inicial do produto sendo expresso pela seguinte equação:

$$\frac{A}{A_o} = [b(\frac{X}{X_o}) + C]^n \quad (2.17)$$

Onde:

$$b = \frac{\rho_o X_o}{(X_o + 1)} \quad (2.18)$$

$$c = 1 + b - \rho_o \quad (2.19)$$

Na equação (2.15) 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 (2.17) 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.

2.2.2.3.3 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 à 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 a umidade média pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\frac{A}{A_o} = [k(\frac{X}{X_o}) + p]^n \quad (2.20)$$

Onde:

$$k = \frac{X_o(p - \mu)}{X_o - X_e} \quad (2.21)$$

$$p = \frac{\mu X_o - X_e}{X_o - X_e} \quad (2.22)$$

$$\mu = \frac{(X_e + 1)\rho_o}{(X_o + 1)\rho_e} \quad (2.23)$$

A equação (2.20) representa o encolhimento quando este é proporcional ao volume de água perdida durante a secagem.

2.2.3 Fatores que afetam a taxa de secagem.

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

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

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

partícula, e em menor grau pela velocidade de secagem.

ALZAMORA *et al* (1980), ao estudarem a desidratação de abacate verificaram, dentre os fatores avaliados, o teor de óleo como sendo o que mais influenciou na taxa de secagem. A difusividade de água é afetada negativamente pelo teor de óleo.

VAGENAS & MARINOS-KOURIS (1991) ao estudarem a secagem de alimentos, verificaram que, dentre as dificuldades ou problemas encontrados durante a secagem, tem-se a complexidade da composição e estrutura do alimento e mais especificamente:

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

2.2.4 A secagem a vácuo.

A secagem a vácuo é uma operação unitária aplicada na engenharia de processos de produtos agrícolas, na qual um material úmido é seco sob pressão sub-atmosférica. Os materiais usualmente utilizados para este tipo de secagem

são aqueles que tenham componentes degradáveis ou termo-sensíveis ao calor, facilmente oxidáveis ou que sejam altamente higroscópicos (MALCZEWSKI & KACZMAREK, 1989; NASTAJ, 1989; FERNANDO & THANGAVEL, 1987).

Na Figura 2.2 estão apresentados os caminhos percorridos pela secagem por liofilização e a secagem a vácuo.

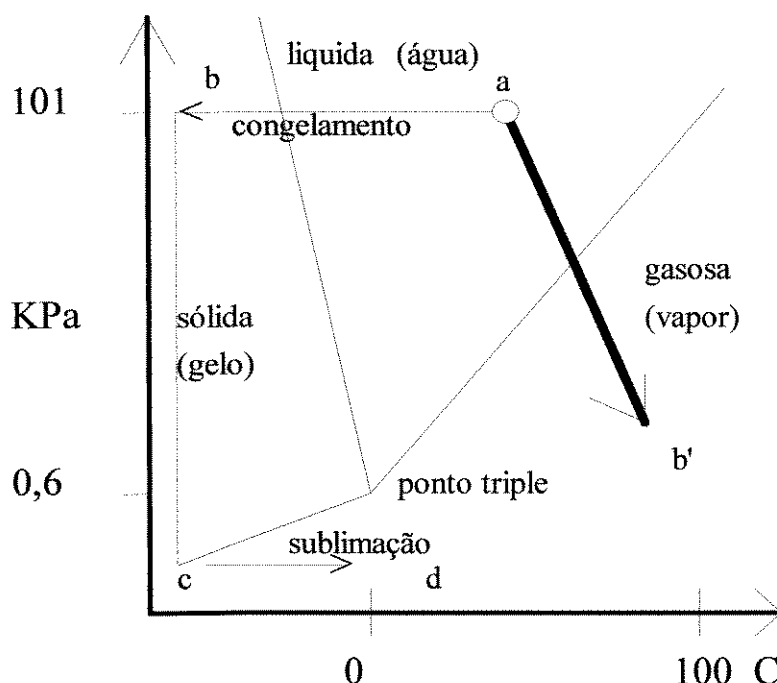


Figura 2.2 - Diagrama de fases da água pura: Liofilização ($a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$); secagem a vácuo ($a \rightarrow b'$) (KING *et al*, 1989).

A secagem a vácuo pode ser considerada um método intermediário entre a secagem tradicional e liofilização, pois pode trabalhar a baixas pressões com temperaturas moderadas (menores que 100 °C), obtendo-se maiores taxas de evaporação da umidade e produto final de melhor qualidade se comparado com a secagem tradicional com ar quente (KOMPANY *et al*, 1990a).

A liofilização é um processo que utiliza temperaturas e pressões baixas, tais que a água previamente congelada é submetida a um vácuo, nestas condições a água passa diretamente do estado sólido para o gasoso, sublimação. Este processo de liofilização deve ser feito à temperatura e pressão inferior ao ponto triplo da água (JIMENEZ & LOMBRAÑA, 1982). No processo de liofilização existem duas etapas de secagem. Uma primeira etapa ou secagem primária corresponde à sublimação do gelo, enquanto que na secagem secundária, o fenômeno dominante é a dessorção de vapor de água. Enquanto que na secagem a vácuo, durante a secagem primária se produz a evaporação da água livre.

KOMPANY *et al* (1990a), observaram durante a secagem de frutas e legumes que a pressão e os diferentes tipos de pré-tratamentos aplicados na matéria-prima aumentam a velocidade de secagem e favorecem a posterior reidratação do produto final.

FERNANDO & THANGAVEL (1987) estudando as características da secagem a vácuo do amendoim encontraram que quanto menor a pressão absoluta dentro do secador maior será o tempo de secagem. Segundo os autores isto é devido que o amendoim apresenta em sua composição grande quantidade de óleo. Durante a secagem forma-se uma camada superficial de umidade e óleo que impede a evaporação da umidade do produto.

2.2.4.1 Pré-tratamentos.

2.2.4.1.1 Branqueamento.

Várias reações de deterioração dos alimentos são causados por diferentes tipos de enzimas. Estas enzimas podem ser constituintes normais dos tecido vegetal e animal ou podem proceder de bactérias presentes dentro dos tecidos. Existem vários métodos para destruir estas enzimas, o branqueamento pelo uso

do calor é o mais aplicado industrialmente a frutas e hortaliças, podendo ser realizado com água fervente ou por meio de aplicação de vapor de água.

GROTE & FROME (1980) estudando a influência do branqueamento em função da taxa de dilatação das paredes celulares de cenoura e vagens, observaram com ajuda de um microscópio eletrônico que a capacidade de dilatação desta parede aumenta com o tempo de branqueamento.

BIELING & SCHWAIGER (1980), estudaram o comportamento do branqueamento sobre os tempos de cozimento em vagens secas.

Segundo ALZAMORA & CHIRIFE (1980) vários são os aspectos a ser considerados para explicar o efeito do branqueamento sobre a velocidade de secagem de frutas e outros vegetais. Entre eles o aquecimento provoca mudanças nas propriedades físicas do tecido e modificando a semipermeabilidade da membrana celular.

2.2.4.1.2 Congelamento.

Dentro das operações de pré-tratamento, o congelamento tem uma importância particular. Principalmente, devido à sua influência sobre a modificação da estrutura do produto e uma profunda perturbação que ele aporta (KOMPANY *et al*, 1990b e KOMPANY *et al*, 1993).

Segundo BROW (1967) citado por CANET & ESPINOZA (1983), o congelamento modifica as propriedades termofísicas do produto, conforme o tipo de cristalização da água, esta cristalização é função da velocidade de congelamento da água. Com o congelamento, a porosidade, a permeabilidade e a condutividade térmica podem ser afetadas, conduzindo a uma grande modificação na cinética de secagem e na taxa de reidratação.

Conforme ALZAMORA & CHIRIFE (1980) estudando a secagem de abacate, beterraba e batata comprovaram que tanto o branqueamento como o congelamento da matéria-prima modificam as características físicas do tecido celular favorecendo a velocidade de secagem em frutas e legumes.

2.3 Planejamentos 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 reduzido. Esta metodologia mostra ainda a verificação dos efeitos individuais e de todas as interações possíveis das variáveis e suas respostas, 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, mostrando 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 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 -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 da correlação da regressão (R^2) 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 à 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 da unidade, 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 devida exclusivamente a fatores aleatórios. A hipótese nula pode ser testada usando o valor efetivamente calculado para MQ_R/MQ_r e para isso basta compará-lo com o valor do 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 média global (BARROS NETO *et al*, 1995).

3. MATERIAL E METODOS.

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

3.1 Matéria-prima.

Foram utilizadas como matéria-prima a cenoura (*Daucus carota*) e abóbora (*Cucúrbita máxima*) adquiridas do comércio local de Campinas, cuidando-se de se obter material homogêneo de forma a se garantir a procedência sempre do mesmo produtor. As amostras foram acondicionadas em uma geladeira, por máximo uma semana, visando a preservação de suas características para a realização do trabalho.

Durante a execução do trabalho as amostras foram descongelada até atingir a temperatura ambiente de laboratório, trituradas em um multiprocessador para determinação da composição química do produto, ou seja, determinação da umidade, açúcares, lipídeos, proteínas, fibras e cinzas.

3.2 Equipamento de secagem.

O equipamento de secagem, mostrado na figura 3.1, consta das seguintes partes:

- Câmara de secagem: esta câmara tem formato cúbico de 45 cm de aresta, construído em chapa de ferro de 4 mm de espessura, com tampa de acrílico de 9mm de espessura .

- Sistema de vácuo: a linha da bomba de vácuo é ligada através de uma mangueira de borracha à câmara de secagem. A pressão é regulada através de uma válvula esférica que esta ligada por sua vez a um vacuometro que mede a pressão absoluta dentro da câmara de secagem.

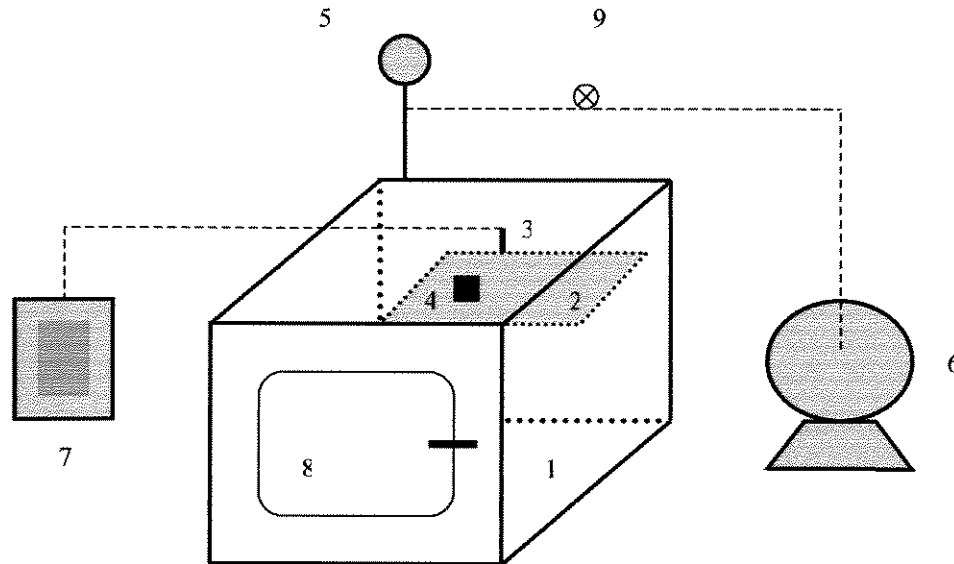


Figura 3.1 - Esquema da câmara de secagem a vácuo. 1. Câmara de secagem de chapas de aço; 2. Placa de aço inox aquecida por resistência elétrica; 3. Termopar tipo PT-100; 4. Amostra; 5. Vacuometro de relógio; 6. Bomba de vácuo; 7. Controlador eletrônico de temperatura; 8. Porta da câmara de acrílico.

- Sistema de aquecimento: constituído de duas placas de aço inoxidável de 10 cm de largura por 25 cm de comprimento, uma superior e outra inferior. Entre estas duas placas encontra-se embutida uma resistência elétrica de 250 W de potência, a qual fornece o aquecimento da superfície superior da placa superior. A temperatura da placa é medida e regulada por um termopar tipo PT-100 que esta diretamente soldada na superfície da placa, as medidas da temperatura são

enviadas a uma caixa controladora de temperatura onde o circuito elétrico liga o desliga a entrada de corrente elétrica quando for preciso aquecer ou resfriar a placa respectivamente, de tal forma manter a temperatura com variação de ± 2 °C.

- Medidas de temperatura. as temperaturas dentro da câmara durante a secagem foram medidas através de termopares do tipo de cobre-constantan. Os termopares foram calibrados em banho termostático tomando como referência um termômetro padrão.

- Medida das massas e dimensões das amostras. a massa das amostras durante a secagem foi determinada através de uma balança analítica, com precisão de 0,0001 g e as dimensões da amostra com um paquímetro, respectivamente.

3.2.1 Operação do equipamento.

1) Antes do início de cada experimento a placa era aquecida até a temperatura determinada pela condição de secagem, de maneira a estabilizar as oscilações da temperatura, até estabilizá-la

2) A amostra era colocada sobre a placa aquecida, em seguida fechava-se hermeticamente a porta e ligava-se rapidamente a bomba de vácuo até atingir a pressão desejada quando fechava-se a válvula esférica do vácuo e desligava-se a bomba, dando início desta maneira à secagem.

3) Cada vez que se desejava pesar as amostras rompia-se rapidamente o vácuo abrindo a válvula esférica da câmara, abria-se a porta e retirava-se as amostras do secador. Uma vez pesada a amostra segue-se novamente o passo 2. As amostras eram retiradas a períodos de 30 em 30 minutos até o final do processo. Este tipo de procedimento foi utilizado por KROKIDA *et al* (1997) e KROKIDA e MAUROLIS (1997) durante a secagem a vácuo de frutas e outros vegetais. Os

níveis de temperatura de aquecimento da placa foram de 50, 60 e 70° C e 5, 15 e 25 kPa de pressão absoluta dentro da câmara.

3.3 Métodos.

As determinações da composição química foram realizadas segundo as técnicas descritas no apêndice A.

3.3.1 Determinação da umidade.

Para determinação da umidade da cenoura e abóbora foi utilizado o método descrito pela AOAC (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 triplicata foram levadas a estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de 100° C até peso constante. Todas as medidas de massa foram feitas em balança analítica (Marca BOSCH, modelo SAE 200)

3.3.2 Determinação dos lipídeos.

A metodologia 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 um solvente como o éter etílico ou na quantidade de material dissolvido pelo solvente.(A.O.A.C, 1984).

3.3.3 Determinação da proteína.

Para determinação da proteína foi utilizado o método de Micro-Kjeldahl que toma para cada 100 gramas de proteína a existência de 16 gramas de nitrogênio (100:16), obtendo-se desse modo o fator 6,25 que multiplicado pelo percentual de

nitrogênio total da amostra, fornece o percentual de proteína da mesma. Desse modo, o nitrogênio total da amostra foi convertido em nitrogênio protéico (A.O.A.C, 1984).

3.3.4 Determinação de fibras.

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

3.3.5 Determinação de cinzas.

Esta determinação foi realizada através da queima da matéria orgânica, ou seja, incinerou-se amostras 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 (A.O.A.C, 1984).

3.3.6 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 620 nm (A.O.A.C, 1984).

3.3.7 Planejamento Experimental.

Para estudar os efeitos da pressão e temperatura durante a secagem de cenoura e abóbora “in natura” e pré-tratadas por congelamento e branqueamento, foi utilizado um planejamento experimental completo 3^2 com dois fatores e três

níveis (BOX *et al* , 1978), como mostrado na Tabela 3.1. As variáveis foram estabelecidas com três níveis codificados em -1, 0, +1. Os valores reais correspondentes a estes níveis foram calculados de acordo com a seguinte equação:

$$P_{\text{cod ou } T_{\text{cod}}} = \frac{X_i - Y}{\Delta X_i} \quad (3.1)$$

Onde:

$P_{\text{cod ou } T_{\text{cod}}}$ = Valor codificado da variável X_i (Pressão ou temperatura)

X_i = Valor real da variável;

Y = Valor real da variável no ponto central;

ΔX_i = Módulo de diferença entre dois valores consecutivos.

Tabela: 3.1: Níveis das variáveis independentes estudadas no processo de secagem.

Fatores (variáveis)	(-1)	0	(+1)
Temperatura (°C)	50	60	70
Pressão (kPa)	5	15	25

A tabela 3.2 apresenta a matriz do planejamento com as condições experimentais com seus valores codificados e reais utilizados em cada ensaio. A resposta ou variáveis estudadas para cada experimento foi a difusividade efetiva $D_{\text{ef.}}$, calculadas sem considerar o encolhimento. Para análise do efeito combinado das variáveis independentes de pressão e temperatura nas respostas avaliadas, empregou-se a metodologia de superfície de resposta (BOX e DRAPER, 1969). A

estimativa desses efeitos foi realizada através do software Statistica for Windows 5.0. As análises estatísticas dos resultados obtidos durante o planejamento experimental foram feitas por análises de variância (ANOVA).

Tabela 3.2: Matriz do planejamento experimental completo 3^2 .

Ensaio	Temperatura		Pressão	
	Codificada T_{cod}	Real (°C)	Codificada P_{cod}	Real (kPa)
1	-1	50	-1	5
2	0	60	-1	5
3	+1	70	-1	5
4	-1	50	0	15
5	0	60	0	15
6	+1	70	0	15
7	-1	50	+1	25
8	0	60	+1	25
9	+1	70	+1	25

3.3.8 Secagem.

3.3.8.1 Preparação das amostras.

A matéria-prima, selecionada na parte 3.1, foi lavada em água corrente, com a finalidade de retirar as impurezas e terra. Em seguida, a abóbora foi cortada em pedaços grandes para retirar as sementes do interior. Para a cenoura as partes extremas finas ou esverdeadas foram cortadas com a finalidade de se obter um cilindro uniforme.

As amostras foram cortadas em dimensões aproximadas de: 5,0 mm de espessura; 40,0 mm. de comprimento e 20 mm de largura.

3.3.8.2 Branqueamento.

O branqueamento foi efetuado com água à temperatura de 80 °C à pressão ambiental, por 4 minutos. Tal tempo foi escolhido tendo em vista que BARBOSA (1980) concluiu, utilizando tempos de 3, 4 e 5 minutos, que para os três períodos citados houve inativação completa da peroxidase, enzima responsável pelo escurecimento. Este tempo também foi utilizado por MULET *et al* (1983) e PAWAR *et al*, (1985) no branqueamento de abóbora. Ao término dos 4 minutos, as amostras foram resfriadas em água fria e deixadas escorrer o excesso de água superficial.

3.3.8.3 Congelamento.

Este pré-tratamento foi realizado num “freezer” comercial com recirculação de ar a temperatura de -15 °C por 5 horas. As amostras preparadas de acordo com o item 3.3.8.1 foram colocadas dentro de uma embalagem de papel alumínio para evitar a formação de blocos de gelo na superfície e levados ao congelamento.

Após o congelamento as amostras foram descongeladas à temperatura ambiental antes do início do ensaio por tempo aproximado de 15 a 20 minutos.

3.3.8.4 Modelo de difusão sem encolhimento.

A análise do processo de secagem, os ajustes das curvas experimentais e o cálculo da difusividade efetiva sem considerar o encolhimento da amostra foram

realizados com base na segunda lei de Fick para uma placa plana infinita de acordo com a equação (2.8).

3.3.8.5 Modelo de difusão com encolhimento.

A difusividade efetiva (D_{ef}) considerando o encolhimento foi determinada substituindo na equação (2.8) o termo adimensional do conteúdo de umidade pela concentração de umidade (PARK, 1987) como segue:

$$\frac{C - C_e}{C_o - C_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right] \quad (3.5)$$

Onde:

C = concentração de umidade, X/V , $[g/g./m^3]$

C_e = concentração de umidade de equilíbrio, X_e/V_e , $[g/g/ m^3]$

C_o = concentração de umidade inicial, X_o/V_o , $[g/g./m^3]$

Os volumes das amostras (V , V_e , V_o) foram obtidos multiplicando-se os valores das três dimensões comprimento, largura e espessura da amostra com ajuda de um paquímetro.

X_e é a umidade em equilíbrio em g. de água por g. de massa seca. No presente estudo, assumiu como sendo o menor valor obtido de cada corrida experimental de secagem.

A determinação dos coeficientes da equação foi feita por regressão não linear utilizando o programa STATISTICA 5.0. O ajuste foi comparado através do erro relativo e o coeficiente R^2 entre os dados das curvas experimentais e os

calculados.

3.3.8.6. Estudo do encolhimento.

Para o estudo do encolhimento durante a secagem utilizou-se balança analítica, paquímetro e uma bandeja.

Durante a secagem foram retiradas as amostras da câmara de secagem e medidas as três dimensões para que se obtivessem os volumes. Estas medidas foram realizadas a cada meia hora nas primeiras três horas da secagem e depois de hora em hora até que não houvessem mais variações de peso da amostra.

Com os dados de encolhimento e os modelos de SUZUKI *et al* (1976) 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.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

4.1 Composição química da matéria-prima.

Nas tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados os resultados das análises da composição química realizadas nas matérias-primas tanto para cenoura como para abóbora, respectivamente. Todas as análises foram feitas em triplicatas.

Tabela 4.1 Composição química de cenoura (*Daucus carota*).

Constituintes	Conteúdo (%)
Umidade	90,45 ± 0,09
Proteína	0,55 ± 0,02
Lipídeos	0,28 ± 0,02
Açúcares totais	2,29 ± 0,06
Açúcares redutores	1,09 ± 0,08
Cinzas	0,52 ± 0,05
Sólidos totais	9,55 ± 0,04

O teor de umidade da cenoura e abóbora varia muito de região para região, dependendo das condições climáticas, época de colheita, entre outros fatores. Esta umidade de 90,45 % para cenoura é bastante satisfatório quando comparado com os valores da literatura. HOLLAND & UNWIN (1991) trabalharam a cenoura com umidade de 89,90 % e KIRANOUDIS *et al* (1993) descreveram a cenoura com 90,0 % de umidade em base úmida. A umidade 90,4 % está enquadrado dentro dos resultados encontrados por FRANCO (1992).

A umidade da abóbora encontrada de 90,40 está dentro dos valores reportados por PAWAR *et al* (1985) e por GOPALAN *et al* (1981). Porém a quantidade de cinzas esta um pouco abaixo aos encontrados por PAWAR *et al* (1985).

Tabela 4.2 - Composição química da abóbora (cucúrbita máxima)

Constituintes	Conteúdo (%)
Umidade	94,30 ± 0,10
Proteína	0,60 ± 0,04
Gordura	0,2 ± 0,02
Açúcares totais	3,02 ± 0,09
Açúcares redutores	1,81 ± 0,03
Cinzas	0,45 ± 0,01
Sólidos totais	5,70 ± 0,04

Todos os outros resultados da composição centesimal encontram-se dentro da faixa de resultados publicados por FRANCO (1992) para cenoura e abóbora e os reportados por PAWAR *et al* (1985) para abóbora.

4.2 Curvas de secagem.

Na secagem de alimentos com ar quente, varias pesquisas consideram a temperatura e velocidade do ar de secagem e a densidade de carga como o parâmetro de maior influência na cinética e a qualidade do produto final (PRADO, 1998; MULET *et al*, 1983). Entretanto, na secagem a vácuo de produtos vegetais como de frutas e hortaliças pode existir influência tanto da pressão como da

temperatura e também do tipo de matéria-prima utilizada (KOMPANY *et al*, 1990b; KROKIDA *et al*, 1997b; FERNANDO & THANGAVEL, 1987).

4.2.1 Efeito da temperatura e da pressão de secagem.

Para avaliar o efeito da temperatura e da pressão na cinética de secagem da cenoura e abóbora pré-tratadas por congelamento e branqueamento e “in natura”, foram construídos os gráficos das figuras 4.1 a 4.3 para cenoura e 4.4 a 4.6 para abóbora com os dados das Tabelas do Apêndice B.

4.2.1.1 Efeito da temperatura de secagem na cenoura e abóbora.

Nas figuras 4.1a 4.3 tem-se as curvas de secagem de amostras de cenoura pré-tratadas por congelamento e branqueamento e as “in natura” ou sem tratamento, obtidas à três níveis de temperatura (50, 60 e 70 °C), para diferentes pressões (5, 15 e 25 kPa). Tendo na abscissa o tempo de secagem expresso em horas na escala linear e na ordenada a logaritmo da umidade adimensional. Fixando-se a pressão e variando a temperatura (50, 60 e 70 °C) pode-se analisar as influências destas temperaturas nas curvas de secagem.

Através destas curvas de secagem pode-se observar que a maior parte do processo transcorre dentro do período de velocidade decrescente. Nota-se também que a temperatura de secagem exerce uma notada influência sobre a velocidade de secagem em cada tipo de amostra estudada, sendo o tempo de secagem é menor quando a temperatura aumenta. Assim como a temperatura, a pressão também exerce influências na cinética de cada tipo de amostra estudada. O aumento da temperatura causa uma diminuição do tempo de secagem em todos os casos. Este tempo diminui ainda mais quando diminui a pressão de secagem.

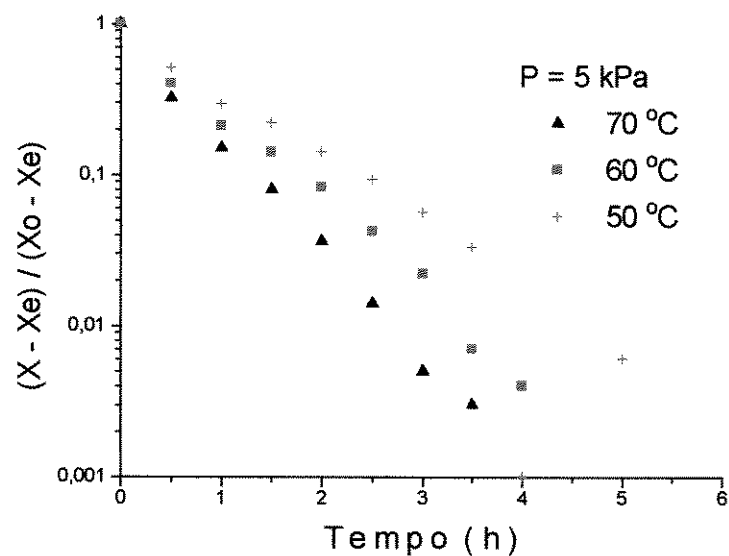


Figura 4.1. Umidade adimensional em função do tempo para secagem de cenoura congelada à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de 5 kPa.

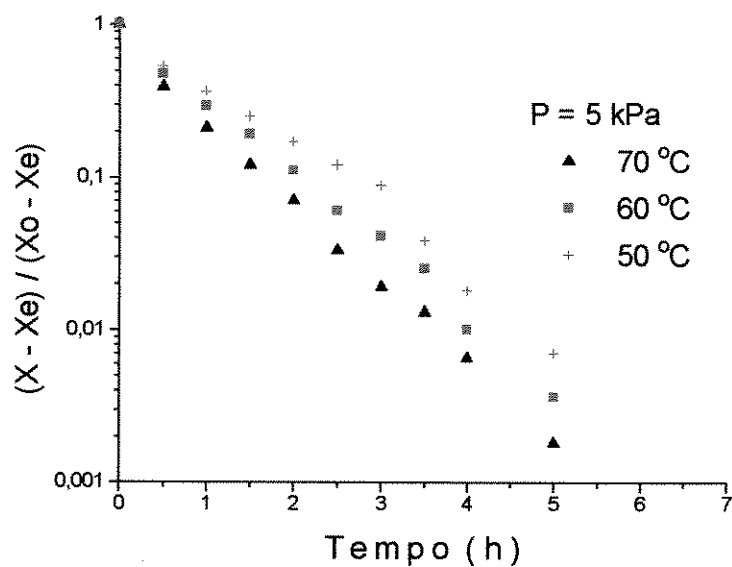


Figura 4.2. Umidade adimensional em função do tempo para secagem de cenoura branqueada à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de 5 kPa.

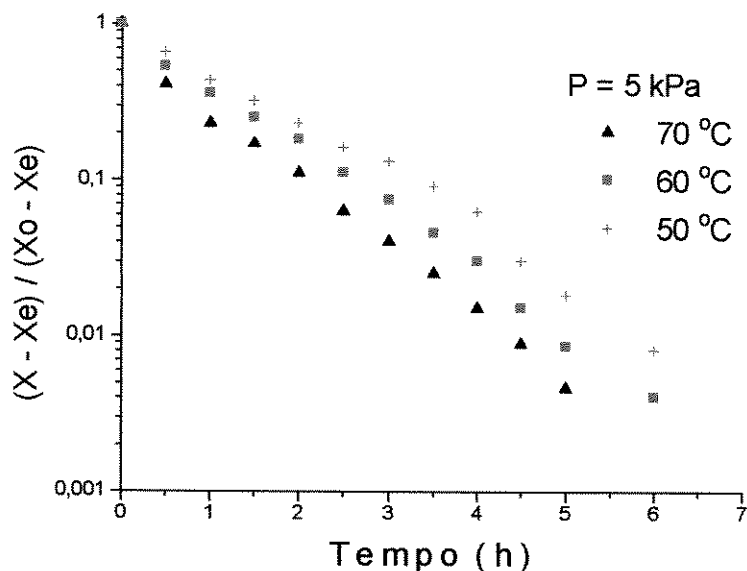


Figura 4.3. Umidade adimensional em função do tempo para secagem de cenoura “in natura” à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de 5 kPa.

Nas Figuras 4.4 a 4.6 tem-se as curvas de secagem de amostras de abóbora pré-tratadas por congelamento e branqueamento e “in natura” respectivamente a três níveis de temperatura (50, 60 e 70 °C), para diferentes pressões (5, 15 e 25 kPa), onde a abcissa corresponde ao tempo de secagem expresso em horas e a ordenada a umidade adimensional.

Das Figuras 4.4 a 4.6 observa-se, tal como ocorrido nas amostras de cenoura para um mesmo tempo de processo que quanto maior a temperatura de secagem maior a perda de umidade das amostras produto.

As amostras de abóbora congeladas secas à temperatura de 70 °C e pressão de 5 kPa apresentaram melhores resultados, conseguindo-se menor tempo e maior velocidade de secagem em relação a todas as outras curvas de secagem. Inclusive é ligeiramente maior que a velocidade apresentada pela

cenoura nestas mesmas condições. O tempo necessário para a secagem de abóbora congelada é de aproximadamente de 2 horas, enquanto que para cenoura são necessários um pouco mais de 2,5 horas. Segundo KOMPANY (1990a) o tipo de matéria-prima também pode influenciar positivamente na maior velocidade de secagem.

Estas Figuras também mostram que a secagem das amostras de abóbora se realiza a velocidade de taxa decrescente durante a maior parte da secagem. Dados que bem a concordam com os obtidos por VACCAREZZA *et al* (1974) para batata-doce e por MOWLAH *et al* (1983) para bananas. Provavelmente o mecanismo físico que governa o movimento de umidade através da estrutura da cenoura e abóbora, é a difusão (GOUVEIA, 1999; KOMPANY *et al*, 1993).

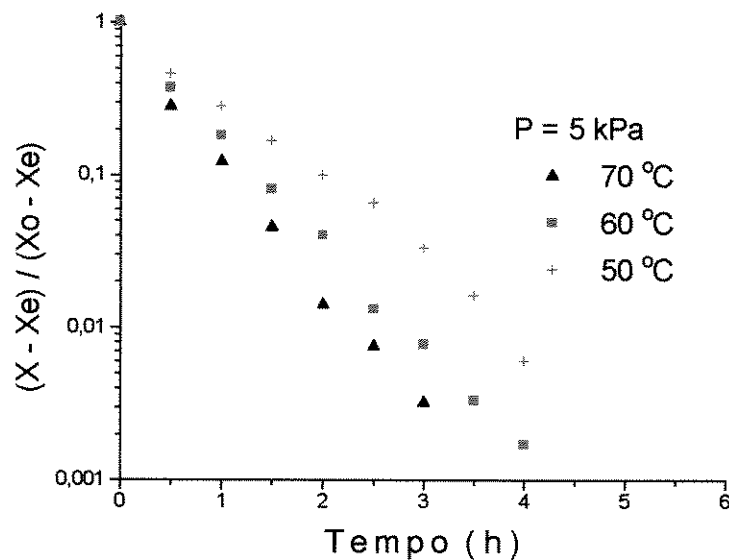


Figura 4.4 Umidade adimensional em função do tempo para secagem de abóbora congelada à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de 5 kPa.

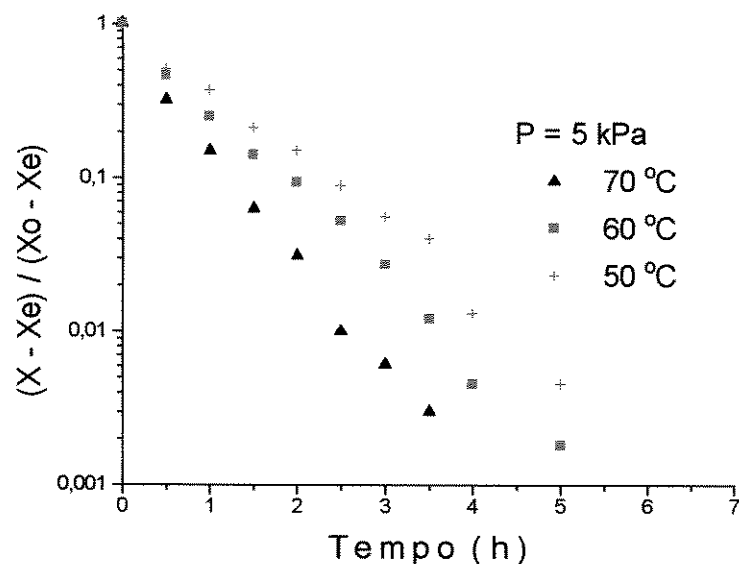


Figura 4.5. Umidade adimensional em função do tempo para secagem de abóbora branqueada à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de 5 kPa.

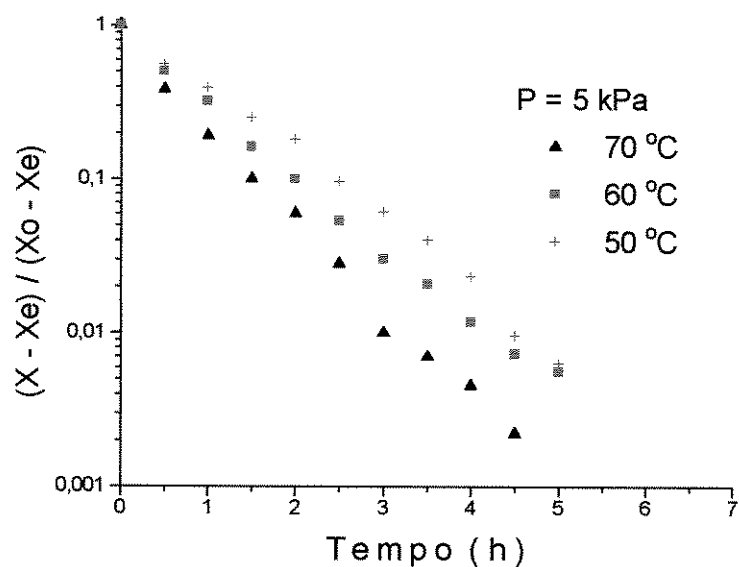


Figura 4.6. Umidade adimensional em função do tempo para secagem de abóbora "in natura" à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de 5 kPa.

4.3. Efeito dos Pré-tratamentos.

4.3.1 Efeito dos pré-tratamentos sobre a cenoura e abóbora

A Figura 4.7 e 4.8 mostram o efeito dos pré-tratamentos (congelamento e branqueamento) sobre a cinética de secagem da cenoura e abóbora respectivamente na pressão de 5, 15 e 25 kPa e temperatura de secagem de 60 °C. As demais temperaturas estão apresentadas nas Figuras do Apêndice C, e apresentam o mesmo comportamento.

Através das Figuras 4.7 e 4.8 pode-se observar que as amostras pré-tratadas por congelamento e branqueamento tanto na cenoura como na abóbora apresenta uma maior velocidade de secagem quando comparadas com as amostras “in natura”, nas mesmas condições de temperatura e pressão, embora amostras congeladas mostrem maior velocidade de secagem que as branqueadas.

Porém essa influência dos pré-tratamentos diminui à medida que pressão aumenta como nota-se nas Figuras quando a pressão é de 15 e 25 kPa, onde as três curvas estão muito próximas indicando que os efeitos dos pré-tratamentos tornam-se menos acentuados quando a pressão aumenta.

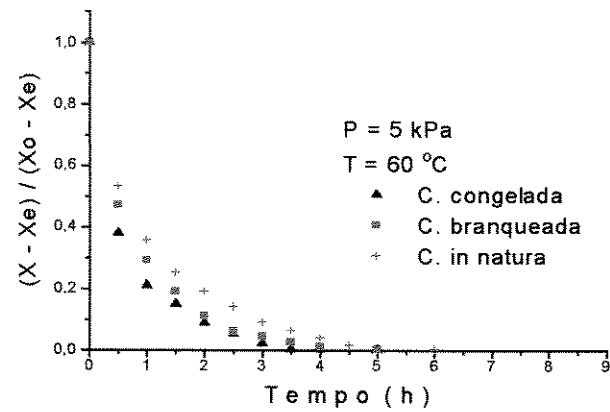
Quanto o tipo de matéria-prima o congelamento tem maior influência na velocidade de secagem nas amostras de abóbora que na cenoura para todos os casos estudados. O tempo de secagem da abóbora congelada na pressão de 5 kPa é de aproximadamente 2,5 horas enquanto para cenoura são necessários 3,5 horas.

Tanto na cenoura como na abóbora a maior velocidade de secagem foi observada nas amostras pré-tratadas por congelamento e secas a temperatura de 70 °C e pressão de 5 kPa. Um comportamento semelhante foi observado por MAZZA (1983) durante o estudo da secagem com ar quente de cenoura pré-

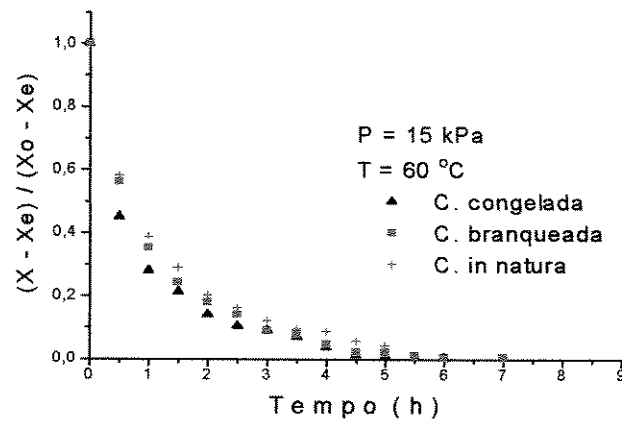
tratada por congelamento e por branqueamento. Porém este autor observou que existe uma maior influência do branqueamento, do que o congelamento, na velocidade de secagem e na qualidade do produto final.

Conforme DEBS-LOUKA (1996) e KOMPANY et al (1990) esta maior velocidade de secagem observada nas amostras pré-tratadas deve-se a que o congelamento e o branqueamento ajudam a modificar favoravelmente a estrutura inicial da matéria-prima de maneira a melhorar a transferência de umidade e a velocidade de secagem durante o processo.

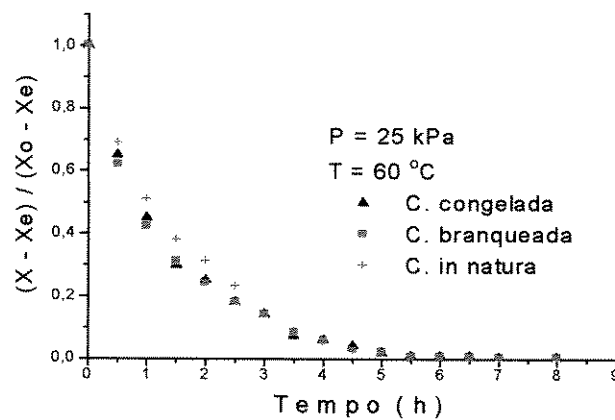
Conforme MAZZA (1983) o branqueamento é considerado como um tratamento que afeta a velocidade de secagem. Estes autores acreditam que os aspectos responsáveis pelo efeito do branqueamento são: mudanças nas propriedades físicas dos tecidos, assim como a destruição da membrana celular pelo aquecimento como mostram também o trabalho de HALPIN e LEE (1987) e a perda dos sólidos solúveis como mostram os trabalhos de VACAREZZA e CHIRIFE (1975) e SHAMS e THOMPSON (1987) afetando a velocidade de secagem.



(a)

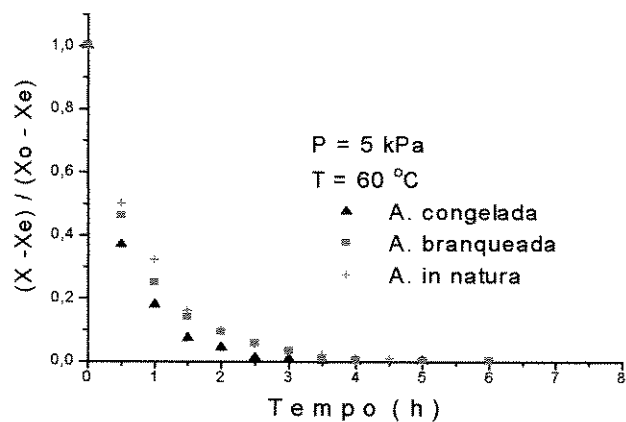


(b)

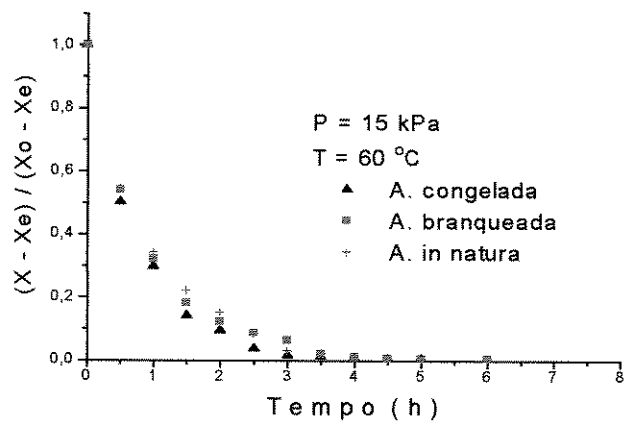


(c)

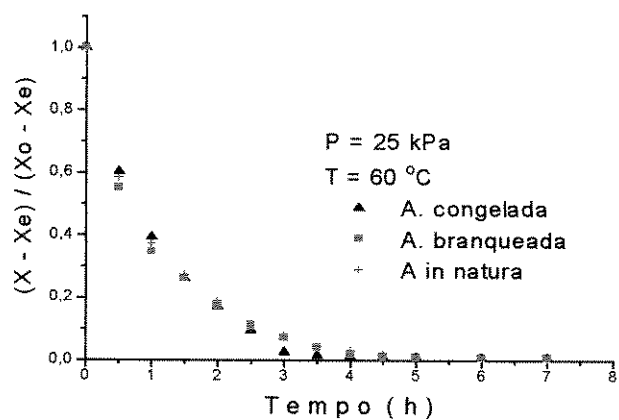
Figura 4.7 - Efeito dos pré-tratamentos sobre a cinética de secagem da cenoura a 60 °C nas pressões de: (a) 5 kPa, (b) 15 kPa e (c) 25 kPa.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8. Efeito dos pré-tratamentos sobre a cinética de secagem da abóbora a 60 °C e nas pressões de: (a) 5 kPa, (b) 15 kPa e (c) 25 kPa.

4.4 Modelo Difusional.

Os valores da difusividade efetiva do modelo difusional, sem considerar o encolhimento, na forma da segunda lei de Fick , baseados na equação 2,8, foram calculados através do ajuste não linear aos dados experimentais obtidos, utilizando geometria de placa plana infinita. Os valores foram calculados através do ajuste não linear com o auxílio do software Statistica 5.0.

4.4.1 Modelo difusional para amostras de cenoura.

Para analisar o ajuste do modelo difusivo aos dados experimentais foram construídos os gráficos $[(X-X_e)/(X_o-X_e)]$ em função do tempo de secagem, em escalas monolog e linear.

Através das Figuras 4.9, 4,10 e 4.11 pode-se observar que o modelo difusivo apresentou um bom ajuste aos valores experimentais para as amostras de cenoura congelada, branqueada e “in natura” respectivamente. Sendo os melhores ajustes a temperatura de 60 e 70 °C. Os valores de difusividade efetiva encontrados estão apresentados nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5. Nota-se que a equação de difusão se ajustou bem aos dados experimentais de secagem como mostram os valores de R^2 e erros relativos.

Através destas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5, pode-se observar também, que os valores da difusividade efetiva nos indicam que a temperatura e pressão influenciam na cinética de secagem do produto. Temperaturas mais elevadas e menores pressões apresentam maiores valores de difusividade. Percebe-se que o valor da difusividade foi afetado pelo tipo de pré-tratamento aplicado na matéria-prima. Encontrando-se maiores valores para cenoura congelada, seguida em forma decrescente da cenoura branqueada e da “in natura”. Isto nos indica que os pré-tratamentos como o congelamento e o branqueamento favorecem o processo de transferência de massa.

Os valores de difusividade mostrada nas Tabelas mencionadas variam de 4,844 a $1,654 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura congelada; de 3,536 a $1,273 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura branqueada e de 2,740 a $1,469 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura “in natura”. Pode-se notar que os maiores valores foram de $4,844 \times 10^{-9}$, $3,536 \times 10^{-9}$ e $2,74 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura congelada, branqueada e “in natura” respectivamente foram encontrados na temperatura de 70 °C e pressão de 5 kPa.

Estes valores encontrados são satisfatórios quando comparados com os dados da literatura. Assim como os reportados por MULET *et al* (1989), MULET *et al* (1987) e MULET *et al* (1983) que encontrou valores difusividade efetiva entre $0,8$ a $9,25 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, estudando a secagem de cenoura a temperatura entre 30 a 70 °C e KIRANOUDIS *et al* (1995) encontrou valores entre 1,5 e $4,5 \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura trabalhando a temperaturas entre 60 a 100 °C.

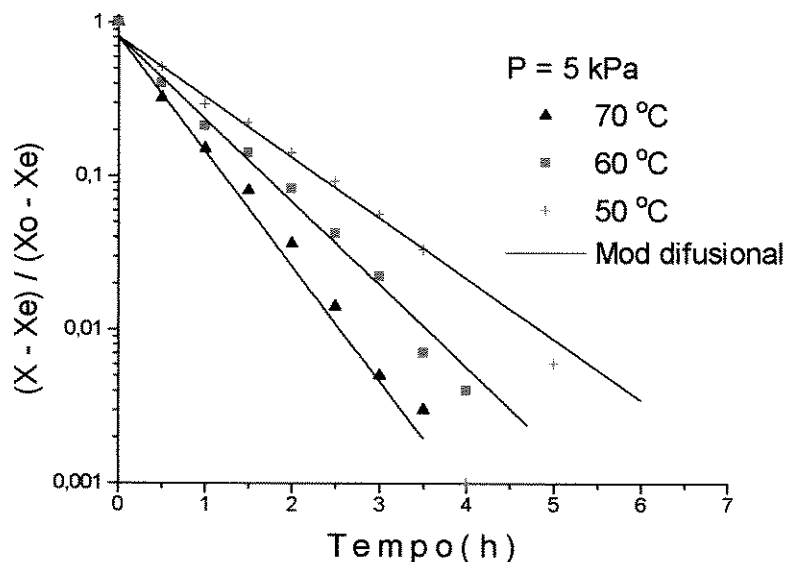


Figura 4.9 - Curvas de secagem de cenoura congelada ajustadas pelo modelo difusional à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de 5 kPa.

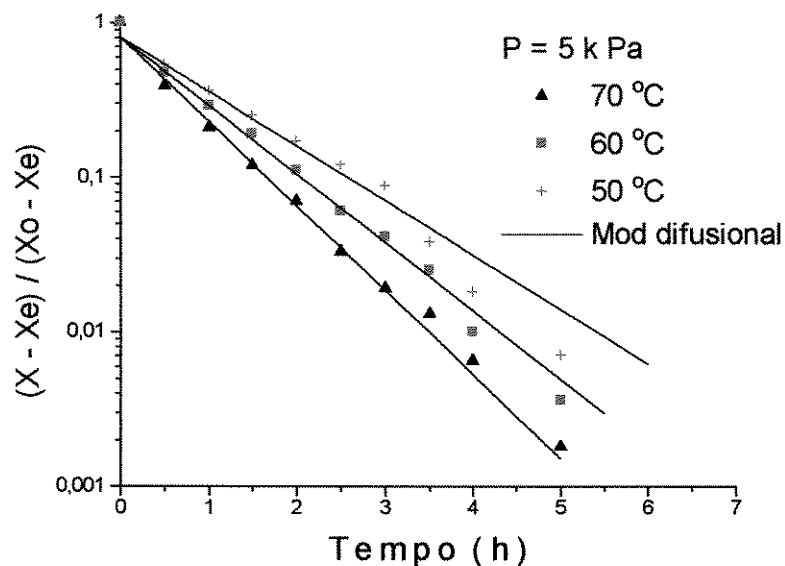


Figura 4.10 - Curvas de secagem de cenoura branqueada ajustadas pelo modelo difusional à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de 5 kPa.

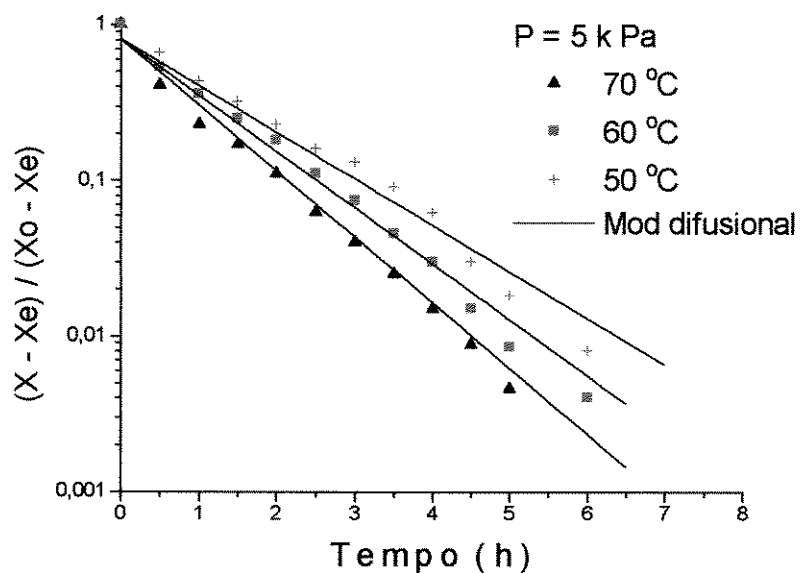


Figura 4.11 - Curvas de secagem de cenoura "in natura" ajustadas pelo modelo difusional à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de 5 kPa.

Tabela 4.3 - Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional de cenoura congelada nas diferentes condições de secagem.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	D_{ef} 10^{-9} (m ² /s)	R^2	Er (%)
5	70	4,844	0,98	1,57
	60	3,486	0,98	1,70
	50	2,533	0,95	2,53
15	70	3,608	0,96	1,68
	60	2,700	0,95	1,82
	50	2,174	0,95	2,41
25	70	2,165	0,97	1,60
	60	1,930	0,95	2,03
	50	1,654	0,95	2,63

Tabela 4.4 - Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional de cenoura branqueada nas diferentes condições de secagem.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	D_{ef} 10^{-9} (m ² /s)	R^2	Er (%)
5	70	3,536	0,98	1,63
	60	2,868	0,997	1,81
	50	2,286	0,95	2,84
15	70	2,632	0,96	2,05
	60	2,203	0,97	1,94
	50	1,941	0,95	1,99
25	70	2,337	0,97	1,92
	60	1,663	0,97	2,13
	50	1,273	0,95	3,01

Tabela 4.5 - valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional de cenoura "in natura" nas diferentes condições de secagem.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	D_{ef} 10^{-9} (m ² /s)	R^2	Er (%)
5	70	2,740	0,98	1,65
	60	2,335	0,98	1,73
	50	1,938	0,95	2,66
15	70	2,256	0,96	1,85
	60	1,844	0,96	1,84
	50	1,469	0,96	2,66
25	70	2,022	0,96	1,92
	60	1,544	0,96	2,01
	50	1,474	0,95	3,17

4.4.2 Modelo difusional para amostras de abóbora.

O ajuste do modelo difusional aos dados experimentais de abóbora congelada, branqueada e "in natura" são mostrados nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14. Da mesma forma como observado para cenoura, aqui também, o ajuste do modelo aos dados experimentais é sempre melhor para valores de alta temperatura e menores pressões de secagem tanto para abóbora congelada, branqueada e "in natura".

Nas Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 são apresentados os valores obtidos para a difusividade efetiva para as amostras de abóbora congelada, branqueada e "in natura" respectivamente, calculadas por ajuste não linear das curvas de secagem ao modelo de difusão sem considerar o encolhimento da amostra. Tal como observado nas amostras de cenoura, aqui também, a equação de difusão mostra

um bom ajuste aos dados experimentais de secagem, pois tem-se altos valores do coeficiente de correlação R^2 e os baixos valores do erro relativo.

Através destas Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8, observa-se que os valores da difusividade efetiva nos indicam que a temperatura e pressão também influenciam na cinética de secagem da abóbora. Percebe-se que o valor da difusividade foi afetado pela temperatura e pressão de secagem e pelo tipo de pré-tratamento aplicado na matéria-prima. Os maiores valores foram encontrados para amostras de abóbora congelada, seguida em forma decrescente da abóbora branqueada e da “in natura”. Isto nos indica que além da temperatura e pressão, os pré-tratamentos como o congelamento e o branqueamento favorecem o processo de transferência de massa e, conseqüentemente o aumento da difusividade.

Porém, na secagem da abóbora os valores encontrados da difusividade são sempre maiores que na secagem de cenoura se comparados nas mesmas condições de processo. Assim, o valor encontrado para cenoura congelada a 70 °C e 5 kPa é de $4,844 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ enquanto que para abóbora nestas mesmas condições é de $5,70 \text{ m}^2/\text{s}$.

Os valores de difusividade efetiva calculados estão na faixa de $5,70$ a $2,011 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para abóbora congelada, de $4,941$ a $2,033 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para abóbora branqueada e de $4,036$ a $2,080 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para abóbora “in natura”.

Pode-se verificar que os valores da difusividade são da ordem de $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ e estão dentro da faixa reportada na literatura para secagem de diferentes tipos de vegetais. Não foi encontrado na literatura trabalho relacionado com a difusividade efetiva durante a secagem de abóbora. Para a batata KIRANOUDIS *et al* (1995) encontrou valores $1,0$ a $5,3 \text{ m}^2/\text{s}$ para temperaturas entre 60 a 100 °C e ALZAMORA (1979), o valor de $1,4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ na temperatura de 65 °C . Para a maçã LUYBEN *et al* (1980) encontro difusividades de $0,31$ a $2,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ a temperaturas entre 30 a 60 °C e ROTSTEIN *et al* (1974) de $3,6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ a 70 °C .

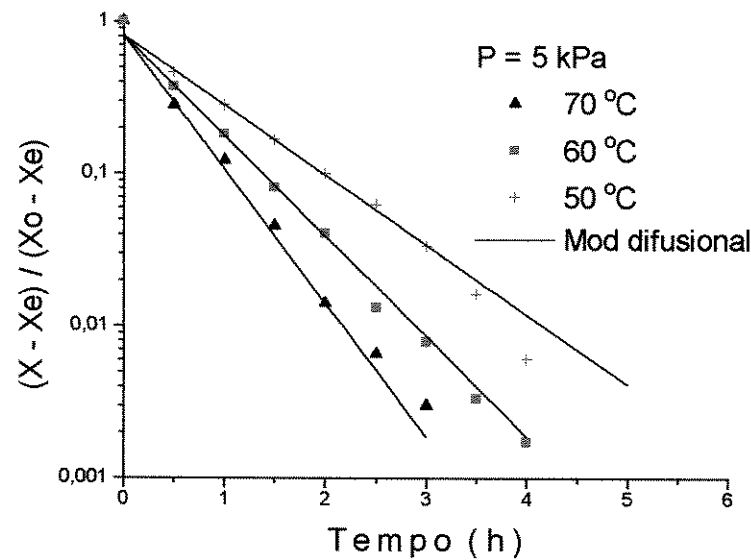


Figura 4.12 - Curvas de secagem de abóbora congelada ajustadas pelo modelo difusional à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de 5 kPa.

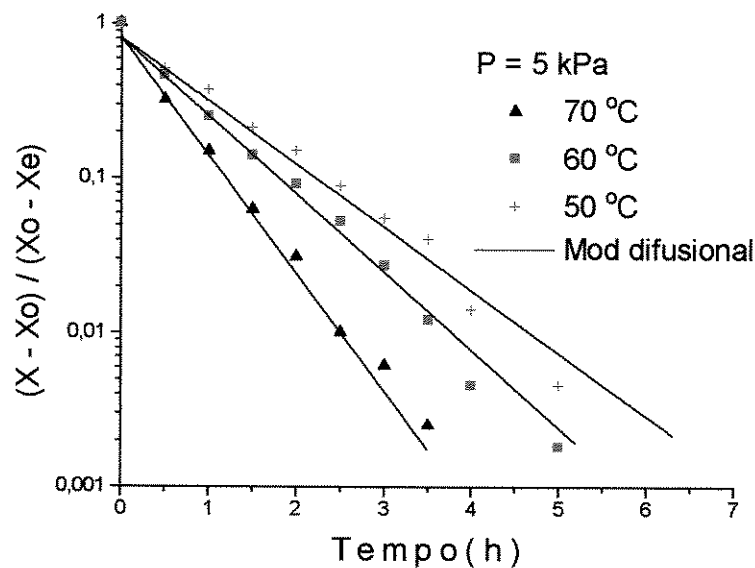


Figura 4.13 - Curvas de secagem de abóbora branqueada ajustadas pelo modelo difusional à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de 5 kPa.

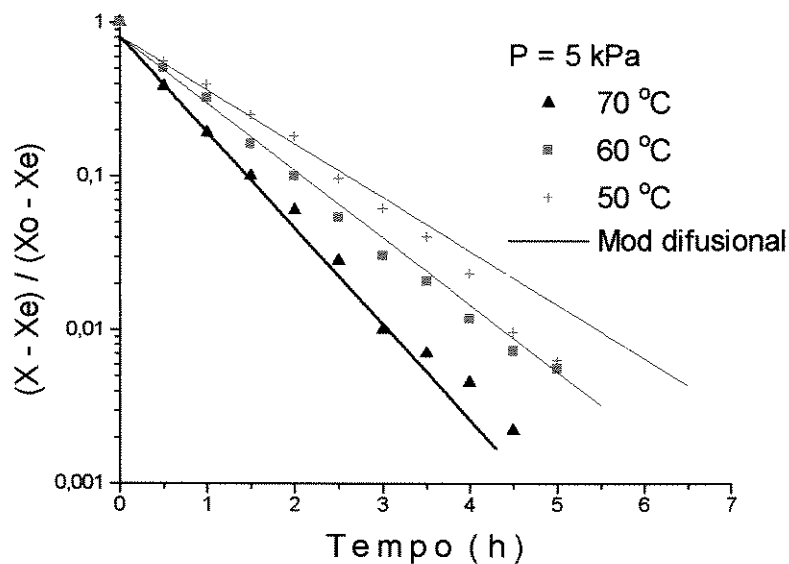


Figura 4.14 - Curvas de secagem de abóbora "in natura" ajustadas pelo modelo difusional à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de 5 kPa.

Tabela 4.6 - Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional de abóbora congelada nas diferentes condições de secagem.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	D_{ef} 10^{-9} (m ² /s)	R^2	Er (%)
5	70	5,700	0,97	1,49
	60	4,269	0,98	1,82
	50	2,977	0,96	2,81
15	70	3,525	0,97	1,90
	60	2,911	0,97	2,20
	50	2,410	0,95	3,09
25	70	3,030	0,97	1,91
	60	2,330	0,96	2,83
	50	2,011	0,96	2,97

Tabela 4.7. Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional de abóbora branqueada nas diferentes condições de secagem.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	D_{ef} 10^{-9} (m ² /s)	R^2	Er (%)
5	70	4,941	0,98	1,66
	60	3,272	0,98	1,82
	50	2,648	0,96	2,77
15	70	3,220	0,98	1,55
	60	2,811	0,97	1,79
	50	2,314	0,96	1,67
25	70	2,786	0,97	1,72
	60	2,250	0,96	1,81
	50	2,033	0,95	2,82

Tabela 4.8 - Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional de abóbora “in natura” nas diferentes condições de secagem.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	D_{ef} 10^{-9} (m ² /s)	R^2	Er (%)
5	70	4,036	0,98	1,79
	60	2,827	0,98	1,67
	50	2,263	0,96	2,85
15	70	3,125	0,97	1,86
	60	2,522	0,97	1,79
	50	2,33	0,95	1,94
25	70	2,833	0,97	1,55
	60	2,169	0,96	1,81
	50	2,080	0,96	1,76

4.5 Planejamento experimental do processo de secagem.

Como foi mencionado anteriormente foram utilizados os dois tipos de amostras, cenoura e abóbora, para avaliar o efeito da temperatura e pressão sobre a difusividade efetiva D_{ef} sem considerar o encolhimento. Para estudar os efeitos das variáveis envolvidas no processo de secagem foi realizado um planejamento fatorial completo. Para uma melhor compreensão dos efeitos a discussão dos resultados foi feita de forma individual para cada tipo de amostra: cenoura e abóbora.

4.5.1 Planejamento experimental para secagem de cenoura.

Os resultados experimentais para as amostras de cenoura pré-tratadas por congelamento e branqueamento e as “in natura” para a variável dependente, difusividade efetiva D_{ef} , são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Variáveis reais e valores da difusividade efetiva (D_{ef}) calculados para cenoura congelada, branqueada e “in natura”.

Ensaio	Variáveis independentes		Respostas $D_{ef} \times 10^{-9} \text{ (m}^2/\text{s)}$		
	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	Cenoura congelada	Cenoura branqueada	Cenoura “in natura”
1	50	5	2,533	2,286	1,938
2	60	5	3,486	2,869	2,335
3	70	5	4,844	3,536	2,740
4	50	15	2,174	1,941	1,469
5	60	15	2,700	2,203	1,844
6	70	15	3,608	2,632	2,256
7	50	25	1,654	1,273	1,474
8	60	25	1,930	1,663	1,544
9	70	25	2,165	2,337	2,022

Tabela 4.10 - Parâmetros do modelo estatístico da difusividade efetiva, os efeitos principais, erro padrão e p para a secagem de cenoura congelada.

Parâmetros do modelo	Valor	Efeitos	Erro padrão	p
C ₁	0,256	2,790	0,028	0,000002
Linear				
C ₂	-0,0158	1,412	0,0706	0,000274
C ₃	0,1980	-1,711	0,0706	0,000154
Quadrático				
C ₄	0,00127	-0,127	0,0611	0,01280
C ₅	-0,00055	0,055	0,0611	0,43200
Interações				
C ₆	-0,00445	-0,890	0,101	0,00196

Tabela 4.11 - Parâmetros do modelo estatístico da difusividade efetiva, os efeitos principais, erro padrão e p para a secagem de cenoura branqueada

Parâmetros do modelo	Valor	Efeitos	Erro padrão	p
C ₁	2,994	2,304	0,0529	0,000027
Linear				
C ₂	-0,496	1,001	0,1294	0,00451
C ₃	-0,496	-1,139	0,1294	0,00310
Quadrático				
C ₄	0,00089	0,0891	0,1123	0,0485
C ₅	0,00089	-0,0686	0,1123	0,5840
Interações				
C ₆	-0,00465	-0,093	0,1500	0,599

Tabela 4.12 - Parâmetros do modelo estatístico da difusividade efetiva, os efeitos principais, erro padrão e p para a secagem de cenoura “in natura”.

Parâmetros do modelo	Valor	Efeitos	Erro padrão	p
C_1	1,926	2,0001	0,031	0,000006
Lineares				
C_2	-0,058	1,244	0,076	0,001850
C_3	0,007	-0,720	0,076	0,00230
Quadráticos				
C_4	0,0011	-0,118	0,066	0,28940
C_5	0,0014	-0,142	0,066	0,05010
Interações				
C_6	-0,0014	-0,287	0,094	0,0224

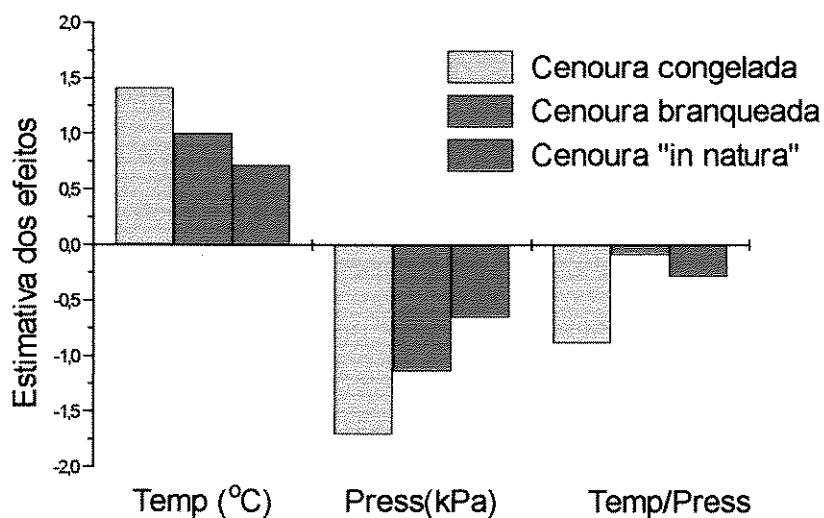


Figura 4.15 - Estimativa dos efeitos para a difusividade D_{ef} da secagem de cenoura pré-tratadas por congelamento e branqueamento e “in natura”.

Para avaliar estatisticamente a influência de cada variável temperatura e pressão na difusividade efetiva, as Tabelas 4.10 a 4.12 mostram os efeitos principais de cada variável, de interações entre elas, os erros padrões e os coeficientes p associados aos mesmos a um nível de 95% de confiança.

A Figura 4.15 mostra a magnitude dos efeitos para a difusividade efetiva, D_{ef} , durante a secagem das amostras de cenoura pré-tratadas por congelamento e branqueamento e as “in natura”. Os efeitos foram calculados através do software Statistica 5.0. Para o cálculo de todos os parâmetros foi utilizado um modelo estatístico de 2ª ordem para a resposta ou difusividade efetiva D_{ef} , conforme a equação (4.1), utilizando as variáveis de temperatura (T) e de pressão (P) na forma codificada (-1, 0, +1):

$$D_{ef} = C_1 + C_2T + C_3P + C_4T^2 + C_5P^2 + C_6TP \quad (4.1)$$

A interpretação dos resultados foram realizados em base na magnitude e sinais dos efeitos. Quanto maior o valor do efeito, maior será a influência deste sobre resposta em estudo. O sinal indica a proporcionalidade com que varia o efeito em relação à resposta. Um sinal positivo indica que a relação existente entre a variável independente e a resposta é de direta proporcionalidade, ou seja, a passagem de um nível inferior para um superior da variável independente acarreta um aumento no valor da resposta. Para um sinal negativo, a relação é de inversa proporcionalidade.

O valor do coeficiente p (ou probabilidade) está relacionado ao nível de significância da variável independente sobre a resposta em estudo. Normalmente é escolhido como intervalo de confiança o valor de 95 %. Sendo assim, pode-se afirmar que para valores de p inferiores à 5% ($p = 0,05$), a variável é considerada estatisticamente significativa, caso contrário, é considerada não significativa.

Pela análise do valor de p das Tabelas 4.10 a 4.12 observa-se que a resposta difusividade efetiva D_{ef} , foi influenciado significativamente pelos efeitos lineares, C_2 e C_3 , da temperatura e pressão respectivamente para todas as amostras pré-tratadas por congelamento e branqueamento e “in natura”. O efeito C_5 foi significativo, apenas, para cenoura “in natura” e o C_4 para as amostras congelada e branqueada. Porém, o efeito C_6 , de interações entre a temperatura versus pressão de secagem foram significativos apenas para as amostras de cenoura “in natura” e as pré-tratadas por congelamento.

Ao observar a magnitude dos efeitos sobre a secagem da cenoura congelada na Tabela 4.10 e figura 4.15 percebe-se que a pressão exerceu maior influência que a temperatura sobre a resposta D_{ef} ; o aumento da pressão provoca uma diminuição da difusividade. Este fato também foi observado por KOMPANY et al, (1990a), durante a secagem de diferentes tipos de vegetais, enquanto que o aumento da temperatura provocou aumento da difusividade efetiva. Isto foi o esperado, pois à medida que se diminui a pressão e aumenta a temperatura existe aumento da difusividade, portanto haverá uma maior velocidade de secagem.

Dos efeitos exercidos sobre a secagem de cenoura branqueada descritas na Tabela 4.11 e Figura 4.15 observou-se que tanto a temperatura como a pressão tiveram quase as mesmas magnitudes. Isto nos sugere que o aumento da temperatura e diminuição da pressão na mesma proporção tem efeitos semelhantes sobre a resposta.

Para cenoura “in natura” a magnitude dos efeitos mostrados na Tabela 4.12 e Figura 4.15 nota-se que ao contrário do que aconteceu na cenoura congelada, a temperatura teve maior influência sobre a resposta. Portanto, aumentando-se a temperatura observa-se aumento da difusividade, acontecendo o contrário com a pressão. Porém, o aumento da temperatura e a diminuição da pressão causam pouca influência no aumento da difusividade efetiva.

A partir dos valores dos parâmetros apresentados nas Tabelas 4.10 a 4.12 é possível obter os modelos empíricos (equações 4.2 a 4.4), que relacionam a difusividade efetiva D_{ef} com as variáveis estudadas, as tabelas de análise de variância e os gráficos tridimensionais de superfície de resposta, que permitem estudar as interações entre as variáveis e auxiliam na escolha da melhor condição de operação no processo de secagem. Neles foram considerados apenas os coeficientes estatisticamente significativos.

- Para cenoura congelada:

$$D_{ef} = 0,2560 - 0,0158T + 0,198P + 0,00127T^2 - 0,89TP \quad (4.2)$$

- Para cenoura branqueada:

$$D_{ef} = 2,9947 - 0,499T - 0,496P + 0,00089 T^2 - 0,0046TP \quad (4.3)$$

- Para cenoura "in natura":

$$D_{ef} = 2,6518 - 0,0454T - 0,0405P + 0,001525P^2 - 0,000635 TP \quad (4.4)$$

Por outro lado, a validade dos modelos da difusividade (D_{ef}) para os três tipos de amostras as congelada, branqueada e "in natura", foi verificada através da Análise de Variância (ANOVA), apresentada respectivamente nas Tabelas 4.13 a 4.15, calculados a um nível de 95 % de confiança.

O procedimento para verificar a validade dos modelos tem como princípio básico os critérios estatísticos de coeficiente de correlação, R^2 e o teste F. O coeficiente de correlação é um parâmetro estatístico que compara a variância dos valores das respostas previstas pelo modelo proposto com a variância da própria população dos pontos experimentais. Quanto mais próximo de 1 (um) estiver o valor do coeficiente de correlação entre os valores previstos e os experimentais, melhor será o ajuste do modelo aos dados experimentais (BOX *et al*, 1978).

O teste F de significância é usualmente utilizado para verificar se o modelo explica uma quantidade significativa da variação dos dados experimentais, comparando-se o valor estimado para F a partir dos resultados experimentais com o valor tabelado para uma distribuição de referência $F_{\text{confiança}, P-1, N-1}$. O fundamento do teste F consiste em verificar se existe ou não relação entre as variáveis e a resposta. Segundo BARROS NETO *et al* (1995) quando não há uma relação entre a resposta e a variável, pode-se demonstrar que a razão entre as médias da regressão e dos resíduos, MQ_R/MQ_r , segue uma distribuição denominada pelos autores de hipótese nula.

A hipótese nula pode ser testada comparando o valor efetivamente calculado para MQ_R/MQ_r (F calculado) com o valor de F tabelado. Se a razão MQ_R/MQ_r for maior que o F tabelado, então a hipótese nula é rejeitada a um nível de significância e pode-se afirmar que a quantidade de variação devido ao modelo é significativamente maior que a variação não explicada e o modelo é considerado válido (BARROS NETO *et al*, 1995).

Através das tabelas 4.13 a 4.15 observa-se o valor tabelado de F para todos os modelos da difusividade efetiva ao nível de 95 % de confiança foi de 9,01, bem abaixo dos valores calculados de F que foram de 232,57 para cenoura congelada, 27,61 para cenoura branqueada e 42,85 para cenoura “in natura”, o que demonstra que a quantidade de variações devido aos modelos são maiores que as variações não explicadas e os modelos são considerados válidos (RODRIGUES, 2001). Desta forma, é possível dizer que os modelos ajustados explicam 99,74, 97,87 e 98,61 % das variações das respostas encontradas respectivamente e são estatisticamente significativos.

No entanto, uma regressão, embora significativa do ponto de vista do teste F, pode não ser preditiva, por cobrir uma faixa de variação pequena dos fatores estudados. Para que isto não ocorra, isto é, para que uma regressão não seja apenas estatisticamente significativa mas também útil para fins preditivos, sugere-se (BOX e WETZ, 1973, citado por BARROS NETO *et al*, 1995), que o valor de F

calculado seja no mínimo de quatro a cinco vezes o valor do F tabelado. Essa condição é amplamente satisfeita no caso para todos os modelos, onde o valor de F calculado é 25,81 vezes maior que o valor do F tabelado para cenoura congelada e 4,75 maior para cenoura “in natura”, o que indica que os modelos além de ser significativos são preditivos no intervalo de confiança de 95 %, como mostram as Tabelas 4.13 a 4.15.

Com relação ao modelo para cenoura branqueada observa-se na Tabela 4.14, que o valor do F calculado para o mesmo é 3,10 vezes maior que o valor de F tabelado, o que indica que o modelo não satisfaz a condição estabelecida por BOX e WETZ (1973), no sentido de que o valor de F calculado deva ser de quatro a cinco vezes maior que o F tabelado, para o modelo ser considerado preditivo.

No entanto cabe ressaltar que devido a complexidade do processo e com base no coeficiente de correlação, que neste caso foi 97,87, um valor altamente aceitável dentro dos padrões de Engenharia, conduziu a aceita-o como modelo preditivo.

Tabela 4.13 - Análise de Variância para o modelo de 2ª ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), para secagem de cenoura congelada.

Fonte de Variação	SQ	MQ	GL	F _{calculado}	F _{tabelado}
Regressão	8,225	1,645	5	232,57	9,01
Resíduo	0,0212	0,0071	3	--	--
Total	8,2468	--	8	--	--
% variação explicada (R^2)	99,77	--	--	--	--

Tabela 4.14 - Análise de Variância para o modelo de 2ª ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), para secagem de cenoura branqueada.

Fonte de Variação	SQ	MQ	GL	F _{calculado}	F _{tabelado}
Regressão	4,4141	0,8828	5	30,09	9,01
Resíduo	0,0880	0,0293	3	--	--
Total	4,5021	--	8		--
% variação explicada (R^2)	98,04	--	--	--	--

Tabela 4.15 - Análise de Variância para o modelo de 2ª ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), para secagem de cenoura “in natura”.

Fonte de Variação	SQ	MQ	GL	F _{calculado}	F _{tabelado}
Regressão	3,2426	0,6495	5	73,54	9,01
Resíduo	0,0265	0,0088	3	--	--
Total	3,2741	--	8	--	--
% variação explicada (R^2)	99,19	--		--	--

As Figuras 4.16 a 4,18 mostram os valores observados experimentalmente em função dos valores preditos pelo uso dos modelos estatísticos para a difusividade efetiva D_{ef} para cenoura congelada, branqueada e “in natura”. Nelas observa-se que os modelos têm boa concordância e podem representar bem o comportamento da resposta frente à variação das variáveis na faixa estudada.

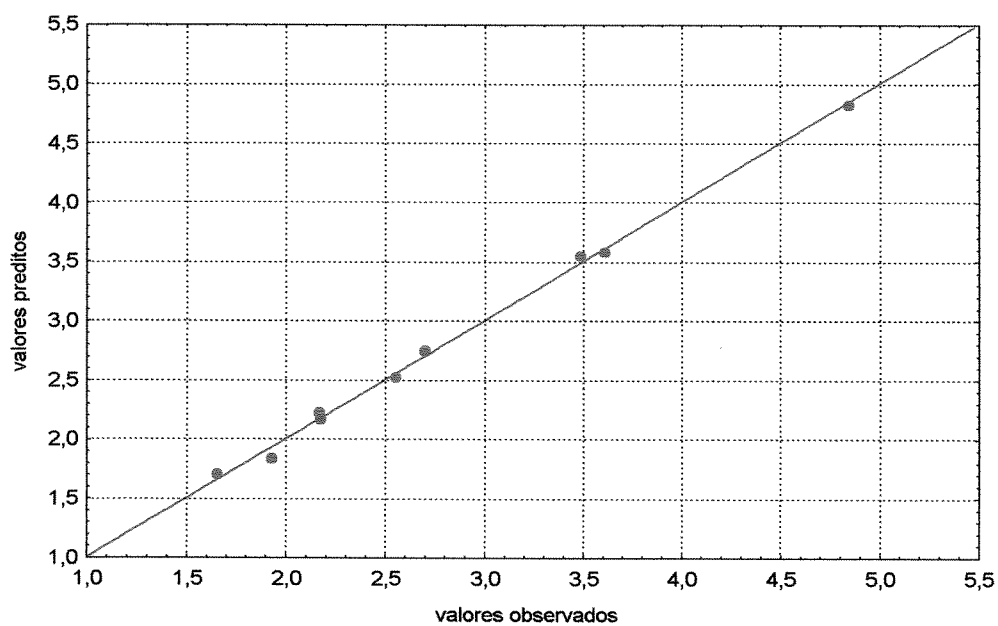


Figura 4.16 - Comparação entre (_) valores preditos vs (•) Valores experimentais para cenoura congelada.

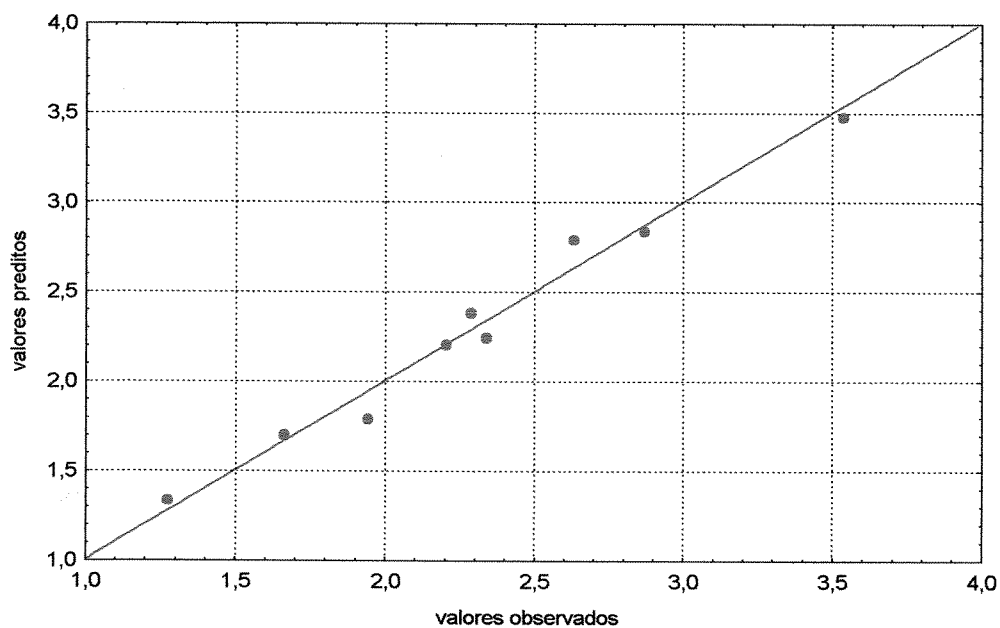


Figura 4.17 - Comparação entre (_) valores preditos vs (•) Valores observados experimentais para cenoura branqueada.

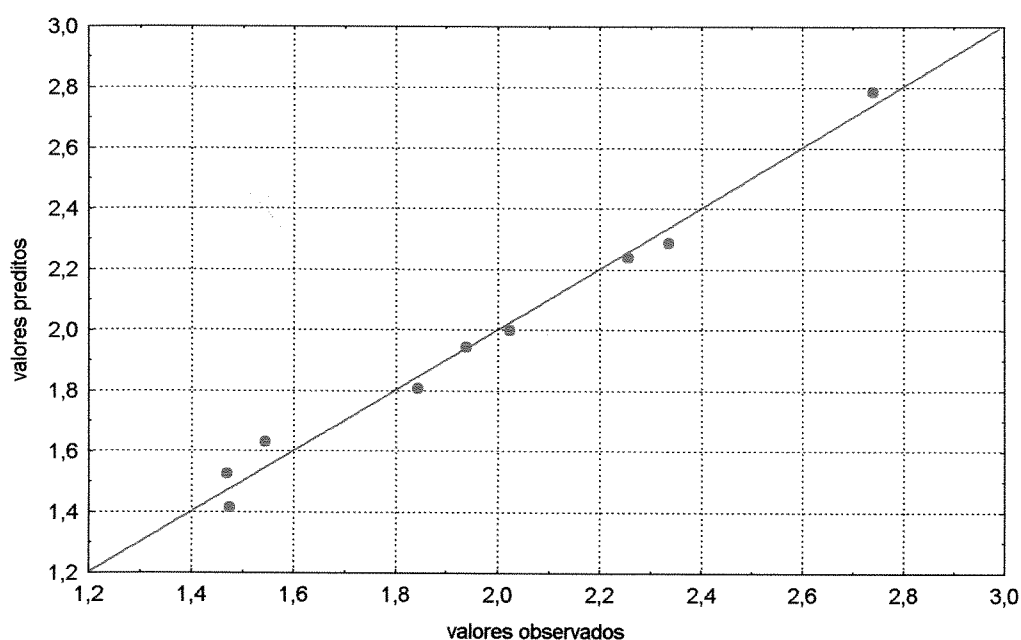


Figura 4.18 - Comparação entre (_) Valores preditos vs (•) Valores observados experimentais para cenoura “in natura” .

Para efetuar uma análise mais detalhada do comportamento de cada variável construiu-se com auxílio do *software Statistica 5.0*, gráficos tridimensionais de superfície de resposta e curvas de nível para todas as combinações possíveis de variáveis.

As figuras 4.19 a 4.21 descrevem a variação da resposta D_{ef} em função da pressão e temperatura, para cenoura congelada, branqueada e “in natura”, respectivamente. Pela Figura 4.19^a observa-se que a difusividade é influenciada com maior magnitude pelo efeito da pressão, existe uma tendência de aumento da difusividade para altos valores de temperatura e baixos valores de pressão. Entretanto na Figura 4.19b pode-se notar que a difusividade foi favorecida positivamente, quando se trabalha com valores de pressão menores que 15 kPa e temperatura maiores que 60 °C. Porém, observa-se que existe um maior efeito positivo destas variáveis sobre a resposta, quando se trabalha entre 5 kPa e 70 °C.

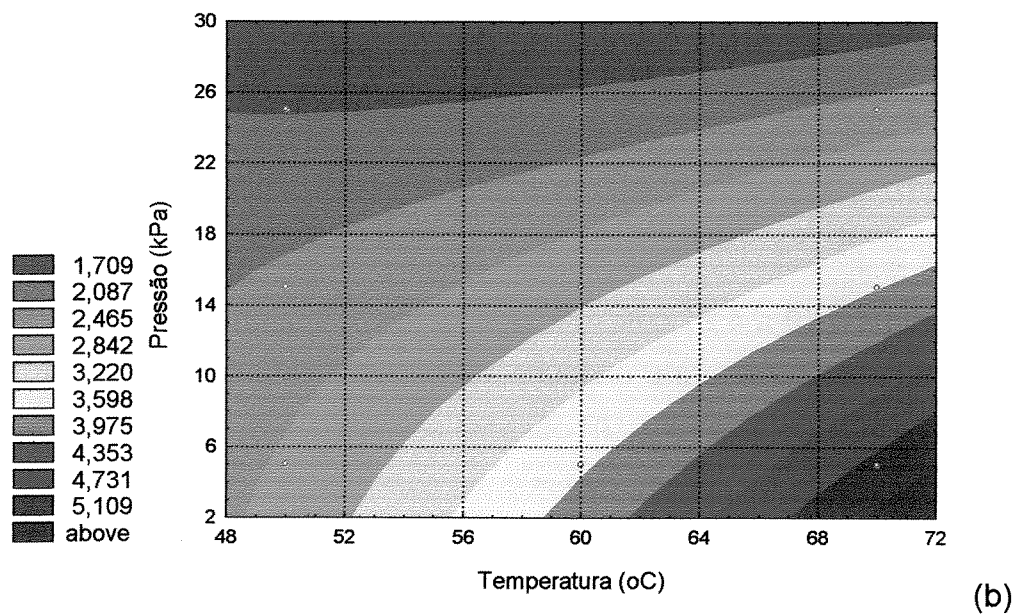
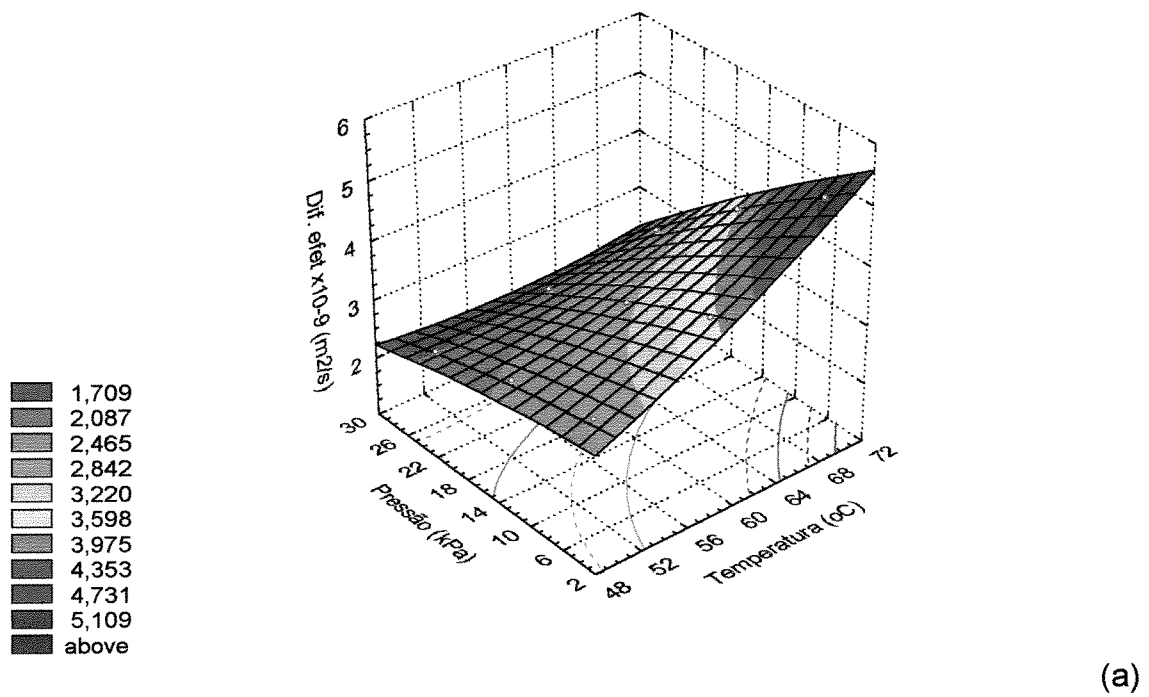


Figura 4.19 - Superfície de resposta (a) e Curvas de nível (b) para $D_{ef}(\text{m}^2/\text{s})$ em função da pressão e temperatura de secagem para cenoura congelada.

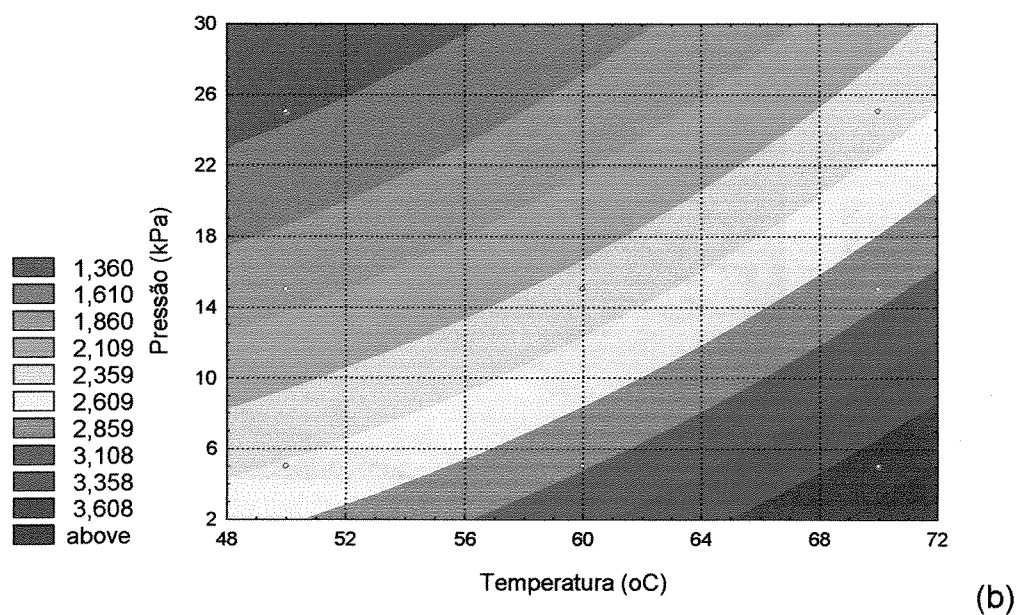
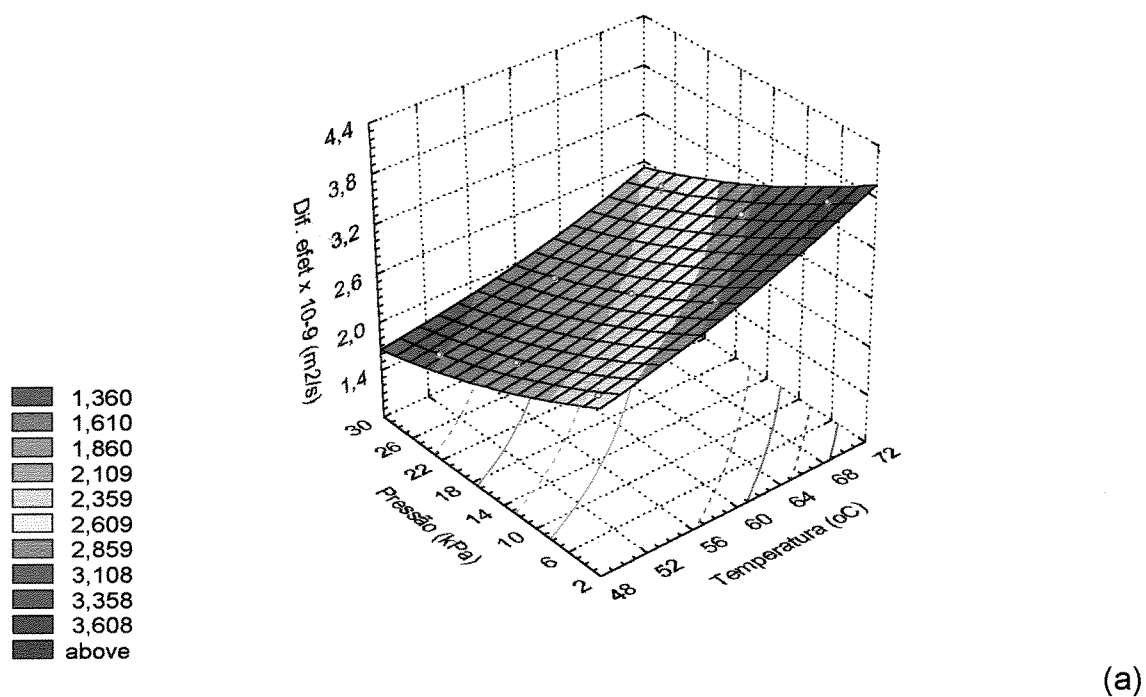


Figura 4.20 - Superfície de resposta (a) e Curvas de nível (b) para $D_{ef}(m^2/s)$ em função da pressão e temperatura de secagem para cenoura branqueada.

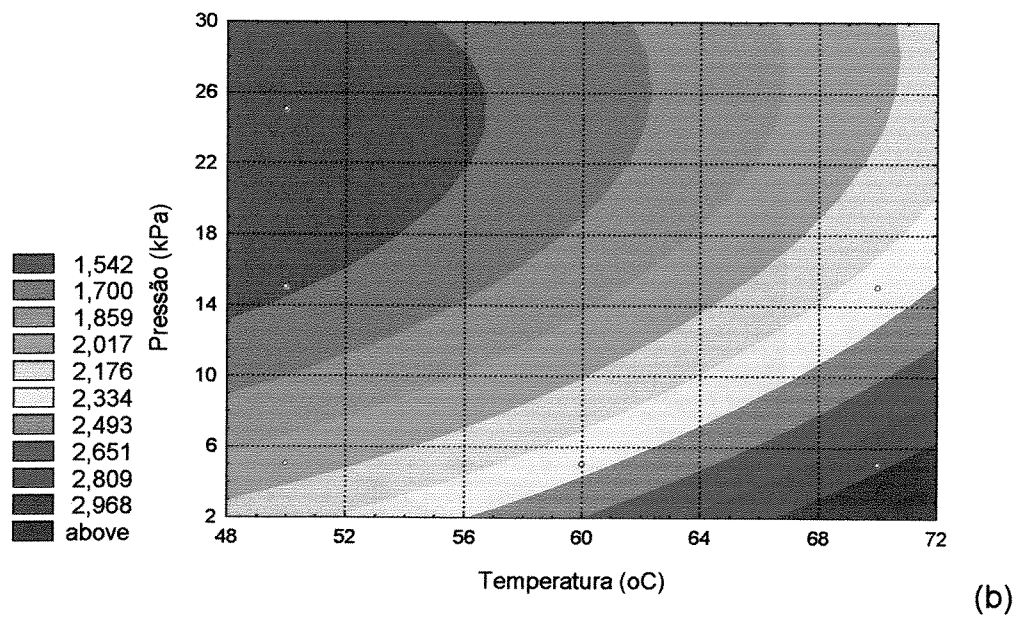
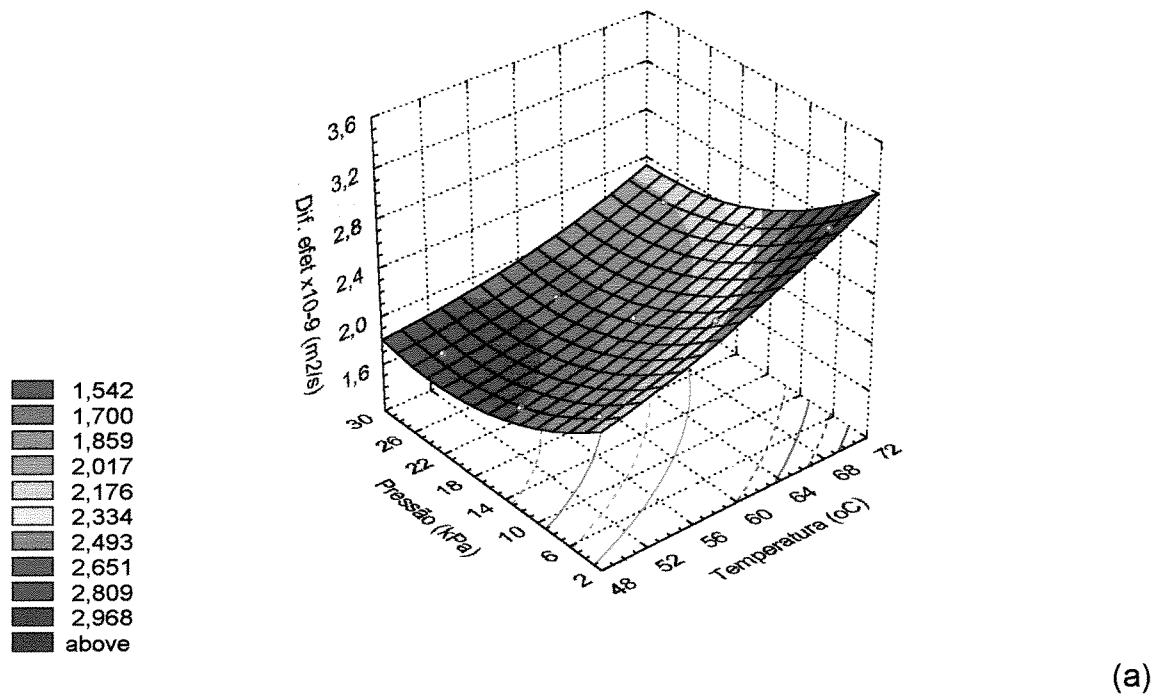


Figura 4.21. Superfície de resposta (a) e Curvas de nível (b) para $D_{ef}(m^2/s)$ em função da pressão e temperatura de secagem para cenoura “in natura”.

Pela Figura 4.20a observa-se que ambas variáveis exercem forte influência sobre a resposta e que a associação de os valores menores de pressão e valores maiores de temperatura favorecem ao aumento da difusividade. As curvas de nível da Figura 4.20b mostra, que a resposta, também atinge melhores resultados quando se trabalha com valores de pressão menores que 15 kPa e temperaturas maiores que 60 °C.

Na Figura 4.21a observa-se que ambas as variáveis influenciam positivamente com a mesma intensidade sobre a resposta, porém o aumento da difusividade se dá em menores proporções se comparado com os valores da cenoura congelada e branqueada. Pela Figura 4.21b da curva de nível, pode-se observar a existência de uma região indesejável para a resposta, na qual os piores valores estão relacionados com baixos valores de temperatura acima de 60 °C e pressões maiores que 15 kPa.

4.5.2 Planejamento experimental para secagem de abóbora.

Os resultados experimentais para as amostras de abóbora pré-tratadas por congelamento e branqueamento e as “in natura” para a variável dependente, difusividade efetiva D_{ef} são apresentados na Tabela 4.16. Para avaliar estatisticamente a influência de cada variável na difusividade efetiva, as Tabelas 4.17 a 4.19 mostram os efeitos principais de cada variável, de interações entre elas, os erros padrões e os coeficientes p associados aos mesmos a um nível de 95% de confiança. A Figura 4.22 mostra a magnitude dos efeitos para a difusividade D_{ef} durante a secagem de amostras de abóbora pré-tratadas por congelamento e branqueamento e “in natura”. Os efeitos foram calculados através do software *Statistica 5.0*. Para o cálculo destes parâmetros foi utilizado um modelo estatístico de 2ª. ordem para a resposta ou difusividade efetiva D_{ef} , conforme a equação (4.2), utilizando as variáveis temperatura (T_{cod}) e pressão (P_{cod}) na forma codificada (-1, 0, +1):

$$D_{ef} = A_1 + A_2T + A_3P^2 + A_4T^2 + A_5P + A_6TP \quad (4.5)$$

Tabela 4.16 - Variáveis reais e valores da difusividade efetiva calculados para abóbora congelada, branqueada e “in natura”.

Ensaio	Variáveis independentes		Respostas $D_{ef} \times 10^{-9} \text{ (m}^2/\text{s)}$		
	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	abóbora congelada	abóbora branqueada	abóbora “in natura”
1	50	5	2,977	2,648	2,263
2	60	5	4,269	3,272	2,827
3	70	5	5,700	4,941	4,036
4	50	15	2,410	2,314	2,333
5	60	15	2,911	2,811	2,522
6	70	15	3,525	3,220	3,125
7	50	25	2,011	2,033	2,080
8	60	25	2,330	2,250	2,169
9	70	25	3,030	2,786	2,833

Tabela 4.17 - Parâmetros do modelo estatístico da difusividade efetiva, os efeitos principais, erro padrão e p para a secagem de abóbora congelada.

Parâmetros do modelo	Valor	Efeitos	Erro padrão	p
A_1	0,3285	3,246	0,0855	0,00004
Linear				
A_2	0,0194	1,619	0,2094	0,0045
A_3	0,0313	-1,857	0,2094	0,00302
Quadrático				
A_4	0,00104	-0,104	0,1814	0,05040
A_5	0,00438	-0,438	0,1814	0,0946
Interações				
A_6	-0,0046	-0,825	0,2565	0,0450

Tabela 4.18 - Parâmetros do modelo estatístico da difusividade efetiva, os efeitos principais, erro padrão e p para a secagem de abóbora branqueada.

Parâmetros do modelo	Valor	Efeitos	Erro padrão	p
A_1	4,2918	2,919	0,0936	0,000072
Linear				
A_2	-0,1315	1,317	0,229	0,0104
A_3	0,1058	-1,264	0,229	0,0117
Quadrático				
A_4	0,00212	-0,212	0,198	0,03600
A_5	0,00206	-0,206	0,198	0,31400
Interações				
A_6	-0,00385	-0,770	0,280	0,07120

Tabela 4.19 - Parâmetros do modelo estatístico da difusividade efetiva, os efeitos principais, erro padrão e p para a secagem de abóbora in natura.

Parâmetros do modelo	Valor	Efeitos	Erro padrão	P
A_1	7,273	2,6870	0,053	0,000018
Linear				
A_2	-0,233	1,106	0,132	0,0035
A_3	0,106	-0,681	0,132	0,01410
Quadrático				
A_4	0,0027	-0,272	0,114	0,0970
A_5	0,00041	-0,0413	0,114	0,0741
Interações				
A_6	-0,00255	-0,5100	0,161	0,0500

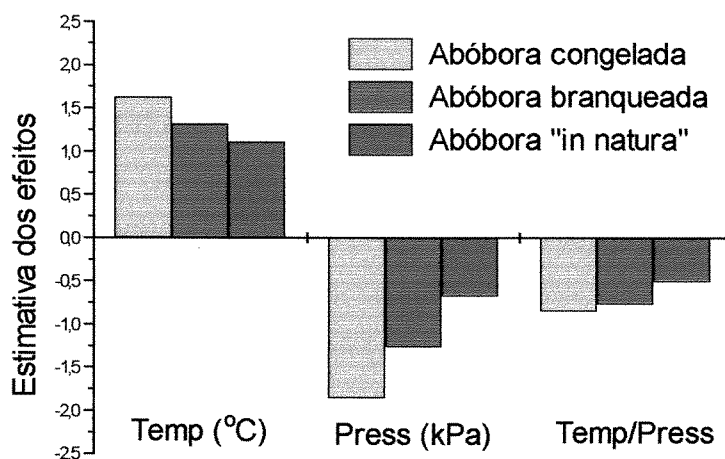


Figura 4.22 - Estimativa dos efeitos para a difusividade D_{ef} durante a secagem de amostras de abóbora pré-tratadas por congelamento e branqueamento e "in natura".

Analisando o valor do coeficiente estatístico p das Tabelas 4.17 a 4.19 observam-se que a resposta D_{ef} , foi influenciado significativamente pelos efeitos lineares, A_2 e A_3 da temperatura e pressão e do efeito quadrático A_6 das interações da temperatura e pressão para todas amostras. Porém o efeito quadrático A_5 da pressão foi significativo apenas para abóbora congelada.

Com relação à magnitude dos efeitos sobre a secagem de abóbora congelada, mostrados na Tabela 4.17 e Figura 4.22 observa-se que tanto a temperatura com o a pressão tiveram praticamente as mesmas magnitudes sobre a resposta ou difusividade efetiva, porém existe uma maior influência da pressão. Com relação ao sinal dos efeitos, o aumento da temperatura favoreceu o aumento da difusividade efetiva, enquanto que, para a pressão, um aumento provocou uma diminuição. Os melhores valores da resposta foram encontrados quando se

diminui a pressão e se aumenta a temperatura de secagem, porém em maiores proporções que da cenoura congelada.

Para as amostras de abóbora branqueada e “in natura” a magnitude dos efeitos mostrados nas Tabelas 4.18 e 4.19 e a Figura 4.22 nota-se que ao contrário que aconteceu na cenoura congelada, a temperatura teve maior influência sobre a resposta. Aumentando-se a temperatura observou-se um aumento da difusividade, acontecendo o contrário com a pressão. Porém, como na cenoura congelada o aumento da temperatura e a diminuição da pressão têm menor influência no aumento da difusividade efetiva.

A partir dos valores dos parâmetros apresentados nas Tabelas 4.17, 4.18 e 4.19 é possível obter os modelos empíricos (equações 4.6, 4.7 e 4.8), que relacionam a difusividade efetiva D_{ef} com as variáveis estudadas, as tabelas de análise de variância e os gráficos tridimensionais de superfície de resposta, que permitem estudar as interações entre as variáveis e auxiliam na escolha da melhor condição de operação no processo de secagem. Neles foram considerados apenas os coeficientes estatisticamente significativos com.

- Para abóbora congelada:

$$D_{ef} = 0,3285 + 0,0194T + 0,0313P + 0,00104T^2 - 0,0046TP \quad (4.6)$$

- Para abóbora branqueada:

$$D_{ef} = 4,2918 - 0,1315T + 0,1058P + 0,00212T^2 - 0,00385 \quad (4.7)$$

Para abóbora “in natura”:

$$D_{ef} = 7,273 - 0,233 + 0,106T - 0,00255TP \quad (4.8)$$

As Tabelas 4.20 a 4.22 apresentam a Análise variância (ANOVA) dos modelos de 2ª. ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), calculados a um nível de 95 %

de confiança. Verifica-se nas Tabelas 4.20 a 4.22, que os valores tabelados de F para todos os modelos, de difusividade efetiva a um nível de 95 % de confiança foi de 9,01. Estes valores encontram-se bem abaixo dos valores calculados de F, como mostram as Tabelas 4.20 a 4.22, que foram de 31,07 para abóbora congelada, de 14,62 para abóbora branqueada e de 22,82 para abóbora “in natura”, o que demonstra que a quantidade de variações devido aos modelos são maiores que as variações não explicadas e os modelos são considerados válidos. Desta forma, é possível dizer que os modelos ajustados explicam 98,10, 96,05 e 97,43 % das variações das respostas encontradas respectivamente e são estatisticamente significativos.

Tabela 4.20 - Análise de Variância para o modelo de 2ª ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), para secagem de abóbora congelada.

Fonte de Variação	SQ	MQ	GL	F _{calculado}	F _{tabelado}
Regressão	10,24	2,048	5	31,07	9,01
Resíduo	0,1978	0,065	3	--	--
Total	10,44	--	8	--	--
% variação explicada (R^2)	98,10	--	--	--	--

Tabela 4.21 - Análise de Variância para o modelo de 2ª ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), para secagem de abóbora branqueada.

Fonte de Variação	SQ	MQ	GL	F _{calculado}	F _{tabelado}
Regressão	5,7684	1,153	5	14,62	9,01
Resíduo	0,2367	0,078	3	--	--
Total	6,005	--	8	--	--
% variação explicada (R^2)	90,10	--	--	--	--

Tabela 4.22 - Análise de Variância para o modelo de 2ª ordem da difusividade efetiva (D_{ef}), para secagem de abóbora “in natura”.

Fonte de Variação	SQ	MQ	GL	F _{calculado}	F _{tabelado}
Regressão	3,8075	0,7611	5	23,32	9,01
Resíduo	0,0979	0,0326	3	--	--
Total	3,9036	--	8	--	--
% variação explicada (R^2)	97,49	--	--	--	--

Com respeito à condição sugerida por BOX e WETZ (1973), no sentido de que o valor de F calculado deva ser quatro a cinco vezes o valor de F tabelado para que o modelo seja preditivo, observa-se pelas Tabelas 4.20, 4.21 e 4.22 que os modelos encontrados satisfazem amplamente essa condição. Os valores calculados de F para os modelos foram respectivamente de 3,45, 1,62 e 2,53 vezes superiores aos valores de F tabelados. Estes valores indicam que os modelos não estariam satisfazendo a condição anterior estabelecida por BOX e WETZ (1973), para o modelo ser considerado preditivo. No entanto, como explicado anteriormente, deve-se ressaltar que devido a complexidade do processo e com base nos coeficientes de correlação apresentados, que neste caso foi 98,10 , 96,05 e 97,43 para as amostras de abóbora congelada, branqueada e “in natura” valores altamente aceitáveis dentro dos padrões de Engenharia, conduziu a aceita-os como modelos preditivos.

As Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 apresentam os valores observados versus os preditos para abóbora congelada, branqueada e “in natura”. Observa-se que os valores preditos pela regressão têm boa concordância aos valores observados, indicando boa capacidade preditiva dos modelos.

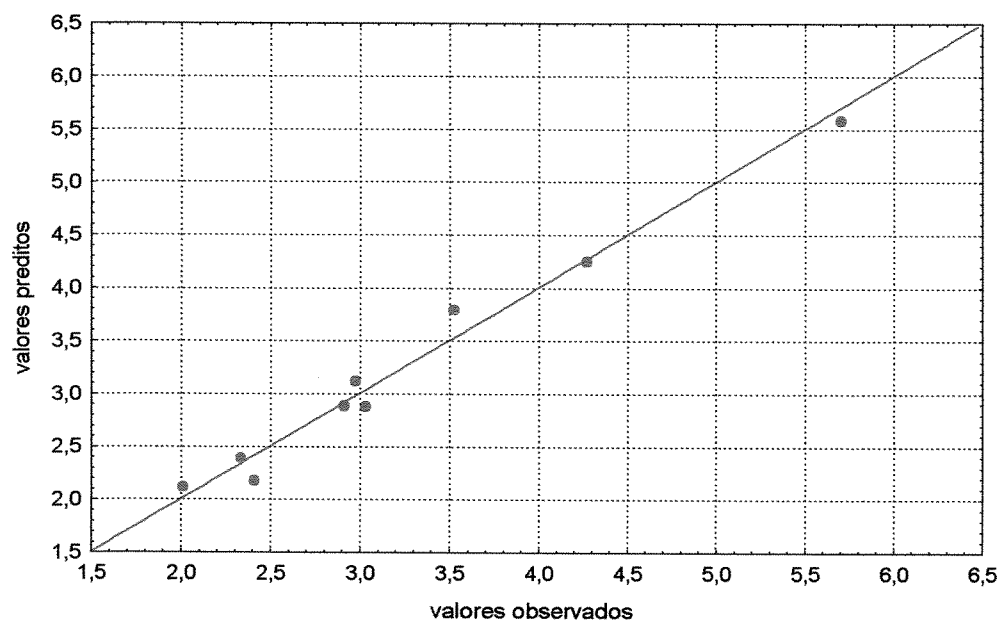


Figura 4.23 - Comparação entre (_) valores preditos vs (•)valores observados experimentalmente para abóbora congelada.

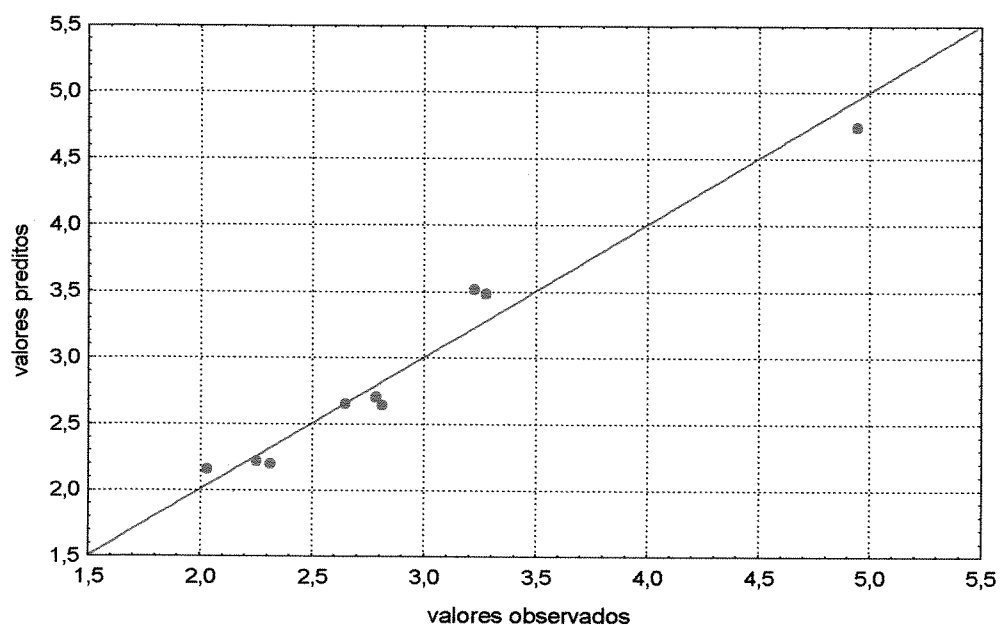


Figura 4.24 - Comparação entre (_) valores preditos vs (•)valores observados experimentalmente para abóbora branqueada.

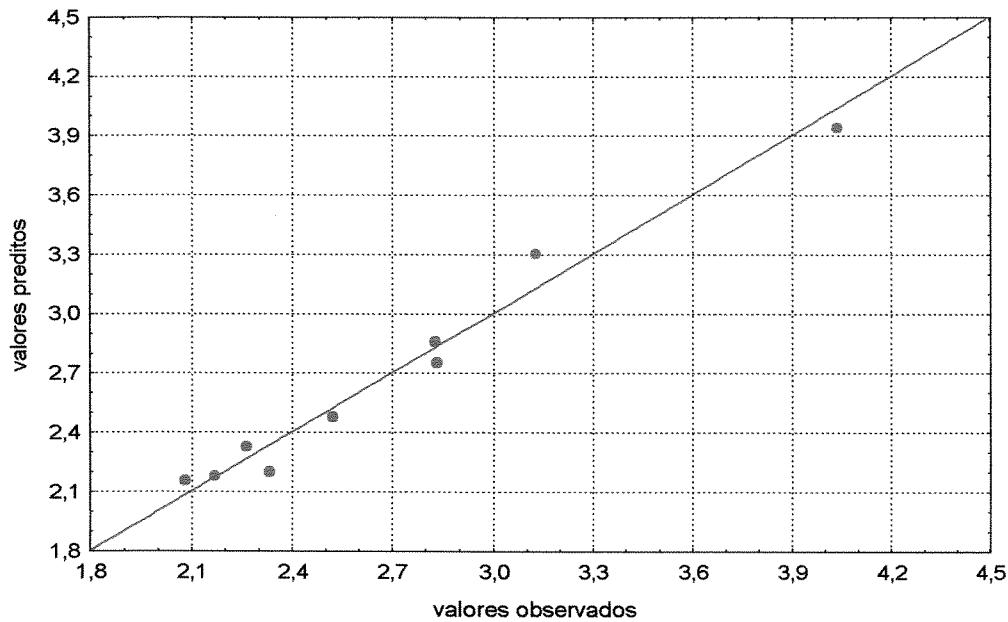


Figura 4.25 - Comparação entre (_) valores preditos vs (•) valores observados experimentalmente para abóbora “in natura”.

Com a finalidade de realizar uma análise mais detalhada do comportamento de cada variável, para a secagem das amostras de abóbora, construiu-se com auxílio do *software Statistica for Windows*, gráficos tridimensionais de superfície de resposta e curvas de nível para todas as combinações possíveis de variáveis.

Nas Figuras 4.26 a 4.28, são apresentadas as superfícies de resposta e as curvas de nível correspondentes, geradas pelo modelo de 2ª ordem para a difusividade efetiva D_{ef} em função das variáveis independentes de temperatura e pressão.

A Figura 4.26a descreve a variação da resposta difusividade efetiva em função das variáveis independentes para abóbora congelada, enquanto que a Figura 4.26b apresenta para as mesmas condições, a curva de nível correspondente. Pela Figura 4.26a observa-se que ambas as variáveis influenciam sobre a resposta. Entretanto, na Figura 4.26b pode-se observar que quando se

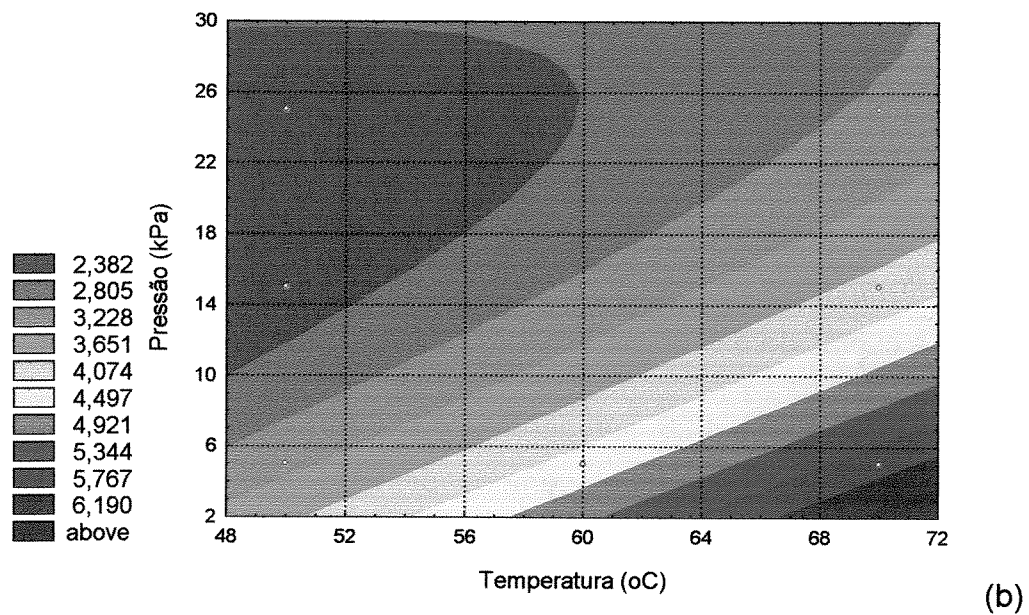
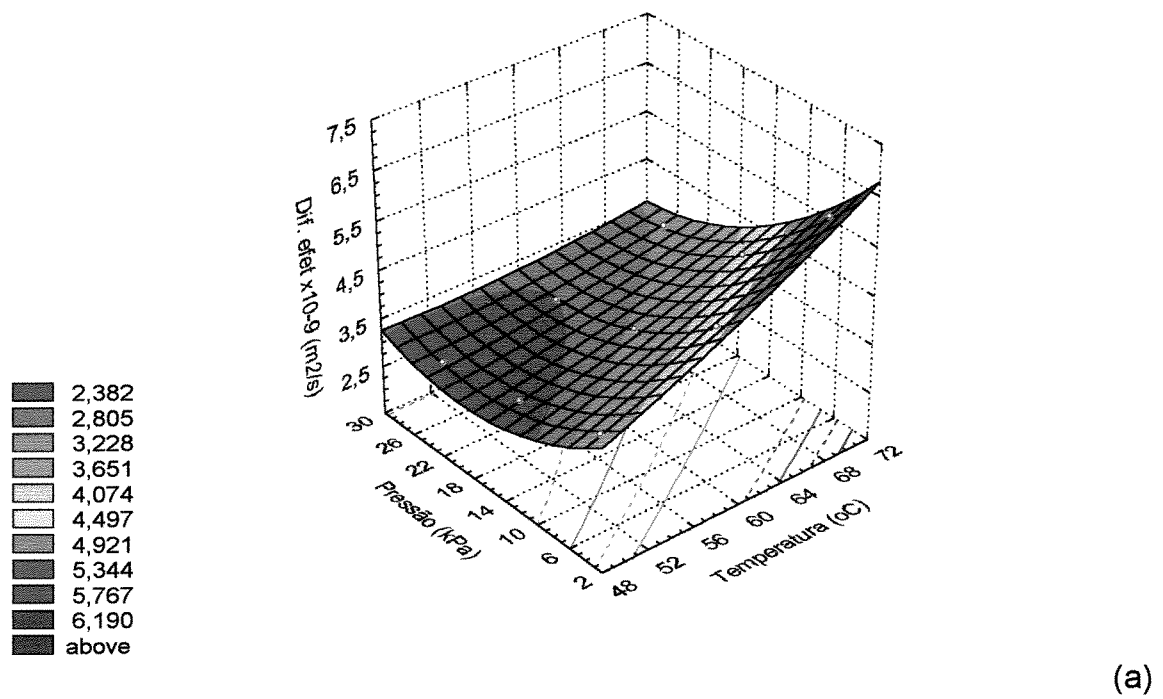


Figura 4.26 - Superfície de resposta (a) e curvas de nível (b) para D_{ef} (m^2/s) em função da pressão e temperatura de secagem para abóbora congelada.

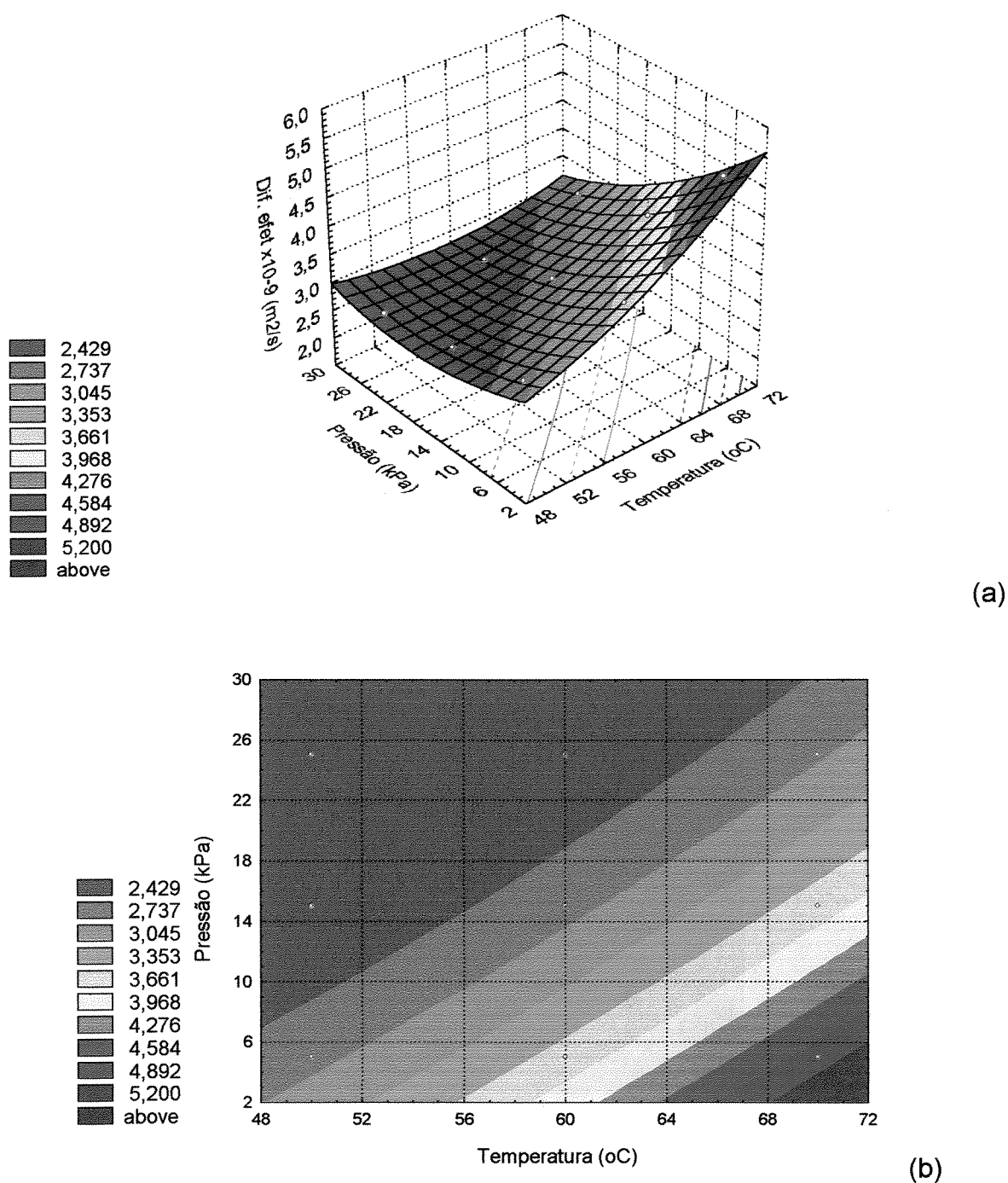


Figura 4.27 - Superfície de resposta (a) e curvas de nível (b) para D_{ef} ($\text{m}^2\text{/s}$) em função da pressão e temperatura de secagem para abóbora branqueada.

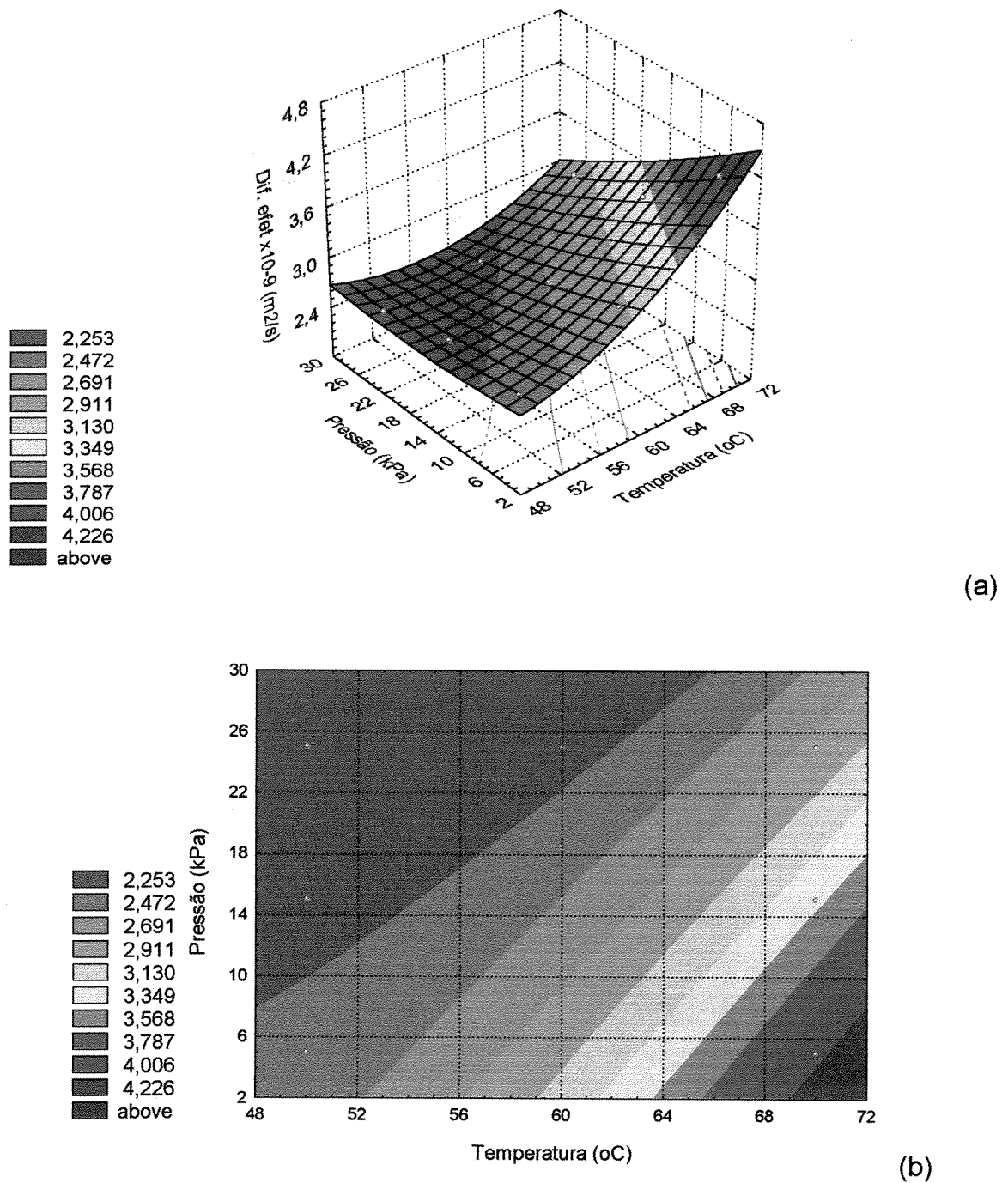


Figura 4.28 - Superfície de resposta (a) e curvas de nível (b) para D_{ef} (m²/s) em função da pressão e temperatura de secagem para abóbora “in natura”.

trabalha com altos valores de temperatura e menores valores de pressão (acima de 70 °C e inferiores a 15 kPa) obtêm-se os melhores resultados. Porém para valores maiores que 60 °C e 15 kPa, existe uma menor resposta.

A Figura 4.27 e 4.28 mostram o comportamento das variáveis temperatura e pressão sobre a resposta para abóbora branqueada e “in natura” respectivamente. Pelas superfícies de respostas das Figuras 4.27a e 4.28a observa-se que ambas as variáveis têm o mesmo tipo de influência sobre a resposta. Porém, nota-se que a variável temperatura tem uma influência ligeiramente maior que a pressão. Pelas curvas de nível Figuras 4.27b e 4.28b percebe-se que os melhores valores são obtidos com a temperatura de 70 °C e pressão de 5 kPa. Para abóbora branqueada existe uma tendência grande de diminuição da resposta quando utilizam-se valores acima de 60 °C e pressões maiores que 15 kPa.

4.6 Modelo difusional considerando o encolhimento.

Os valores da difusividade efetiva calculados considerando o encolhimento da amostra nas três dimensões foi determinada substituindo-se na equação de difusão o termo adimensional do conteúdo de umidade, X pela concentração, C (equação 3.5) como proposto por PARK (1987) durante a secagem de músculos de peixe. Onde a concentração foi calculada através da relação X/V , sendo V o volume da amostra medido para cada tempo experimental. Os valores da concentração estão apresentados nas Tabelas do apêndice E.

4.6.1 Modelo Difusional Considerando o Encolhimento para amostras de cenoura.

As Figuras 4.29 a 4.31 mostram o ajuste do modelo difusional considerando o encolhimento aos dados experimentais para amostras representativas de cenoura congelada, branqueada e “in natura”. Pode-se observar que este modelo ajustou-se bem aos dados experimentais.

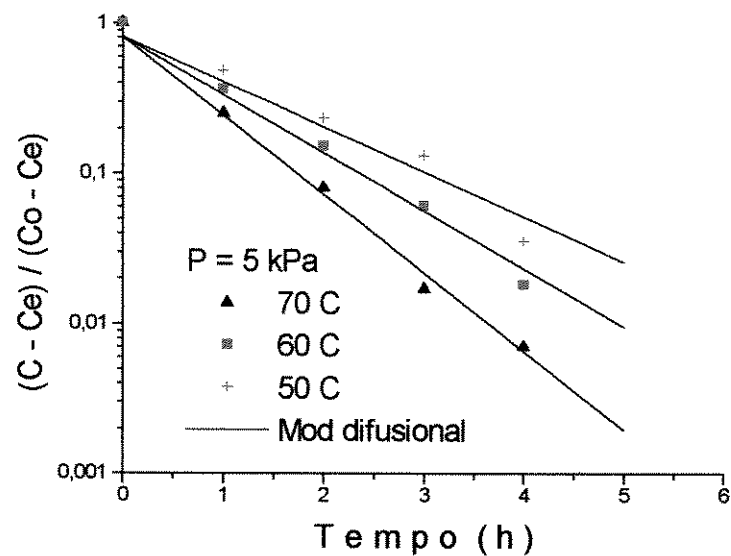


Figura 4.29 - Curvas de secagem de cenoura congelada ajustadas pelo modelo difusional, com encolhimento, escala monolog.

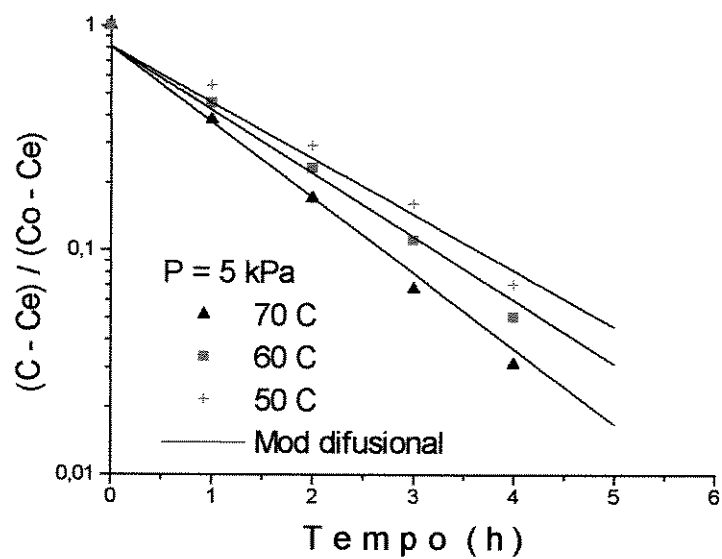


Figura 4.30 - Curvas de secagem de cenoura branqueada ajustadas pelo modelo difusional com encolhimento, escala monolog.

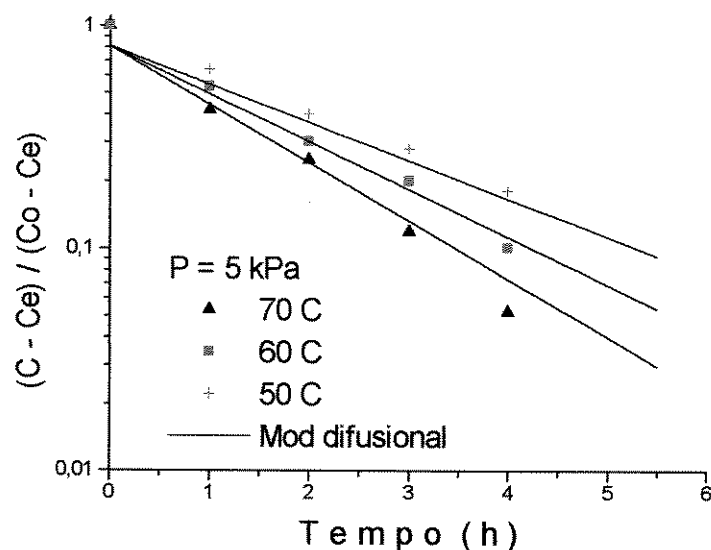


Figura 4.31 - Curvas de secagem cenoura "in natura" ajustadas pelo modelo difusional, com encolhimento, escala monolog.

As Tabelas 4.23 a 4.25 apresentam os valores encontrados para a difusividade efetiva de umidade interna amostras de cenoura congelada, branqueada e "in natura" respectivamente, obtidas por ajuste não linear das curvas de secagem a equação de difusão considerando o encolhimento da amostra.

Os resultados contidos nestas Tabelas mostram a influencia do encolhimento na difusividade efetiva. Pode-se observar que os valores calculados da difusividade efetiva considerando o encolhimento da amostra são menores se comparados com os valores da difusividade efetiva sem considerar o encolhimento. Demonstrando que a difusividade quando calculada sem a devida consideração do fenômeno de encolhimento superestima a transferência de massa por difusão (PARK, 1987). Segundo o mesmo autor, este tipo de análise pode trazer inclusive erros na avaliação da resistência de transferência de massa

no material (resistência interna), para outros tipos de análise na secagem. Este tipo de comportamento também foi encontrado por GOUVEIA (1999) durante a secagem de rizomas de gengibre com e sem casca e por PRADO (1998) durante a secagem de frutos de tâmara para obtenção de tâmara-passa.

Os valores de difusividade mostrados nas Tabelas mencionados variam de 3,390 a $1,120 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura congelada; de 2,180 a $1,00 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura branqueada e de 1,720 a $1,110 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura “in natura”. Pode-se notar que os maiores valores foram de $3,390 \times 10^{-9}$, $2,180 \times 10^{-9}$, $1,720 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura congelada, branqueada e “in natura” respectivamente e foram encontrados na temperatura de 70 °C e pressão de 5 kPa.

Estes valores encontrados são satisfatórios quando comparados com os dados da literatura, como os reportados por MULET *et al* (1989), MULET *et al* (1984) e MULET *et al* (1983) que encontrou valores difusividade efetiva entre 0,8 a $9,25 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, estudando a secagem de cenoura a temperatura entre 30 a 70 °C e KIRANOUDIS *et al* (1993) encontrou valores entre 1,5 e $4,5 \text{ m}^2/\text{s}$ trabalhando a temperaturas entre 60 a 100 °C.

Conforme SUAREZ e VIOLLAZ (1991) estudando a secagem de fatias de batata usando o modelo difusional de Fick considerando o encolhimento na espessura e sem considerar o encolhimento, encontraram resultados diferentes. BALABAN (1989) também estudaram o efeito do encolhimento na espessura na difusividade efetiva, estes autores desenvolveram métodos, com e sem consideração do encolhimento, comparando os resultados obtidos dos dois modelos, concluíram que estes podem apresentar diferenças significativas nos valores calculados.

Tabela 4.23 - Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional, com encolhimento para cenoura congelada.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	D_{ef} 10^{-9} (m ² /s)	R ²	Er (%)
5	70	3,396	0,98	1,88
	60	2,660	0,97	1,94
	50	1,940	0,97	2,86
15	70	2,130	0,97	1,94
	60	1,200	0,97	1,88
	50	1,420	0,96	1,77
25	70	1,470	0,97	1,97
	60	1,180	0,97	2,04
	50	1,120	0,96	2,91

Tabela 4.24 - Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional, com encolhimento para cenoura branqueada.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	D_{ef} 10^{-9} (m ² /s)	R ²	Er (%)
5	70	2,183	0,98	1,96
	60	1,834	0,97	1,92
	50	1,644	0,96	2,04
15	70	1,22	0,97	1,83
	60	1,472	0,97	1,70
	50	1,416	0,97	1,80
25	70	1,397	0,97	1,67
	60	1,280	0,96	2,41
	50	1,130	0,96	2,33

Tabela 4.25 - Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional, com encolhimento para cenoura “in natura”.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	D_{ef} 10^{-9} (m ² /s)	R^2	Er (%)
5	70	1,730	0,98	1,99
	60	1,410	0,97	1,80
	50	1,129	0,97	1,75
15	70	1,258	0,97	1,88
	60	1,142	0,96	1,97
	50	1,123	0,97	1,83
25	70	1,194	0,98	1,75
	60	1,362	0,97	2,01
	50	1,111	0,96	2,18

4.6.2 Modelo Difusional Considerando o Encolhimento para amostras de abóbora.

As Figuras 4.32 a 4.34 mostram o ajuste do modelo difusional considerando o encolhimento aos dados experimentais para amostras representativas de abóbora congelada, branqueada e “in natura” respectivamente, pode-se observar que o modelo difusional apresentou um bom ajuste aos dados experimentais de abóbora congelada, branqueada e “in natura” como mostram as Figuras 4.32 a 4.34 respectivamente.

Observa-se também que o modelo ajusta-se melhor para maiores temperaturas e menores pressões de secagem tanto para abóbora congelada, branqueada e “in natura”.

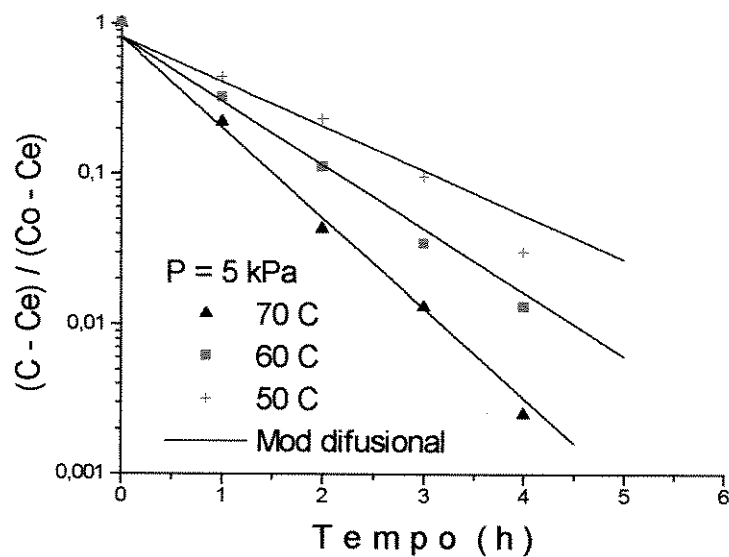


Figura 4.32 - Curvas de secagem de abóbora congelada ajustadas pelo modelo difusional, com encolhimento, escala monolog.

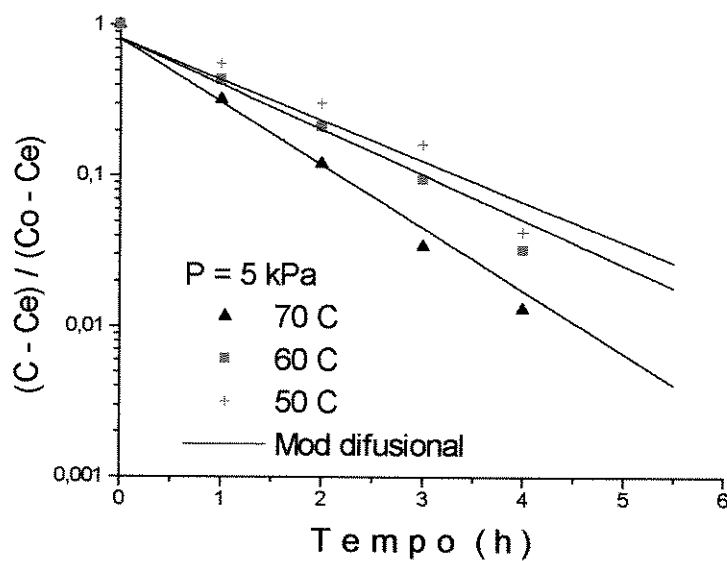


Figura 4.33 - Curvas de secagem de abóbora branqueada ajustadas pelo modelo difusional, com encolhimento, escala monolog.

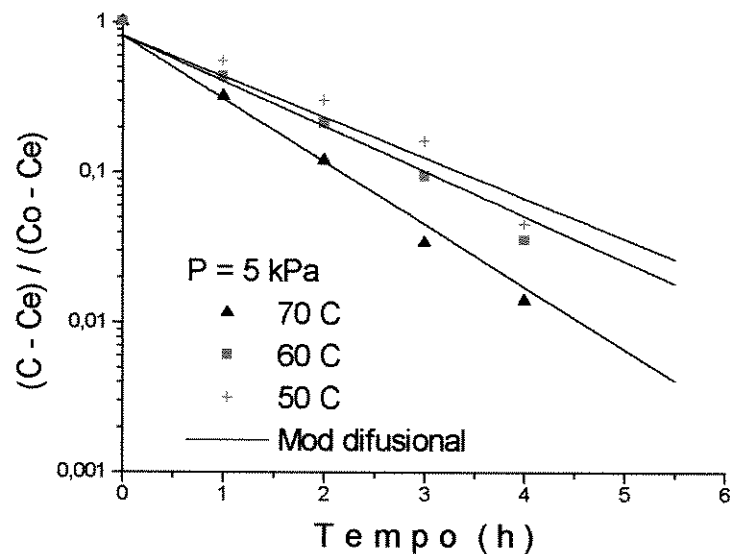


Figura 4.34 - Curvas de secagem de abóbora "in natura" ajustadas pelo modelo difusional, com o encolhimento, escala monolog.

As Tabelas 4.26 a 4.28 apresentam os valores encontrados para a difusividade efetiva de umidade interna considerando o encolhimento das amostras de abóbora congelada, branqueada e "in natura" respectivamente, obtidas por ajuste não linear das curvas de secagem a equação de difusão considerando o encolhimento da amostra. Os resultados contidos nestas Tabelas, mostram também a influencia do encolhimento na difusividade, onde os valores da difusividade efetiva considerando o encolhimento têm um comportamento semelhante às amostras de cenoura.

Os valores de difusividade calculados considerando o encolhimento mostrado nas Tabelas mencionadas variam de $3,880$ a $1,140 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para abóbora congelada; de $2,705$ a $1,138 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para abóbora branqueada e de $2,638$ a $1,305 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para abóbora "in natura". Pode-se notar que os maiores valores foram de $3,88 \times 10^{-9}$, $2,705 \times 10^{-9}$, $2,638 \text{ m}^2/\text{s}$ para abóbora congelada, branqueada e "in natura" respectivamente e foram encontrados na temperatura de

70 °C e pressão de 5 kPa. Estes valores encontrados são satisfatórios quando comparados com os da dos da literatura.

GOUVEIA (1999) observou este tipo de comportamento durante a secagem de gengibre e concluiu que o tipo de amostra pode influenciar no encolhimento e consequentemente na difusividade durante a secagem. Um comportamento semelhante foi observado por PRADO (1998) durante a secagem de tâmara para obtenção de tâmara-passa. Segundo PARK (1987) o encolhimento também pode ser afetado pela temperatura de secagem. FUSCO *et al* (1991) estudaram o fenômeno do encolhimento volumétrico nos modelos difusivos para diferentes cortes geométricos. O encolhimento foi representado pelas relações de volume com o teor de umidade através de uma equação polinômica. Observaram que em todas as geometrias estudadas, os modelos que consideraram o encolhimento apresentam melhores resultados.

Tabela 4.26 - Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional, com encolhimento para abóbora congelada.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	D_{ef} 10^9 (m ² /s)	R^2	Er (%)
5	70	3,900	0,98	1,52
	60	2,780	0,97	1,66
	50	1,940	0,97	1,94
15	70	2,060	0,98	1,55
	60	2,020	0,97	1,76
	50	1,699	0,96	2,08
25	70	1,694	0,97	1,91
	60	1,428	0,97	1,88
	50	1,140	0,97	1,92

Tabela 4.27 - Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional considerando, com encolhimento para abóbora branqueada.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	D_{ef} $10^9 (m^2/s)$	R^2	Er (%)
5	70	2,71	0,98	1,83
	60	1,944	0,97	1,99
	50	1,755	0,96	2,13
15	70	1,844	0,97	1,66
	60	1,556	0,97	1,77
	50	1,305	0,97	1,81
25	70	1,223	0,97	1,75
	60	1,166	0,96	1,92
	50	1,138	0,98	1,65

Tabela 4.28 - Valores da difusividade efetiva calculada pelo modelo difusional , com encolhimento para amostras de abóbora "in natura".

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	D_{ef} $10^9 (m^2/s)$	R^2	Er (%)
5	70	2,638	0,98	1,76
	60	1,861	0,97	1,62
	50	1,652	0,97	2,09
15	70	1,722	0,98	1,66
	60	1,500	0,96	1,73
	50	1,472	0,96	1,78
25	70	1,508	0,97	1,77
	60	1,305	0,98	1,58
	50	1,361	0,97	1,85

4.7 Estudo do Encolhimento.

Nas Figuras de 4.35 a 4.37 mostram-se resultados ajustados pelos modelos de SUZUKI *et al* (1976) uniforme 1, uniforme 2 e central aos dados experimentais para amostras de abóbora congelada, branqueada e “in natura”, cujos valores do coeficiente estão mostrados nas Tabelas de 4.29 a 4.31.

Analisando estas Figuras observa-se que os modelos propostos se ajustam bem aos nossos dados experimentais, para todas as condições de secagem, como mostram os valores do coeficiente de correlação R^2 e do erro cometido. PINTO & TOBINAGA (1992) durante a secagem de músculos de peixe e GOUVEIA (1999) na secagem de gengibre, utilizando estes modelos para estudar o encolhimento, obtiveram bons resultados que se ajustaram bem aos dados experimentais. Entretanto, observa-se que na pressão de 25 kPa e temperatura de 70 °C para cenoura congelada e a 5 kPa e 50 °C para cenoura “in natura”, existe um maior desvio do modelo central aos dados experimentais. LOZANO *et al* (1983) também, observaram este tipo de comportamento durante a secagem de batata.

Nas Figuras de 4.38 a 4.40 mostram-se resultados ajustados pelos modelos de SUZUKI *et al* (1976) uniforme 1, uniforme 2 e central aos dados experimentais para amostras de abóbora congelada, branqueada e “in natura”, cujos valores do coeficiente estão mostrados nas Tabelas de 4.32 a 4.34. Através desta Figuras 4.38 a 4.4.40 pode-se verificar que os modelos representam bem os dados experimentais para as amostras de abóbora congelada, branqueada e “in natura” para todas as condições de secagem estudadas, como mostram os valores do erro cometido. Porém, para as amostras de abóbora congelada a 5 kPa e 70 °C observa-se maiores desvios aos dados experimentais. Para a mesma abóbora congelada nota-se que a 15 kPa e 70 °C existe um maior ajuste dos modelos nos primeiros estágios da secagem, desviando-se a medida que avança a secagem. Este fato também foi observado por SUZUKI *et al* (1976) durante a secagem de cenoura.

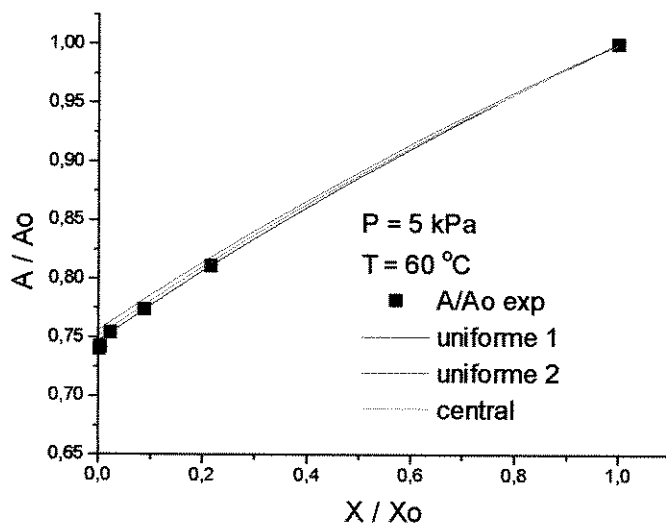


Figura 4.35 - Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura congelada na pressão de 5 kPa e temperatura de 60 °C.

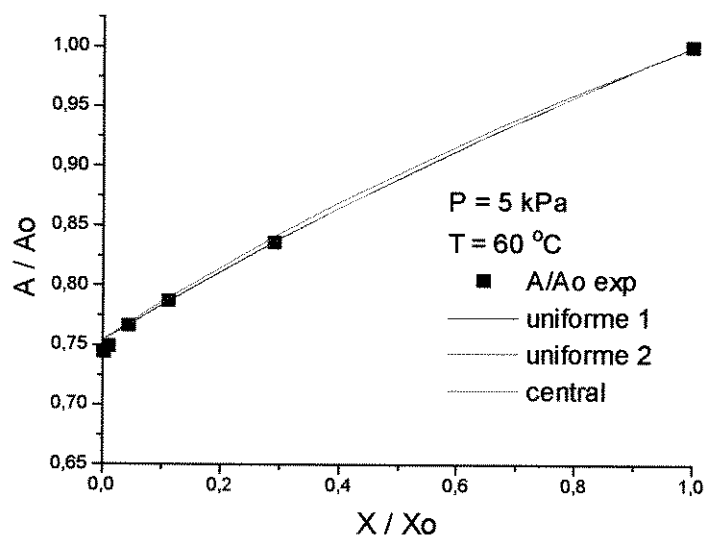


Figura 4.36 - Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura branqueada na pressão 5 kPa e temperatura de 60 °C.

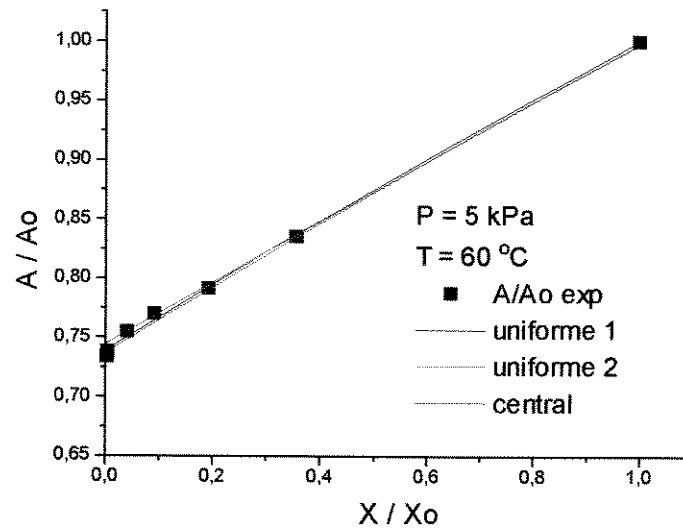


Figura: 4.37 -Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura "in natura" na pressão de 5 kPa e temperatura de 60 °C.

Tabela 4.29 - Valores do encolhimento (n) dos modelos uniforme 1 e 2 e central para cenoura congelada a diferentes condições de secagem.

Pressão (kPa)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Uniforme 1		Uniforme 2		Central	
		n	Er (%)	N	Er (%)	n	Er (%)
5	70	0,31	0,62	0,43	0,61	0,43	0,57
	60	0,42	0,64	0,41	0,66	0,42	0,59
	50	0,41	0,63	0,45	0,64	0,44	0,62
15	70	0,49	0,54	0,37	0,62	0,48	0,50
	60	0,68	0,52	0,69	0,55	0,71	0,58
	50	0,57	0,55	0,86	0,54	0,64	0,54
25	70	0,29	0,56	0,27	0,61	0,45	0,69
	60	0,39	0,57	0,41	0,57	0,42	0,58
	50	0,67	0,60	0,63	0,59	0,54	0,61

Tabela 4.30 - Valores do encolhimento (n) dos modelos uniforme 1 e 2 e central para cenoura branqueada a diferentes condições de secagem.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	Uniforme 1		Uniforme 2		Central	
		N	Er (%)	n	Er (%)	N	Er (%)
5	70	0,39	0,54	0,39	0,50	0,38	0,57
	60	0,40	0,59	0,34	0,58	0,41	0,59
	50	0,40	0,59	0,46	0,50	0,50	0,60
15	70	0,40	0,58	0,34	0,54	0,36	0,56
	60	0,55	0,61	0,54	0,55	0,50	0,54
	50	0,60	0,63	0,61	0,57	0,45	0,66
25	70	0,86	0,56	0,82	0,60	0,83	0,57
	60	0,63	0,61	0,63	0,61	0,63	0,63
	50	0,68	0,66	0,65	0,60	0,55	0,78

Tabela 4.31 - Valores do encolhimento (n) dos modelos uniforme 1 e 2 e central para cenoura “in natura” a diferentes condições de secagem.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	Uniforme 1		Uniforme 2		Central	
		n	Er (%)	n	Er (%)	N	Er (%)
5	70	0,28	0,62	0,29	0,60	0,30	0,61
	60	0,63	0,65	0,61	0,62	0,79	0,61
	50	0,46	0,57	0,45	0,57	0,46	0,67
15	70	0,63	0,55	0,64	0,57	0,67	0,56
	60	0,81	0,59	0,83	0,55	0,70	0,56
	50	0,52	0,59	0,51	0,56	0,56	0,58
25	70	0,46	0,60	0,68	0,58	0,66	0,57
	60	0,61	0,58	0,60	0,59	0,65	0,58
	50	0,87	0,59	0,87	0,60	0,91	0,61

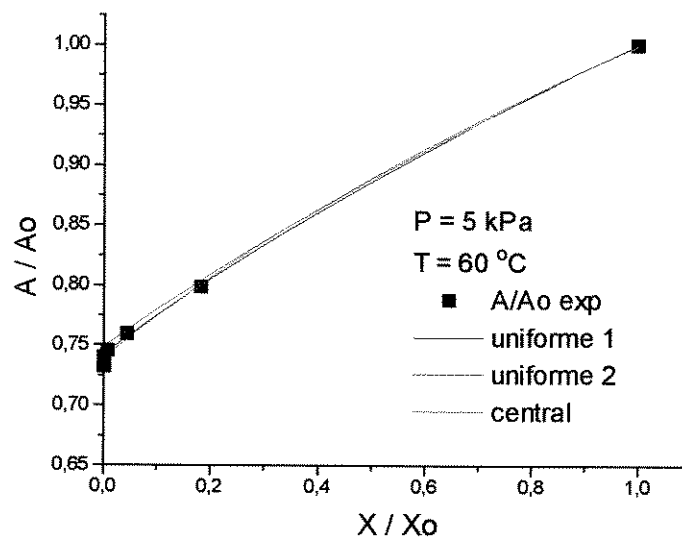


Figura 4.38 -: Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora congelada na pressão de 5 kPa e temperatura de 60 °C.

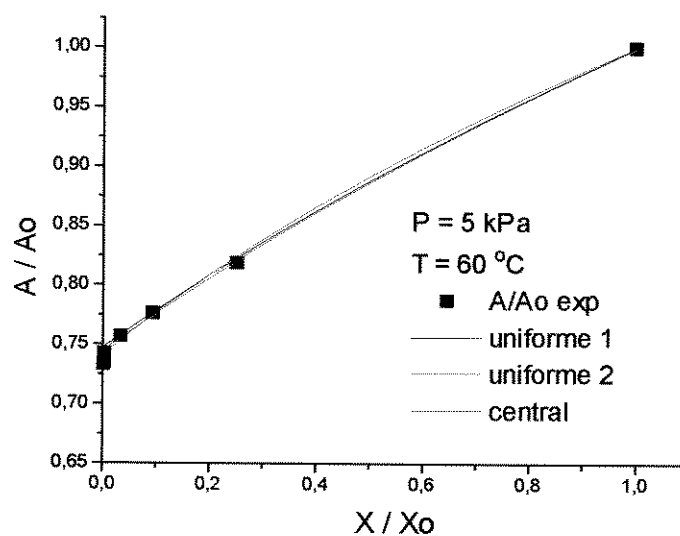


Figura 4.39 -: Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora branqueada na pressão de 5 kPa e temperatura de 60 °C.

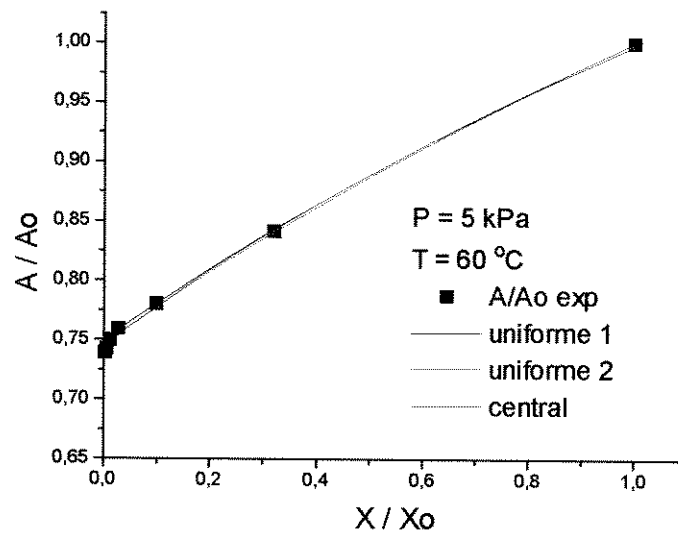


Figura 4.40 - Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora 'in natura' nas pressões de 5 kPa e temperatura de 60 °C.

Tabela 4.32 - Valores do encolhimento (n) dos modelos uniforme 1 e 2 e central para abóbora congelada a diferentes condições de secagem.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	Uniforme 1		Uniforme 2		Central	
		n	Er (%)	n	Er (%)	N	Er (%)
5	70	0,31	0,58	0,36	0,64	0,22	0,73
	60	0,38	0,56	0,39	0,58	0,33	0,59
	50	0,40	0,59	0,49	0,61	0,28	0,64
15	70	0,57	0,63	0,77	0,58	0,57	0,57
	60	0,63	0,62	0,91	0,60	0,54	0,59
	50	0,52	0,59	0,47	0,61	0,51	0,60
25	70	0,44	0,59	0,60	0,60	0,44	0,61
	60	0,36	0,58	0,38	0,58	0,39	0,60
	50	0,61	0,59	0,53	0,60	0,65	0,62

Tabela 4.33 - Valores do encolhimento (n) dos modelos uniforme 1 e 2 e central para abóbora branqueada a diferentes condições de secagem.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	Uniforme 1		Uniforme 2		Central	
		n	Er (%)	n	Er (%)	N	Er (%)
5	70	0,44	0,59	0,43	0,57	0,29	0,56
	60	0,40	0,58	0,39	0,58	0,31	0,57
	50	0,48	0,58	0,47	0,56	0,36	0,56
15	70	0,44	0,60	0,44	0,58	0,42	0,58
	60	0,39	0,59	0,40	0,57	0,35	0,60
	50	0,53	0,61	0,52	0,56	0,64	0,57
25	70	0,60	0,60	0,57	0,60	0,57	0,59
	60	0,79	0,59	0,94	0,60	0,73	0,60
	50	0,60	0,60	0,58	0,58	0,42	0,61

Tabela 4.34 - Valores do encolhimento (n) dos modelos uniforme 1 e 2 e central para abóbora “in natura” a diferentes condições de secagem.

Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	Uniforme 1		Uniforme 2		Central	
		n	Er (%)	n	Er (%)	n	Er (%)
5	70	0,36	0,58	0,27	0,58	0,37	0,60
	60	0,39	0,57	0,32	0,59	0,39	0,59
	50	0,49	0,58	0,48	0,60	0,32	0,62
15	70	0,98	0,59	0,77	0,58	0,37	0,63
	60	0,62	0,60	0,91	0,60	0,62	0,58
	50	0,43	0,58	0,46	0,58	0,51	0,57
25	70	0,60	0,60	0,36	0,60	0,37	0,60
	60	0,37	0,59	0,38	0,60	0,62	0,59
	50	0,53	0,60	0,63	0,61	0,51	0,61

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.

Baseado na equação de Arrhenius, que descreve a relação entre a difusividade e a temperatura, foi calculada a energia de ativação, em função da pressão de secagem.

$$D = D_o \exp(-E_a / RT) \quad (4.3)$$

Onde:

D = Difusividade efetiva (m^2/s)

D_o = constante

E_a = energia de ativação (J/mol)

T = temperatura ($^{\circ}\text{K}$)

R = constante universal dos gases ($8,314 \text{ J/mol K}$)

As Tabelas 4.35 a 4.37 mostram os valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de cenoura congelada, branqueada e “in natura”. Enquanto que As Tabelas 4.38 a 4.40, mostram os valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de abóbora congelada, branqueada e “in natura”.

Através das Tabelas 4.35 a 4.37 para amostras de cenoura e Tabelas 4.38 a 4.40 para amostras de abóboras, pode-se observar que a energia de ativação tende a aumentar com a diminuição da pressão. Estes valores estão dentro da faixa reportados por vários pesquisadores durante a secagem de vegetais. CARBONELL *et al* (1984), MULET (1994), NUCCI & MURR (1995) e GOUVEIA (1999) encontraram valores para gengibre com casca e sem casca na faixa entre 21550 a 40000 J/mol K . MAZZA & LEMAGUER (1980) encontraram valores de

21660 J/mol K durante a secagem de fatias de cebola. DAUDIN (1983) apresentou uma serie de resultados para diversos produtos, como: abacate de 40000 J/mol/K, para batata de 52000 J/mol K e beterraba de 29000 J/mol K.

Tabela 4.35 - Valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de cenoura congelada.

Pressão (Kpa)	Energia de ativação Ea (J/mol °K)	Coeficiente de correlação R ²
5	31042,15	0,98
15	2,8823,11	0,99
25	27023,44	0,98

Tabela 4.36 - Valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de cenoura branqueada.

Pressão (KPa)	Energia de ativação Ea (J/mol °K)	Coeficiente de correlação R ²
5	24889,66	0,99
15	22346,97	0,99
25	22364,38	0,98

Tabela 4.37 - Valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de cenoura "in natura".

Pressão (KPa)	Energia de ativação Ea (J/mol °K)	Coeficiente de correlação R ²
5	28994,47	0,98
15	33251,21	0,98
25	25447,33	0,98

Tabela 4.38: Valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de abóbora congelada.

Pressão (KPa)	Energia de ativação E_a (J/mol °K)	Coeficiente de correlação R^2
5	28323,12	0,98
15	22564,32	0,99
25	24987,78	0,9

Tabela 4.39 - Valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de abóbora branqueada.

Pressão (KPa)	Energia de ativação E_a (J/mol °K)	Coeficiente de correlação R^2
5	34568,79	0,98
15	13556,69	0,97
25	26258,14	0,98

Tabela 4.40: Valores calculados de energia de ativação durante a secagem de amostras de abóbora “in natura”.

Pressão (KPa)	Energia de ativação E_a (J/mol °K)	Coeficiente de correlação R^2
5	29555,33	0,98
15	23654,23	0,98
25	25787,21	0,98

5. CONCLUSÕES

Na cinética de secagem observa-se que as maiores temperaturas e menores pressões aceleram o processo de perda de umidade da amostra de cenoura e abóbora. A intensidade desses efeitos também depende do tipo de pré-tratamento aplicado às amostras.

Para todos os ensaios experimentais as amostras pré-tratadas por congelamento apresentam maiores velocidades de secagem quando comparados com as amostras branqueadas por calor e as “in natura”. Devido a que o congelamento da água modifica as propriedades físicas como a porosidade da matéria-prima, favorecendo a secagem.

Quanto ao tipo de matéria-prima utilizado, observa-se que as amostras de abóbora apresentam maiores velocidades de secagem que as de cenoura independente do tratamento recebido e da condição de secagem utilizada. Pois os parâmetros de secagem dependem da natureza da matéria-prima.

A utilização do modelo difusional da 2ª. lei de Fick é excelente para ajustar as curvas de secagem, independente da consideração do encolhimento ou não no processo.

Os valores de difusividade efetiva sem considerar o encolhimento variam de: 4,844 a $1,654 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 3,536 a $1,273 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ e de 3,2555 a $1,2455 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura congelada, branqueada e “in natura” respectivamente. Para abóbora de 5,70 a $2,011 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 4,941 a $2,033 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ e de 4,033 a $2,080 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ congelada, branqueada e “in natura” respectivamente. Esses valores de difusividade tem a mesma ordem de grandeza da maioria dos vegetais estudados na literatura

Os valores de difusividade considerando o encolhimento variam de: 3,396 a $1,120 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura congelada; de 2,183 a $1,130 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura branqueada e de 1,730 a $1,111 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para cenoura “in natura”. Para

abóbora de 3,900 a $1,14 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para abóbora congelada; de 2,710 a $1,138 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para abóbora branqueada e de 2,630 a $1,305 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para abóbora “in natura”. Estes valores de difusividade são menores que os calculados sem considerar o encolhimento, indicando que o encolhimento tem influencia significativa na análise da cinética de secagem.

O tratamento estatístico, utilizando o planejamento experimental e a metodologia de superfície de resposta, mostrou-se uma importante ferramenta para a avaliação dos efeitos das variáveis estudadas.

Para as condições experimentais empregadas as melhores respostas para a difusividade efetiva foram obtidas, utilizando o congelamento como pré-tratamento das amostras e na menor pressão (5 kPa) e maior temperatura (70 °C) de secagem.

O coeficiente de encolhimento da amostras, em função da umidade adimensional, foi bem representado pelos modelos de propostos por SUZUKI et al 1976.

6. BIBLIOGRAFIA.

- AGUIRRE, R. J.; GABITO, J. F.; CHIRIFE, J. "Utilization of fick's second law for the evaluation of diffusion coefficients in food processes controled by internal diffusion". Journal Food Technology, v. 20, 623-629, 1985
- AJIBOLA, O. O. Thin-layer of drying melon seed. Journal of Food Engineering, v. 9, p. 305-320, 1989.
- ALZAMORA, S. M.; CHIRIFE J. Some factors controlling the kinetics of moisture movement during avocado deydration. Journal of Food Science, v. 45, p. 1649-1651. 1980
- ALZAMORA, S. M; CHIRIFE, J; VIOLLAZ, P; VACCAREZZA, L. M. Heat and mass transfer during air drying of avocado. In: Drying '80, vol 1: Developments in drying. New york, Edit. MUJUMDAR, A. S. Hemisphere Publishing, p. 247-254, 1980.
- AREGBA, W; JOMAA, W; PUIGAGLI, J. R. Une approche du séchage de matériaux fortement déformables. Revue Physical Applied, v. 25, p. 1161-1175, 1990.
- A.O.A.C. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALITICAL CHEMIST. Official methods of analysis. 14 ed. Arlington, Virginia, 1984. 1v.
- BALABAN, M. M. Shrinkage in fish muscle during drying. Journal of Food Science, v. 51, n. 2, p. 510-511, 1989.
- BARBOSA, W. C Estudo do melhoramento da qualidade da cenoura (Daucus carota) desidratada através do processo de tratamentos com soluto.

- Campinas, 81 p., 1980 (Tese de mestrado) Universidade Estadual de Campinas, 1980.
- BARROS NETO, B de; SCARMINIO, I. S; BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos. Campinas, editora da UNICAMP, 1995.
- BIELING, H. J; SCHWAIGER, M. Verfahrenstechnisch cche aspekte bei der warmifftrocknung von gemuse. Lebensm. Techn. Verfahrens-technik, v. 31, p. 78-80, 1980.
- BOX, G.E.P.; HUNTER. W.G; HUNTER, J.S. Statistics for experimenters. An introduction designs, data analysis and model building. Nova York; Wiley, 1978.
- BOX , G. E. P; DRAPER, N. R. Evolutionary operation: statistical method for process improvement. New York, Wiley, 1969.
- BOX, G. E. P; WETZ, J. Criteria for judging adequacy of estimation by an approximate response function. University of Wisconsin Technical Report, In:
- BARROS NETO, B; SCARMINIO, L. S; BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos. Edit. UNICAMP, Campinas – SP, 1995. 1973
- BROOKER, D. B; BAKKER-ARKEMA, F. W; HALL, C. W. Drying cereal grains. Connecticut, The AVI Publishing Company, Inc,1974.
- CAMARGO, L. S. Cenoura (*Daucus carota*). In: Instruções Agrícolas para o Estado de São Paulo, Campinas. Instituto Agrônômico de Campinas, p. 74-75, 1972 (boletim 200).
- CARBONELL, J. V; MADARRO, A; PINÁGA, F; PEÑA, J. L. Deshidratación de frutas y hortalizas com aire caliente. IV. Cinética de adsorción y desorción

- de agua en zanahorias. Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, v. 24, n. 1, p.94-103, 1984.
- CANET, W; ESPINOZA, J. Influencia del proceso de congelación sobre la textura de vegetales. Efecto del escaldado y la velocidad de congelación sobre la textura de zanahoria (*Daucus carota*). Revista de Agroquímica y Tecnología de alimentos , v. 24, n. 3, 1983.
- CARNEIRO, M. J. C. Modelagem matemática da secagem de pescado. Campinas, SP. 81 p. 1995 (Tese de Mestrado) Universidade Estadual de Campinas, 1980
- CHIRIFE, J. Fundamental of the drying mechanism during air dehydration of food. In: MUJUMDAR, A.S. Advances in Drying, 1983.
- CORMICK, M. C. Solids drying fundamentals. IN: PERRY, R. H; CHILTON, C. H. Chemical Engineers Handbook, Mc Graw Hill Co, 1983.
- CRANK, J. The mathematics of diffusion. 2 ed. Claredon Press. P. 114, 1975.
- DAUDIN , J. D. "Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides". Sciences des Aliments v.3, n.1, p. 1-36, 1983.
- DEBS-LOUKA, E.; SAHYOUN, W.; ADENIER, H.; BARBOTIN, J.; LOUKA ,N, CHAVERON, H. ; THOMAS D.; ALLAF, K. Deshydratation de la carotte (*Daucus carota* L.): effet d' un nouveau procédé sur les composés lipidiques et la microstructure. Sciences des aliments, v.16, p. 491-503. 1996.
- DUCKWORTH, R. B. Frutas e verduras; Tradução de Pedro Ducar Maluenda. Zaragoza, Editorial Acribia, p. 219-277, 1968.
- FERNANDO, W. J. N; THANGAVEL, T. Vacuum drying characteristics of coconut. Drying Technology, v. 5, n. 3, p. 363-372, 1987.

- FORTES, M; OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to food and grain, IN: Advances in drying, ed. A. S. MUJUMDAR, 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 GABITO, J. F. Diffusional model for drying with volume change. Drying technology, v. 9, n.2, p. 397-417, 1991.
- GEIDA (GRUPO EXECUTIVO DE IRRIGAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO AGRÍCOLA) Contribuição ao desenvolvimento da Agroindústria: hortaliças, tomate. Campinas, GEIDA/FCTPTA. p. 1-172, 1992.
- GOUVEIA, J. P. G de. Avaliação da cinética de secagem de gengibre (Zingiber officinale) em um secador de leito fixo. Campinas, SP. Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Tese de Doutorado, 1999.
- GROTE, M; FROME, H. G. Electron micriscopic morphometry of cell wall swelling in rehydrated carrots and green beens. Zeitschrift fur lebensmittel-untersuchung un-forschung, 1980.
- HOLLAND, B; UNWIN, I. D. The composition of foods. In: Mc CANCE e WIDDONSON. Vegetables, herbs and spices. Cambrige, p. 62-65, 1991.
- HALPIN, B. E; LEE, C. Y. Effect of blanching on enzyme activity and quality changes in green peas. Journal of Food Science, v. 52, n 4, p. 1002-1005, 1987.
- HOLDSWORTH, S. D. Dehydration of food products: A review. Journal of Food Technology, v. 6, p. 331-370, 1971.
- HOOVER , M. V. A process for producing dehydrated pumpkin flakes. Journal of Food Science, v. 38, n. 3, (1973).

IAC, Culturas tropicais. Boletim 173, p20, Campinas, SP.

ITAL, Frutas: compotas, doces em massa, geléias e frutas cristalizadas, para micro e pequena empresa, 1995.

JIMENEZ, L; LOMBRAÑA, J. J. "Contribución al estudio del secado por liofilización y a vacío del zumo de zanahoria". Rev. Agroquímica y Tecnología de alimentos. v. 22, n. 1, p. 147-152, 1982.

KECHAOU, N; ROQUES, M. A variable diffusivity model for drying of highly deformable material. In: MUJUMDAR, A drying, 1989.

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, 360 p. 1955

KING, V. A.; ZALL, R. R; Ludington, D. C. "Controlled low-temperature vacuum dehydration- Anew approach for low-temperature and low pressure food drying". Journal of Food Science, v. 54, n. 6, p 1573-1579. 1989.

KING, C .J. Rates of moisture sorption and desorption in porous dried foodstuffs. Food Technology, v. 22, p. 165-171, 1968.

KING, V. A; ZALL, R. R. "A response surface methodology approach to the optimization of controlled low-temperature vacuum dehydration". Food research International, v. 25: 1-8, 1992.

KIRANOUDIS, C. T; MAUROLIS, Z. B; MARINOS-KOURIS, D. Mass transfer model building in drying. Drying Technology, v. 11, n. 6, p. 1251-1270, 1993.

KOMPANY, E; ALLAF, K; BOUVIER, J. M; GUIGON, P. New drying method of fruits and vegetables. Quality improvement of the final product. In: 7 th. International Drying Symposium, p. 1722-1729, 1990.

- KOMPANY, E; BENCHIMOL, J; ALLAF, K; AINSEBA, B; BOUVIER, J. M. Carrot dehydration for instant rehydration: dehydration kinetics and modeling. Drying Technology, v. 11, n. 3, p. 451-470, 1993.
- KOMPANY, E; ALLAF, K; BOUVIER, J. M; GUIGON, P; MAUREAUX, A. Nouveau procédé de déshydratation des fruits et légumes à réhydratation instantanée. Industries Alimentaires et Agricoles, p. 1243-1248, 1990.
- KROKIDA, M. K; MAROULIS, Z. B. Modelling shrinkage and porosity during vacuum dehydration. International Journal of food Science and Technology, v. 32, p. 445-458, 1997.
- KROKIDA, M. K; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. Drying Technology, v. 15, n. 10, p. 2441-2458, 1997.
- KROKIDA, M. K; ZOGZAS, N. P; MAROULIS, Z. B. Shrinkage and porosity during drying. Modelling the effect of vacuum. International Journal Of Food Science and Technology, 1997.
- LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. In: The Symposium on Drying. The Journal of Eng. Chemical. V. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.
- LUYBEN, K. CH; OLIMAN, M. A. C; BRUIN, S. In: Drying '80, v. 2, p. 233—243, edit A.S MUJUMDAR. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1980.
- LOZANO, J. E.; ROTSTEIN, E; URBICAIN, M. J. "Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents". Journal Food Science, v. 48: 1497-1502, 1983.
- MALCZEWSKI, J; KACZMAREK, W. "Vacuum contact drying of seeds". Drying Technology, v.7, n. 1, p. 59-69, 1989.

- MANSOUR, E. K; DWORSCHAK, E; PERÉDI, J; LUGASI, A. Evaluation of pumpkin seed (*Cucurbita pepo*) as an new source of protein. Acta Alimentaria, v. 22, n. 1, (1993).
- MAZZA, G. Dehydration of carrots: Effects of pré-drying treatments on moisture transport and product quality. Journal of Food Technology, v. 18, p. 113-123, 1983.
- MAZZA, G; LEMAGUER, M. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. Journal of Food Technology, v. 15, p. 181-194, 1980.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. Portaria nº 76, de 25/02/1975. Padronização da cenoura. In: COMPANHIA BRASILEIRA DE ALIMENTOS. Hortigranjeiros: Padronização e classificação. Campinas, CATI, 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.
- MULET, A. Drying modeling and water diffusivity in carrots and potatoes. Journal of food Eng., v. 22, 1994.
- MULET, A; BERNA, A; ROSELLO, C. Drying of carrots I. Drying Models. Drying Technology, v. 7, n. 3, p.537-557, 1989.
- MULET, A.; BERNA, A; BORRAS, M; PIÑAGA, F. Effect of flow rate on carrot drying. Drying Technology, v. 5, n. 2, p. 245-258, 1987.
- MULET, A; ROSELLÓ, C; PIÑAGA, F; CARBONEL, J. V; BERNA, A. Mecanismo e cinética del secado de zanahorias com aire caliente. Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, v. 23, n. 3, p. 369-377, 1983.

- 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.103-107, 1983.
- 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. 45 p. (Trabalho de iniciação científica).
- NASTAJ, J. F. A mathematical model for the continous vacuum drying of highly viscous foodstuffs. Drying Technology, v. 7, n. 1, p. 47-58, 1989.
- PARK, K. J. Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante secagem. Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1987. 54p. (Tese, Leve Docência em Fenômenos de Transporte).
- PATHAK, P. K; AGRAWAL, Y. C; SINGH, B. P. N. Thin-layer drying model for rapeseed. Transactions of the ASAE, v. 34, n. 6, p. 2505-2508, 1991.
- PAWAR, V. D; PATIL, D. A; KHEDKAR, D. M; INGLE, U. M. Studies on drying and rehydration of pumpkin (*Cucurbita maxima*). *Indian Food Packer*, v. 39, n. 4, 1985.
- PINTO, L. A. A; PENEIREIRO, J. K; TOBINAGA, S. Difusão líquida na secagem de músculos de peixes. Anais do XX Encontro Nacional de Meios Porosos, 1992.
- PINTO, L. A. A; TOBINAGA. Encolhimento na secagem de músculos de peixes. In: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Bahia, 1992.
- PRADO, M. E. T. Secagem de tâmaras (*Phoenix dactylifera* L.) para a obtenção de tâmara passa. Campinas – SP. Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNICAMP .1998, 149P. (Teses de doutorado).

- ROQUES, M. A; CORNISH, A. R. Phenomenological coefficients for heat and mass transfer equations in wet porous media. Drying, 1980, v. 2. Edit. Hemisphere Publisher Co, Washington.
- RODRIGUES, A. M. C. Obtenção da suspensão protéica de peixe e secagem em leite de jorro. Campinas -SP: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP. 2000, p. 148. (Tese de Doutorado).
- SARAVACOS, G. D; CHARM, S.E. A study of mechanism of fruit and vegetables dehydration. Food Technology, v. 16, n.1, 1962.
- 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.
- SHAMS, M. A; THOMPSON, D.R. Quantitative determination of pea losses as affected by conventional water blanching. Journal of Food Science, v. 52, n. 4, 1987.
- STRUMILLO, C; KUDRA, T. Drying: Principles applications and design. Edit. Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- 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. Journal of Food Science. v.41, p.1189-1194, 1976.
- TEIXEIRA, M. B. F. Secagem de manta de lula (*Loligo brasilienses*). Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 1995.

- TEIXEIRA, M. B. F; TOBINAGA, S. A diffusion model for describing water transport in round squid mantle during drying with a moisture-dependent effective diffusivity. Journal of Food Engineering, v.36, p. 169-181,1998.
- VACCAREZZA, L; CHIRIFE, J. On the mechanism of moisture transport during air drying of sugar beet root. Journal of Food Science, p. 1286-1289, 1975.
- VACCAREZZA, L.; 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; MARINO-KOURIS, D. Finite element simulation of drying of agricultural product with volumetric changes. Appl. Mathematical Modelling, v. 15, n 9, p. 475-482, 1991.
- VAN ARSDEL W. B. " Drying phenomena". In: Food Deydration. The AVI publishing company Inc., 1973.
- VERSAVEL , P. A; MUIR, W. E. Drying behavior of high-moisture-content wheat-spikes. Transactions of the ASAE, v. 31, p.1269-1263, 1988.
- WHITAKER, T; BARRE, H; HAMDY, M. Y. Theoretical and experimental studies of diffusion on spherical bodies with variable diffusion coefficient. A.S.A.E, v. 21, p. 716-723, 1969.
- YUSHENG, Z.; POULSEN, K. P. (1988). Diffusion in potato drying. Journal of food Engineering, v. 7, p 249-262.

APENDICE A

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 da cenoura e abóbora 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 100⁰ C em estufa (marca Fanem modelo 320 -SE) e de massa conhecida. As amostras foram levadas a estufa de circulação forçada a 100⁰ 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 amostra pode ser calculado da seguinte forma:

$$X = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{água}} + m_s} = \frac{m_a - m_f}{m_a}$$

Onde::

X= umidade da amostra em base úmida;

m_a = massa da amostra antes da secagem;

m_f = massa da amostra após secagem;

m_s = massa seca da amostra;

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

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

$$X_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_s} = \frac{m_a - m_f}{m_f}$$

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 do 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 cartucho de Soxhlet.

Materiais:

Cartucho de Soxhlet;

Extrator tipo de Soxhlet;

Éter etílico anidro e algodão desengordurado;

Balões de fundo chato de 250ml;

Dessecador e estufa reguladora a 105⁰ C.

Pesar 2 a 5 g de matéria 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 105⁰ 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 de Proteínas.

Método utilizado: Micro-Kjeldahl (AOAC, 1984). Baseia-se na determinação de nitrogênio total da amostra, que através de calculo é convertido em nitrogênio protéico. Para tanto, considera-se que cada 100g de proteína contém em média 16g de nitrogênio, obtendo-se desse modo fator 6,25 que multiplicado pelo percentuaal de nitrogênio total da amostra, dará o percentual de proteína da mesma.

Uma massa conhecida da amostra seca e desengordurada (inferior a 100g) foi colocada no balão de Kjeldahl. Adicionou-se ao balão 1,9± 0,1g de K₂ SO₄, 40 mg de Hg O e 3 a 5 ml de H₂ SO₄. 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 - Na₂ S₂ O₃. O destilado foi coletado em erlenmeyer contendo 5 ml da solução saturada de ácido bórico (H₃ BO₃) e 3 a 5 gotas de indicador (verde de bromocresol-vermelho de metila). Foi coletada aproximadamente 50ml de 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 de seguinte forma:

$$\%N = \frac{N_{HCl} \cdot V \cdot 14}{A}$$

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

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

Preparo das soluções:

1- Solução de NaOH. Na₂ S₂ O₃. 5H₂ O : Dissolver 600g NaOH em 700ml de água destilada aproximadamente; dissolver 50g de Na₂ S₂ O₃. 5H₂ O em 150ml de H₂O destilada ; juntar à solução de NaOH lentamente, evitando aquecimento. Completar o volume para 1000ml.

2- Indicador: preparar solução alcoólica de vermelho de metila a 0,2% e de verde de bromocresol a 0,2%. Misturar um aprte de vermelho de metila com 5 partes de de solução de bromocresol.

3- Solução de HCl 0,02N: medir 1,97ml de HCl e diluir para 1000 com água 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 0,02 N: pesar exatamente 0,3152g de ácido oxálico e diluir para 250ml com água destilada.

6- Solução de ácido bórico: pesar 20g e acrescentar 1000ml com água destilada.

7- Para achar o fator de correção de NaOH: pipetar 5ml de ácido oxálico 0,02N no erlenmeyer. Pingar 3 gotas de fenolftaleína a 1% em um pouco de H₂O (aproximadamente 20ml). Colocar na bureta NaOH 0,02. Fazer a titulação.

8- Para achar o fator de correção de HCl 0,02N: pipetar 5 ml de NaOH 0,02N no erlenmeyer com um pouco de H₂O. 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 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, seguido 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 iniciara prática foi preparado um cadinho de Gooch com algodão de vidro, aquecido em forno mufla a 550⁰ 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 um solução de H₂ SO₄ 1,25% aquecida em ebulição sobre o material do béquer, até a marca de 200ml. A solução foi fervida exatamente 30 minutos. Filtrou-se à vácuo o líquido ainda 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 30 minutos. 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 105⁰ C, pesado, incinerado em mufla a 550⁰ 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 de 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 550⁰ 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. Determinação de Açúcares – Método Antrona.

- Fundamento:

É um método específico para hexoses. Fundamenta-se na hidrólise pelo ácido sulfúrico concentrado, que quando aquecido pela hexose sofre reação de

condensação, formando um produto de coloração verde, cuja intensidade da cor é lida em espectrofotômetro 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 (19146) 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 hidroximetilfural (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 Dihydro-9 oxoantraceno)

Ácido sulfúrico concentrado P.A .

Solução padrão de glicose (200 μ g/ml)

-Vidraria: beckers de 250ml; bastão de vidro; funil; pipetas de 1, 10 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 de amostra em cápsula de porcelana. Transferir para erlenmeyer de 250ml com auxílio de 50ml de álcool, aproximadamente, a 70% e adicionar cerca de 0,5g de carbonato de cálcio.

Manter em banho-maria a 80-85⁰ 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 aquecida 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 125ml.

Adicionar 0,5ml de HCl, ferver 15 minutos em banho-maria.

Resfriar e neutralizar com solução saturada de Na₂CO₃.

Completar o volume para 50ml com água destilada. Dosear

APENDICE B

B1: Dados das curvas de secagem de cenoura congelada na temperatura de 70, 60 e 50 °C e pressão de 5 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,00	1,00	1,00
0,50	0,32	0,38	0,51
1,00	0,15	0,21	0,29
1,50	0,08	0,15	0,22
2,00	0,036	0,088	0,14
2,50	0,014	0,053	0,092
3,00	0,005	0,022	0,056
3,50	0,0033	0,0042	0,033
4,00	0,0022	0,0038	0,0094
5,00	0,001	0,0015	0,004
6,00	0,001	0,0011	0,0035

B2: Dados das curvas de secagem de cenoura congelada na temperatura de secagem de 70, 60 e 50 °C e pressão de 15 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 (°C)	60 (°C)	50 (°C)
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,00	1,00	1,00
0,50	0,4019	0,4506	0,6035
1,00	0,2109	0,2795	0,4209
1,50	0,1373	0,2140	0,2812
2,00	0,1010	0,1412	0,2122
2,50	0,0465	0,1043	0,1492
3,00	0,0261	0,0896	0,1194
3,50	0,0132	0,0697	0,1079
4,00	0,0090	0,0382	0,0763
4,50	0,0081	0,0119	0,0305
5,00	0,0062	0,0089	0,0113
5,50	0,0022	0,0071	0,0082
6,00	0,0019	0,0034	0,0039

B3: Dados das curvas de secagem de cenoura congelada na temperatura de secagem de 70, 60 e 50 °C e pressão de 25 kPa

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 (°C)	60 (°C)	50 (°C)
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,5800	0,6502	0,6806
1,00	0,3594	0,4494	0,5305
1,50	0,2295	0,2973	0,3945
2,00	0,1592	0,2496	0,3197
2,50	0,0947	0,1801	0,2442
3,00	0,0785	0,1411	0,2082
3,50	0,0478	0,0734	0,1400
4,00	0,0364	0,0600	0,0904
4,50	0,0323	0,0418	0,0597
5,00	0,0085	0,0199	0,0294
5,50	0,0071	0,0084	0,0097
6,00	0,0069	0,0082	0,0085

B4: Dados das curvas de secagem de cenoura branqueada na temperatura de 70, 60 e 50 °C e pressão de 5 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,39	0,47	0,53
1,00	0,21	0,29	0,36
1,50	0,12	0,19	0,27
2,00	0,07	0,11	0,17
2,50	0,033	0,06	0,125
3,00	0,019	0,043	0,088
3,50	0,014	0,025	0,038
4,00	0,008	0,0094	0,012
5,00	0,0018	0,0019	0,0031

B5: Dados das curvas de secagem de cenoura branqueada na temperatura de 70, 60 e 50 °C e pressão de 15 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,4302	0,5604	0,6497
1,00	0,2513	0,3510	0,4505
1,50	0,1895	0,2401	0,3095
2,00	0,1400	0,1798	0,2496
2,50	0,1114	0,1398	0,1794
3,00	0,0803	0,0882	0,1401
3,50	0,0574	0,0779	0,1094
4,00	0,0422	0,0452	0,0642
4,50	0,0112	0,0204	0,0422
5,00	0,0080	0,0194	0,0143
5,50	0,0061	0,0083	0,0086
6,00	0,0022	0,0032	0,0043

B6: Dados das curvas de secagem de cenoura branqueada na temperatura de 70, 60 e 50 °C e pressão de 25 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,5703	0,6204	0,6707
1,00	0,3500	0,4199	0,5396
1,50	0,2312	0,3102	0,4148
2,00	0,1494	0,2396	0,3398
2,50	0,1031	0,1793	0,2401
3,00	0,0793	0,1413	0,2099
3,50	0,0612	0,0843	0,1599
4,00	0,0318	0,0578	0,1057
4,50	0,0191	0,0301	0,0694
5,00	0,0155	0,0228	0,0491
5,50	0,0079	0,0087	0,0140
6,00	0,0071	0,0083	0,0088
6,50	0,0060	0,0078	0,0080
7,00	0,0036	0,0040	0,0050

B7: Dados das curvas de secagem de cenoura “in natura” nas temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C e pressão de 5 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,41	0,53	0,65
1,00	0,23	0,356	0,43
1,50	0,17	0,249	0,34
2,00	0,12	0,19	0,25
2,50	0,065	0,14	0,19
3,00	0,041	0,09	0,145
3,50	0,028	0,062	0,092
4,00	0,015	0,04	0,07
4,50	0,008	0,015	0,025
5,00	0,0019	0,0025	0,0035
6,00	0,0011	0,0022	0,0025

B8: Dados das curvas de secagem de cenoura “in natura” nas temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C e pressão de 15 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70	60	50
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,4503	0,5803	0,7099
1,00	0,2703	0,3867	0,5400
1,50	0,2115	0,2896	0,4122
2,00	0,1603	0,2004	0,3236
2,50	0,1196	0,1603	0,2595
3,00	0,0884	0,1199	0,2099
3,50	0,0647	0,0926	0,1513
4,00	0,0544	0,0844	0,1280
4,50	0,0291	0,0542	0,0641
5,00	0,0198	0,0398	0,0431
5,50	0,0089	0,0094	0,0223
6,00	0,0072	0,0081	0,0082

B9: Dados das curvas de secagem de cenoura “in natura” nas temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C e pressão de 25 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,5898	0,6907	0,7057
1,00	0,4195	0,5089	0,5496
1,50	0,2863	0,3802	0,4437
2,00	0,2093	0,3113	0,3499
2,50	0,1445	0,2298	0,2794
3,00	0,0972	0,1492	0,1742
3,50	0,0545	0,0881	0,1193
4,00	0,0348	0,0551	0,0892
4,50	0,0218	0,0297	0,0596
5,00	0,0102	0,0198	0,0391
5,50	0,0083	0,0110	0,0197
6,00	0,0071	0,0081	0,0080
6,50	0,0043	0,0040	0,0073
7,00	0,0024	0,0024	0,0042

B10: Dados das curvas de secagem de abóbora congelada nas temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C e pressão de 5 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,280	0,370	0,460
1,00	0,122	0,180	0,280
1,50	0,045	0,075	0,166
2,00	0,013	0,044	0,099
2,50	0,0081	0,011	0,080
3,00	0,004	0,0077	0,033
3,50	0,0021	0,0033	0,010
4,00	0,001	0,0017	0,0025
5,00		0,0013	0,0015

B11: Dados das curvas de secagem de abóbora congelada nas temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C e pressão de 15 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,3798	0,5026	0,5800
1,00	0,2001	0,2979	0,3811
1,50	0,0944	0,1411	0,2255
2,00	0,0509	0,0944	0,1528
2,50	0,0166	0,0368	0,1071
3,00	0,0095	0,0150	0,0495
3,50	0,0083	0,0138	0,0340
4,00	0,0055	0,0086	0,0088
4,50	0,0025	0,0046	0,0051
5,00	0,0024	0,0044	0,0031

B12: Dados das curvas de secagem de abóbora congelada nas temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C e pressão de 25 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,4305	0,6018	0,6528
1,00	0,2502	0,3927	0,4606
1,50	0,1401	0,2587	0,3037
2,00	0,0836	0,1696	0,1900
2,50	0,0705	0,0946	0,1317
3,00	0,0225	0,0221	0,0804
3,50	0,0136	0,0146	0,0395
4,00	0,0094	0,0118	0,0107
4,50	0,0075	0,0095	0,0085
5,00	0,0065	0,0085	0,0081
6,00	0,0045	0,0065	0,0065

B13: Dados das curvas de secagem de abóbora branqueada nas temperaturas de secagem de 70, 60 e 50 °C e pressão de 5 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,320	0,460	0,510
1,00	0,150	0,250	0,370
1,50	0,063	0,140	0,210
2,00	0,034	0,093	0,150
2,50	0,010	0,057	0,088
3,00	0,0061	0,032	0,055
3,50	0,003	0,010	0,040
4,00	0,0018	0,0027	0,009
5,00	0,0012	0,0018	0,003
6,00	0,000	0,0013	0,0017

B14: Dados das curvas de secagem de abóbora branqueada nas temperaturas de secagem de 70, 60 e 50 °C e pressão de 15 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70° C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,4305	0,5399	0,5902
1,00	0,2499	0,3210	0,4129
1,50	0,1304	0,1803	0,2404
2,00	0,0799	0,1205	0,1904
2,50	0,0617	0,0846	0,1105
3,00	0,0256	0,0615	0,0838
3,50	0,0103	0,0200	0,0404
4,00	0,0087	0,0088	0,0096
4,50	0,0045	0,0040	0,0077
5,00	0,0026	0,0036	0,0046
6,00	0,0002	0,0004	0,0021

B15: Dados das curvas de secagem de abóbora branqueada nas temperaturas de secagem de 70, 60 e 50 °C e pressão de 25 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,4448	0,5489	0,6669
1,00	0,2626	0,3447	0,4828
1,50	0,1697	0,2597	0,3277
2,00	0,0945	0,1716	0,2056
2,50	0,0716	0,1108	0,1516
3,00	0,0502	0,0701	0,0936
3,50	0,0201	0,0397	0,0454
4,00	0,0105	0,0176	0,0199
4,50	0,0084	0,0097	0,0145
5,00	0,0075	0,0085	0,0088
6,00	0,0054	0,0057	0,0063

B16: Dados das curvas de secagem de abóbora in natura nas temperaturas de secagem de 70, 60 e 50 °C e pressão de 5 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,380	0,490	0,550
1,00	0,190	0,320	0,390
1,50	0,100	0,160	0,250
2,00	0,062	0,099	0,180
2,50	0,035	0,053	0,096
3,00	0,010	0,027	0,061
3,50	0,007	0,0206	0,028
4,00	0,0045	0,0117	0,0126
4,50	0,0022	0,072	0,0095
5,00	0,0015	0,0055	0,0063
6,00	0,000	0,0021	0,0022

B17: Dados das curvas de secagem de abóbora in natura nas temperaturas de secagem de 70, 60 e 50 °C e pressão de 15 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,4500	0,5428	0,6303
1,00	0,2676	0,3397	0,4301
1,50	0,1499	0,2201	0,2698
2,00	0,0916	0,1500	0,1987
2,50	0,0681	0,0826	0,1200
3,00	0,0254	0,0267	0,0608
3,50	0,0185	0,0206	0,0215
4,00	0,0093	0,0118	0,0126
4,50	0,0070	0,0085	0,0095
5,00	0,0046	0,0055	0,0057
6,00	0,0018	0,0049	0,0052

B18: Dados das curvas de secagem de abóbora in natura nas temperaturas de secagem de 70, 60 e 50 °C e pressão de 25 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$	$(X-X_e)/(X_o-X_e)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
0,50	0,5003	0,5828	0,6940
1,00	0,2861	0,3701	0,5039
1,50	0,1917	0,2719	0,3356
2,00	0,1045	0,1966	0,2396
2,50	0,0502	0,0987	0,1686
3,00	0,0182	0,0818	0,1068
3,50	0,0159	0,0404	0,0796
4,00	0,0136	0,0295	0,0410
4,50	0,0085	0,0175	0,0280
5,00	0,0079	0,0085	0,0094
6,00	0,0056	0,0065	0,0083

APENDICE C

C.1. Efeito dos pré-tratamentos sobre a cinética de secagem da cenoura.

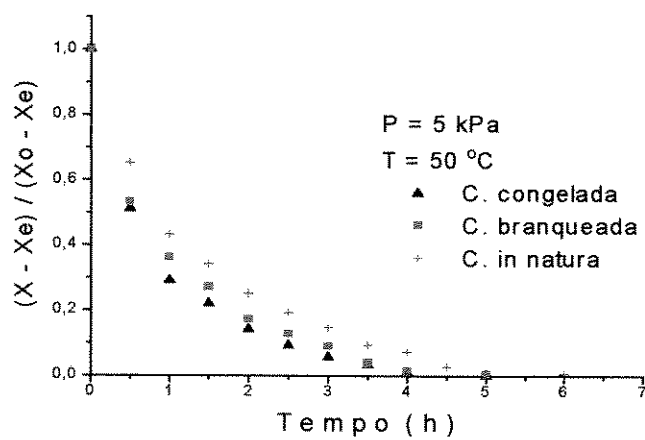
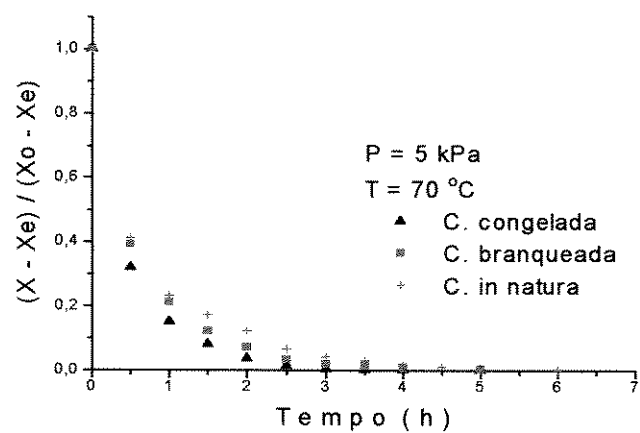


Figura C1. Efeito dos pré-tratamentos sobre a cinética de secagem da cenoura a 5 kPa e temperaturas de secagem de 70 °C e 50 °C.

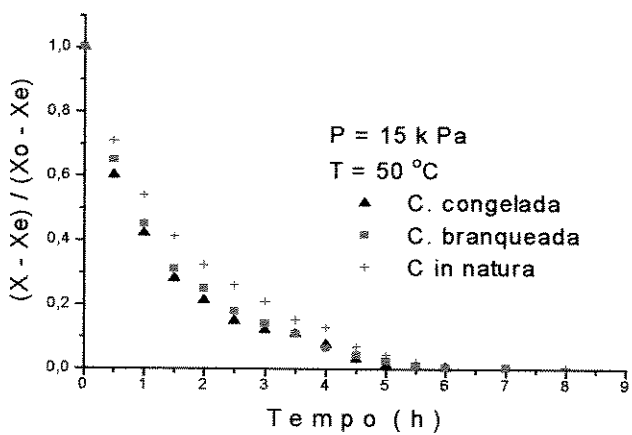
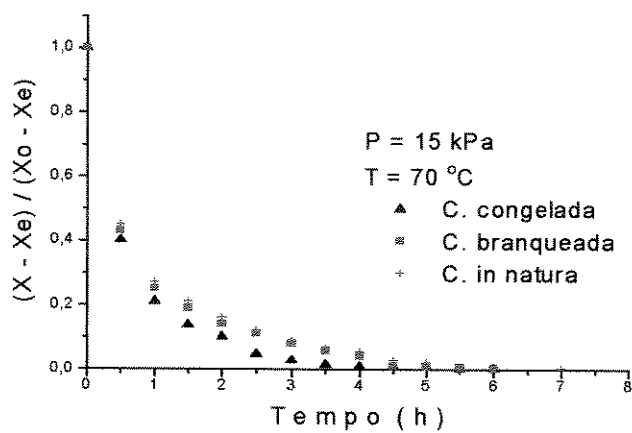


Figura C2. Efeito dos pré-tratamentos sobre a cinética de secagem da cenoura a 15 kPa e temperaturas de secagem de 70 °C e 50 °C.

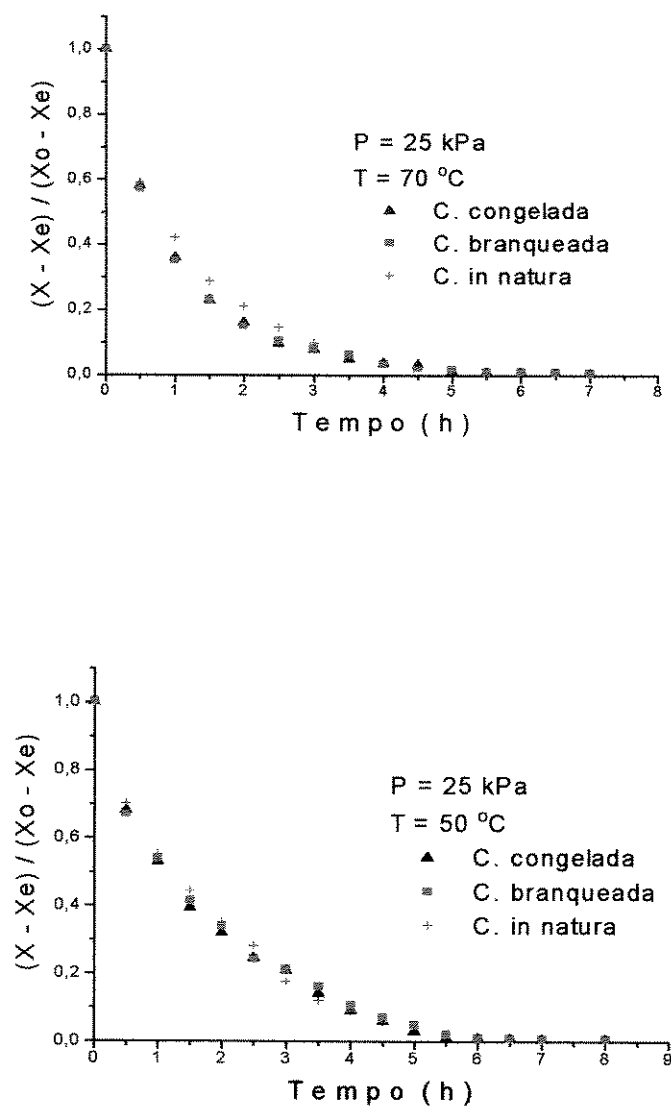


Figura C3. Efeito dos pré-tratamentos sobre a cinética de secagem da cenoura a 25 kPa e temperaturas de secagem de 70 °C e 50 °C.

C.2. Efeito dos pré-tratamentos sobre a cinética de secagem da abóbora.

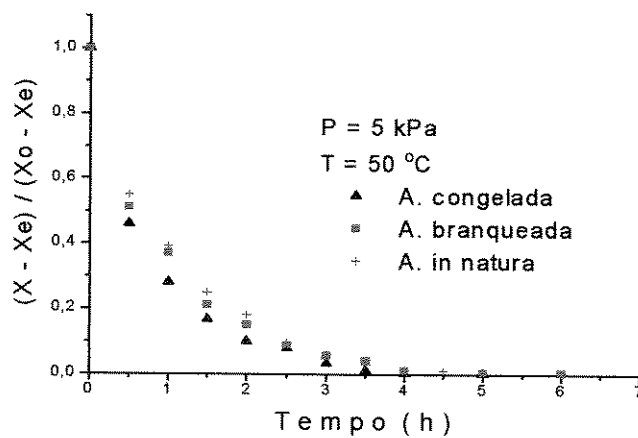
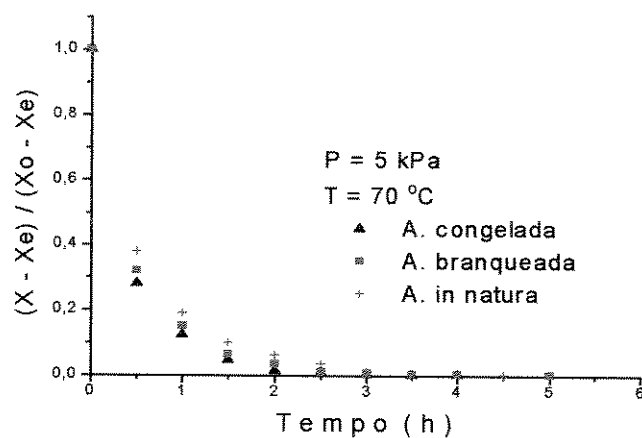
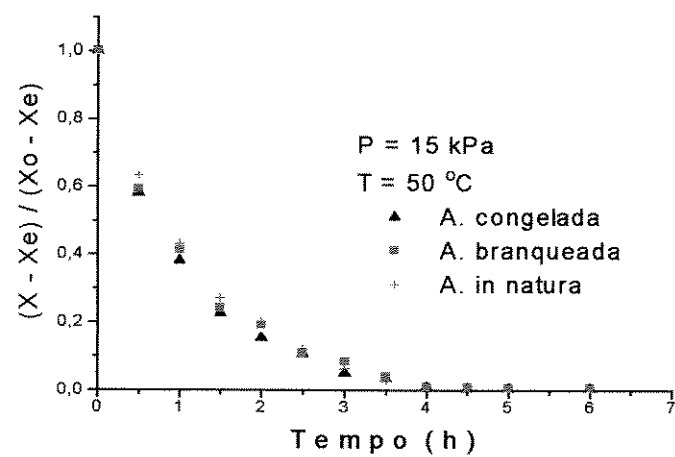
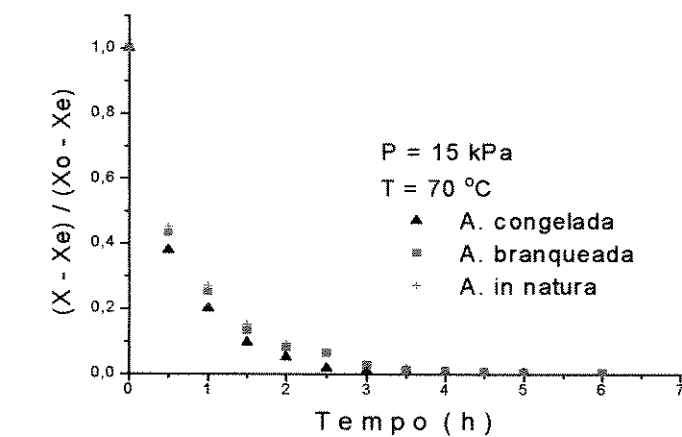
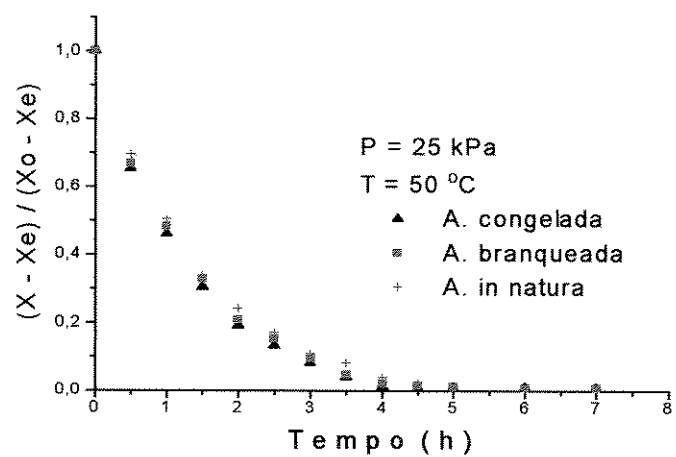
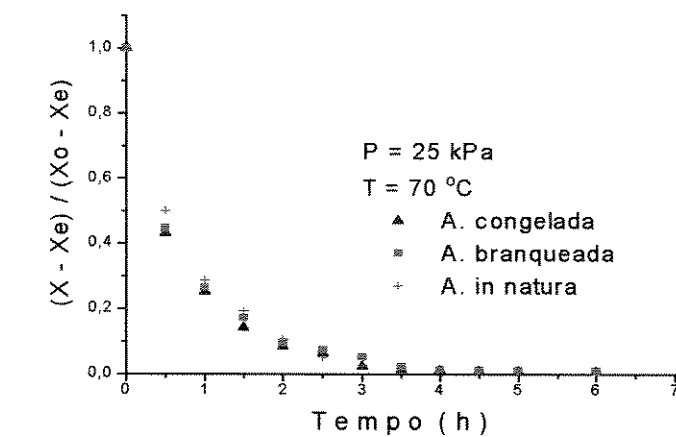


Figura C4. Efeito dos pré-tratamentos sobre a cinética de secagem da abóbora a 5 kPa e temperaturas de secagem de 70 °C e 50 °C.



(c)

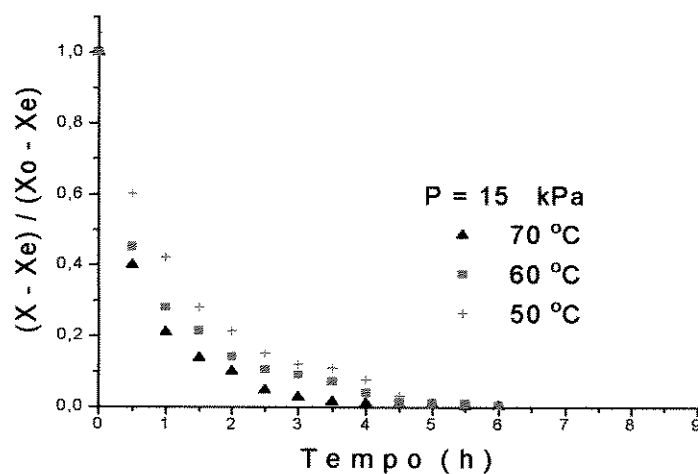
Figura C5. Efeito dos pré-tratamentos sobre a cinética de secagem da abóbora a 15 kPa e temperaturas de secagem de 70 °C e 50 °C.



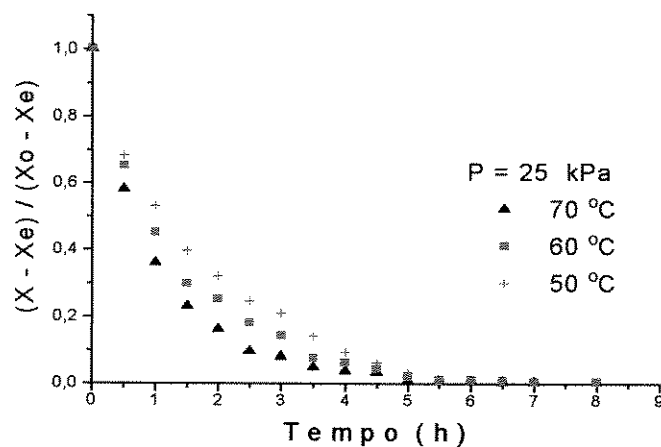
(c)

Figura C6. Efeito dos pré-tratamentos sobre a cinética de secagem da abóbora a 25 kPa e temperaturas de secagem de 70 °C e 50 °C.

C.3 Efeito da temperatura de secagem na cenoura.



(b)



(b)

Figura C7. Umidade adimensional em função do tempo para a secagem de cenoura congelada à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de (a) 15 kPa e (b) 25 kPa.

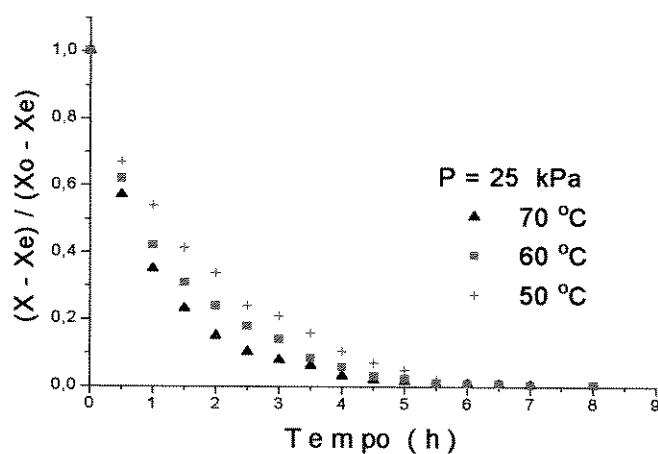
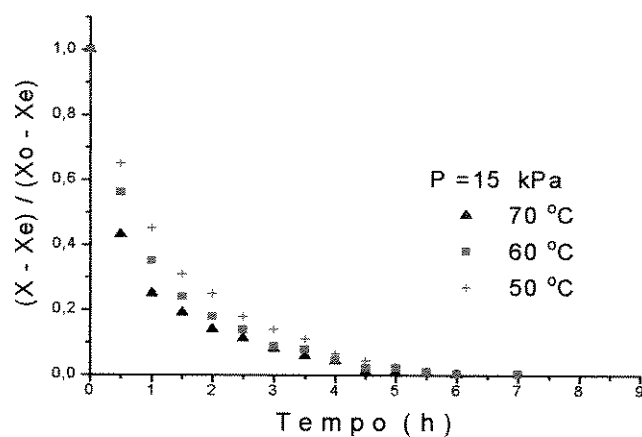


Figura C.8 - Umidade adimensional em função do tempo para secagem de cenoura branqueada à temperatura de 50, 60 e 70 °C a pressão de: (a) 5 kPa, (b) 15 kPa e (c) 25 kPa

APENDICE D.

D.1. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura.

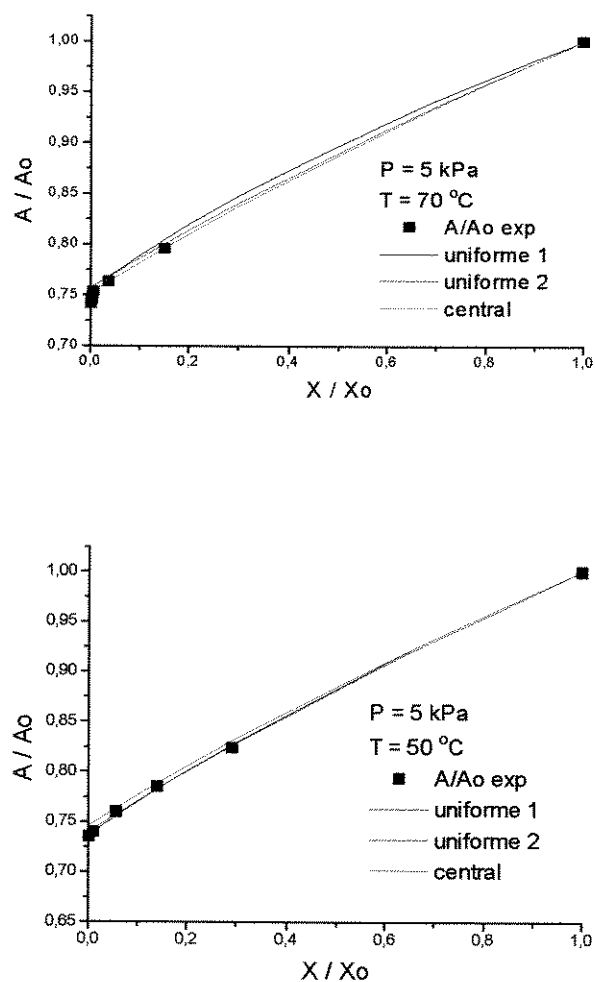


Figura D1. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura congelada na pressão de 5 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

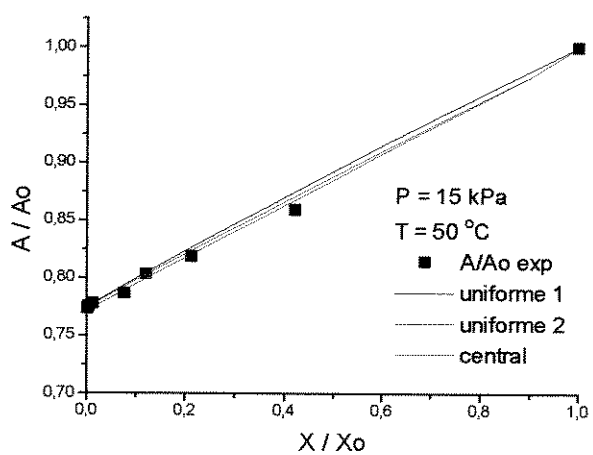
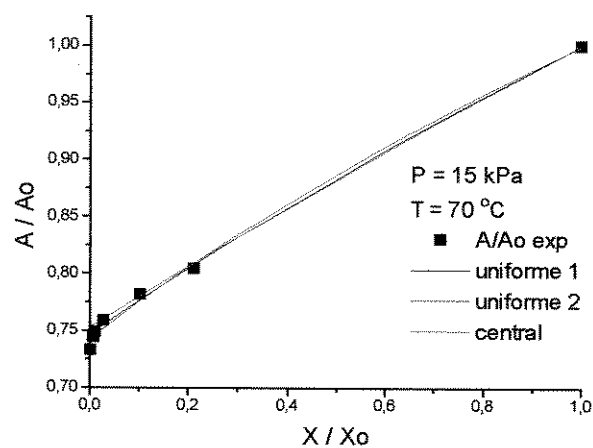


Figura D2. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura congelada na pressão de 15 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

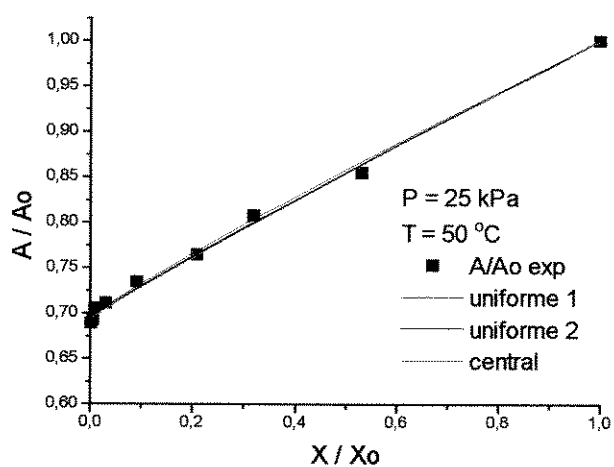
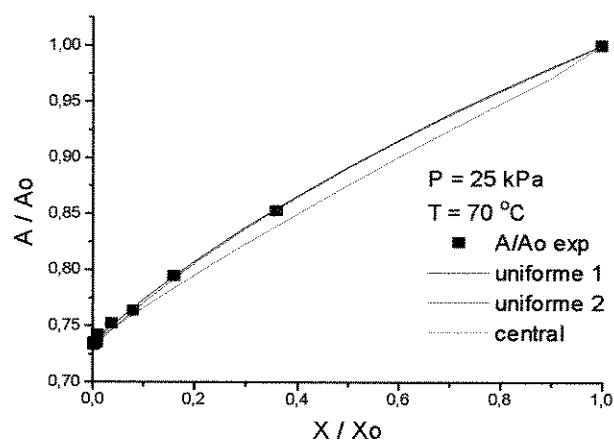


Figura D3. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura congelada na pressão de 25 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

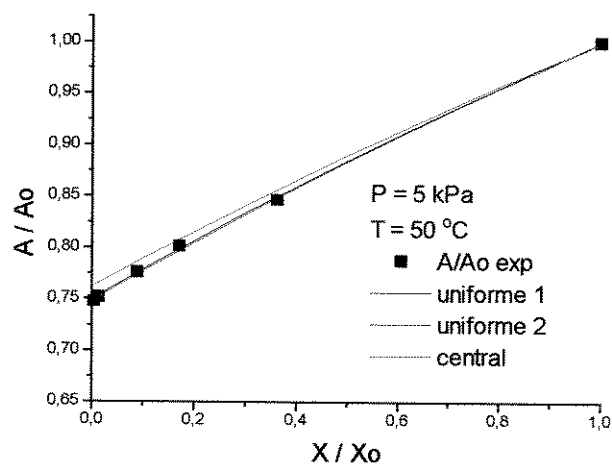
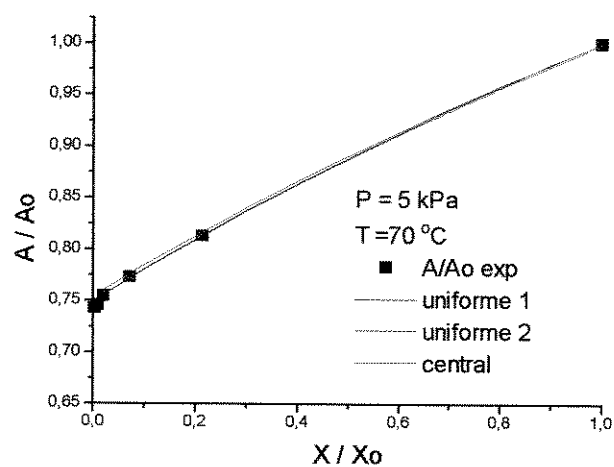


Figura D4. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura branqueada na pressão de 5 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

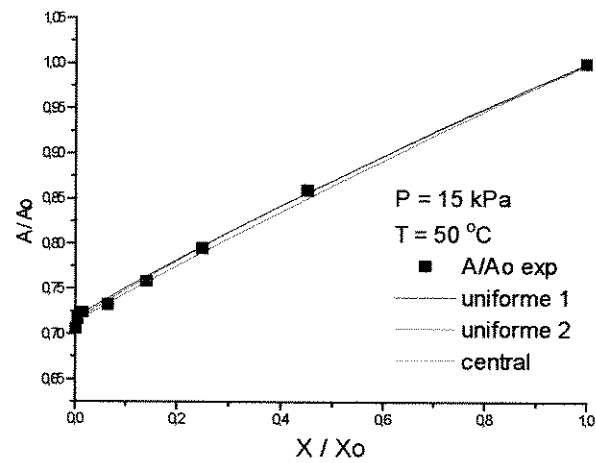
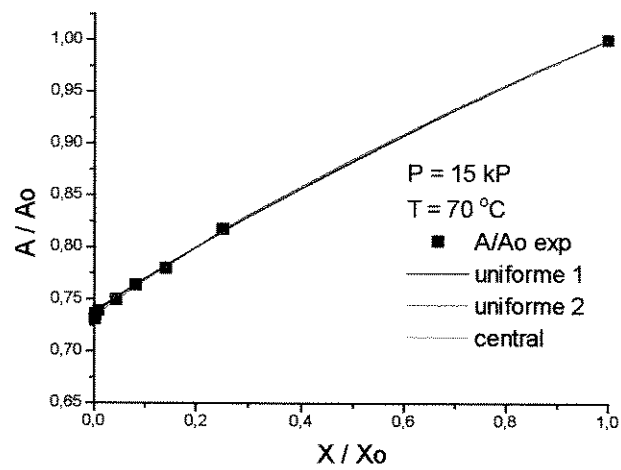


Figura D5. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura branqueada na pressão de 15 kPa e temperaturas de 70 e 50 $^{\circ}\text{C}$.

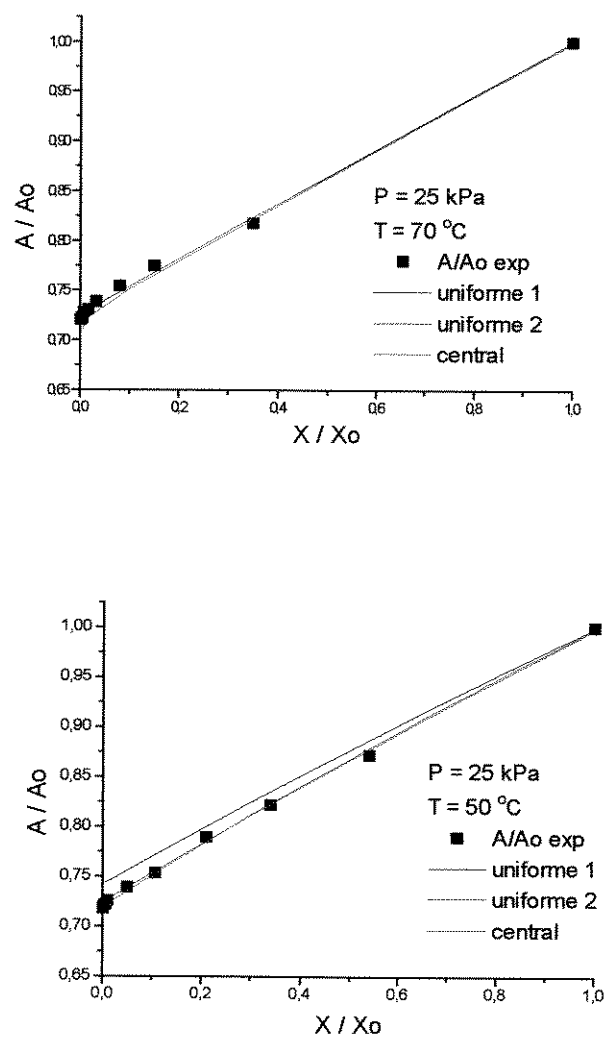


Figura D6. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura branqueada na pressão de 25 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

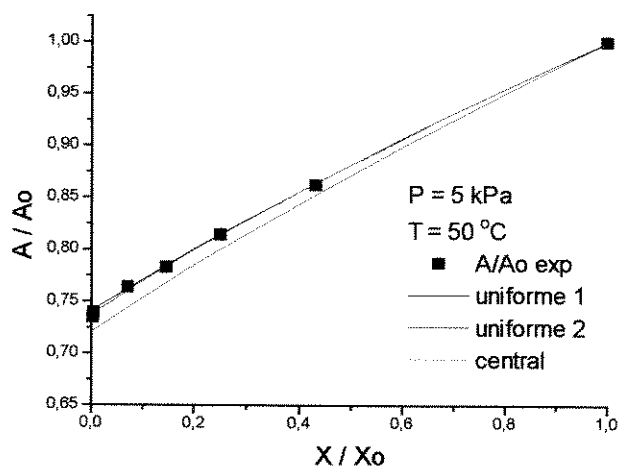
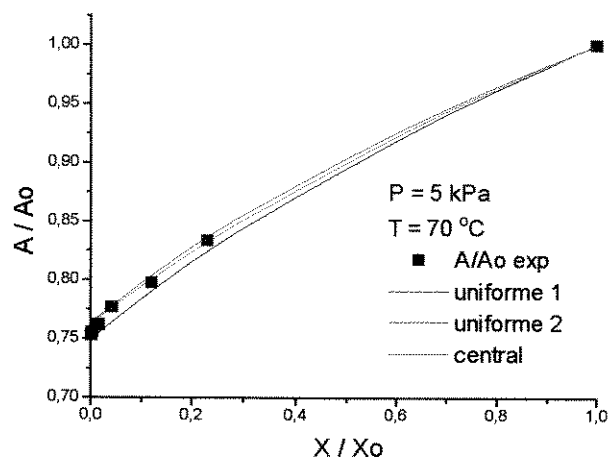


Figura D7. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura “in natura” na pressão de 5 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

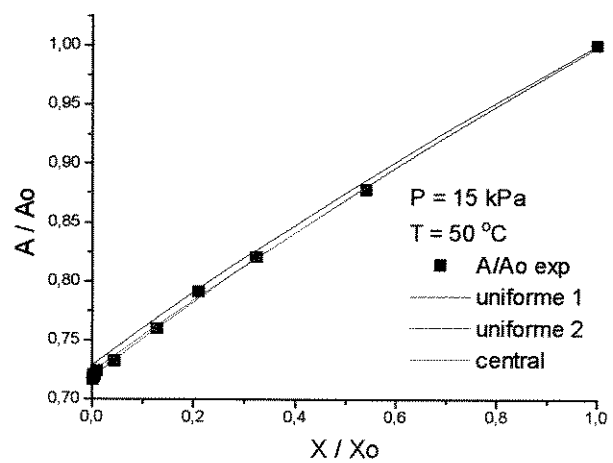
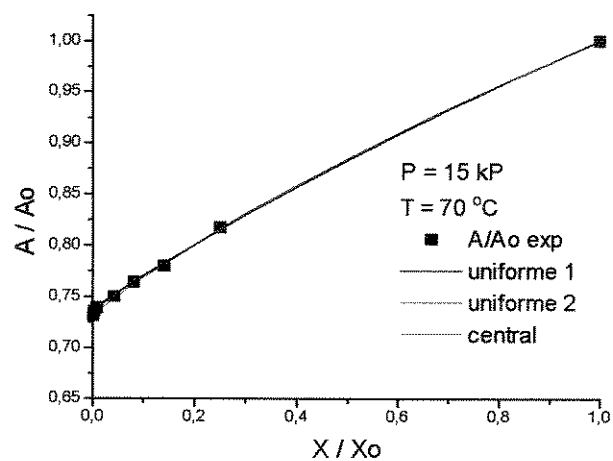


Figura D8. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura “in natura” na pressão de 15 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

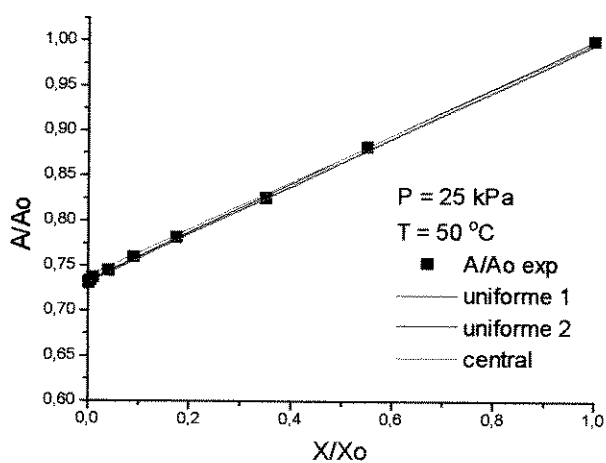
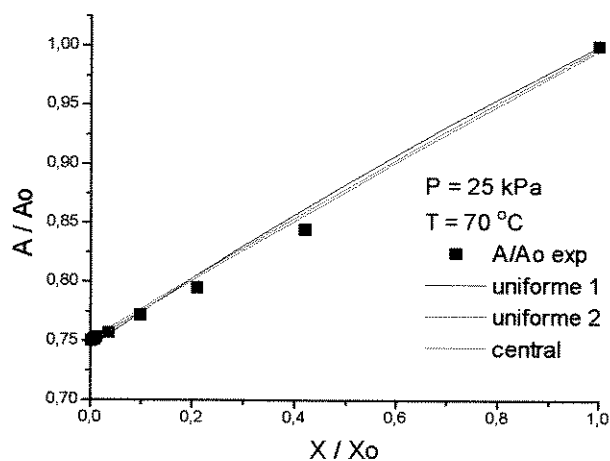


Figura: D9. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para cenoura “in natura” na pressão de 25 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

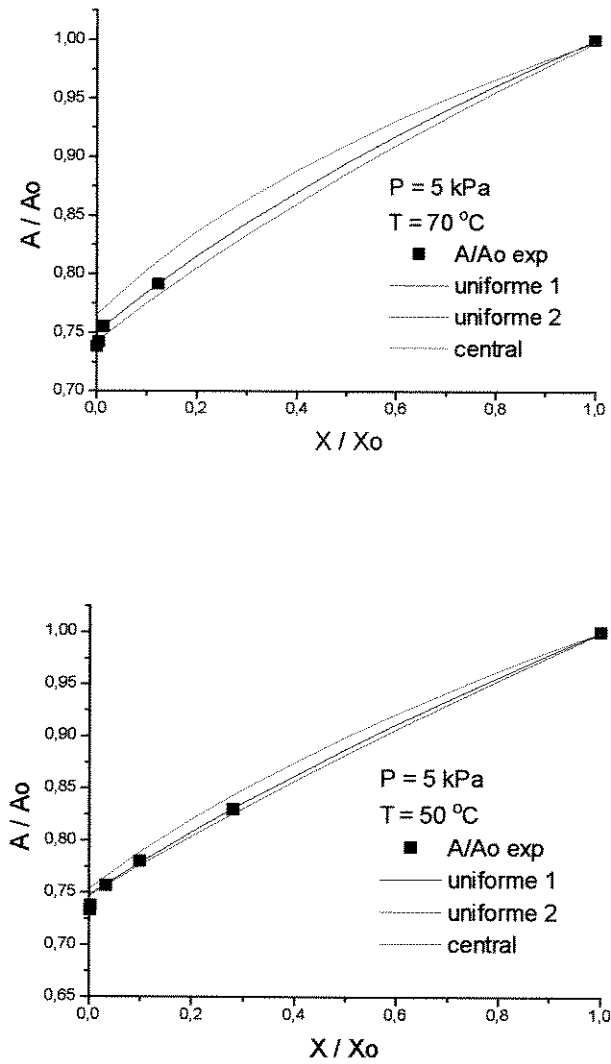


Figura D10. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora congelada na pressão de 5 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

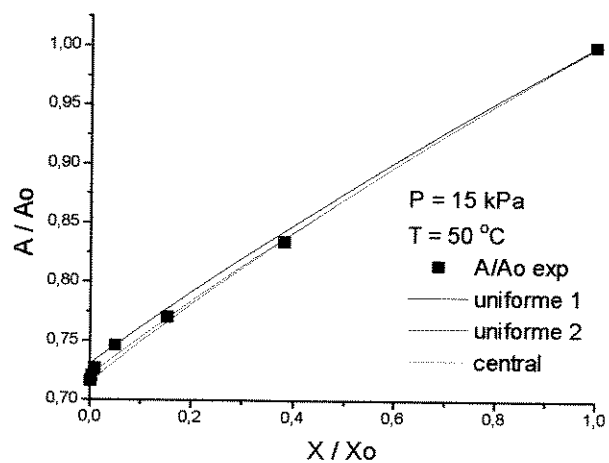
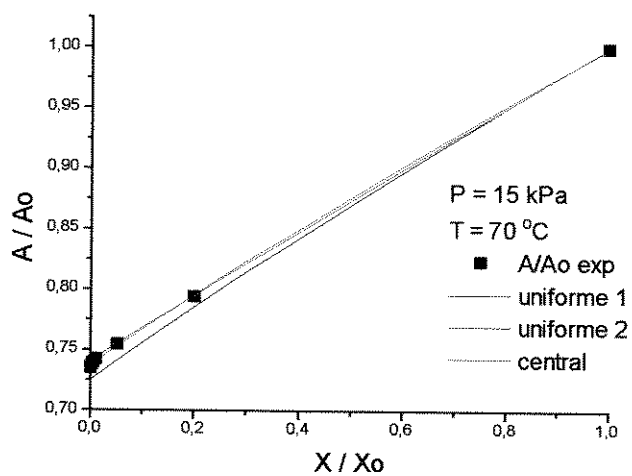


Figura D11. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora congelada na pressão de 15 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

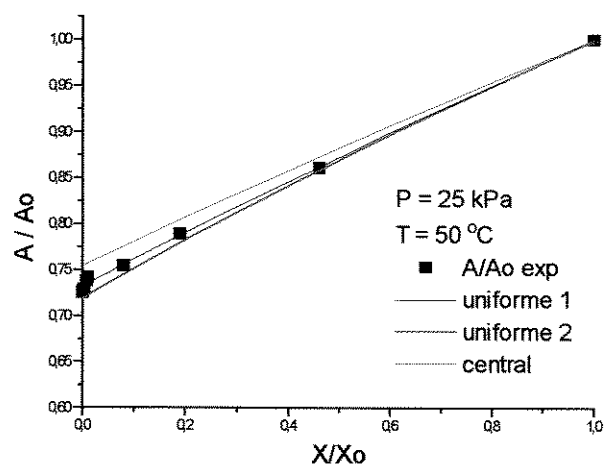
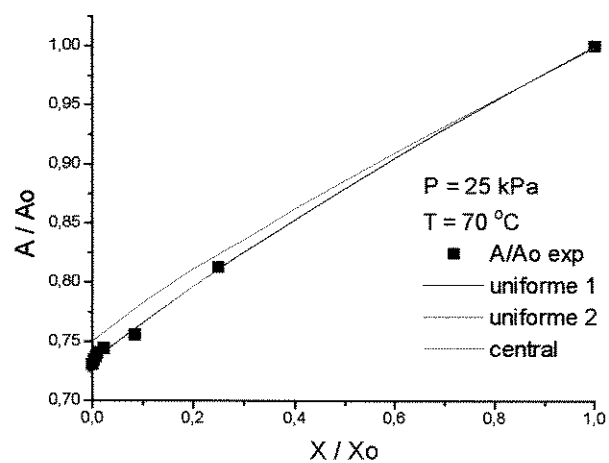


Figura D12. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora congelada na pressão de 25 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

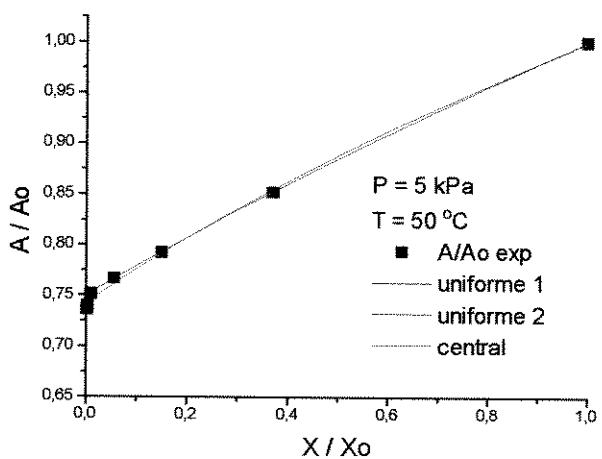
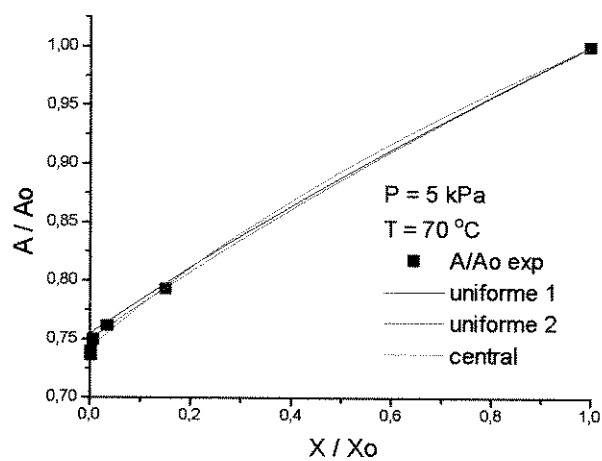


Figura D13. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora branqueada na pressão de 5 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

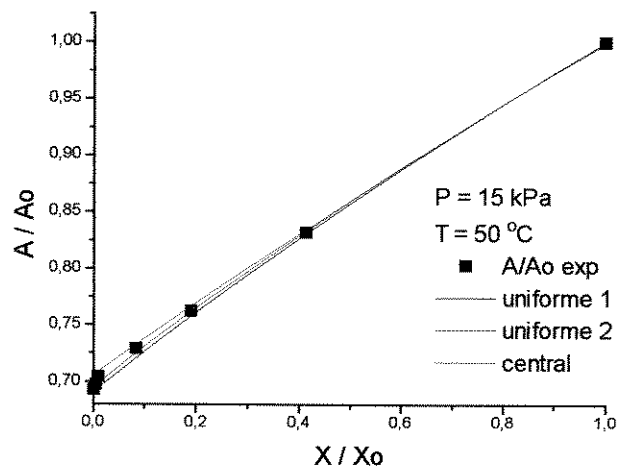
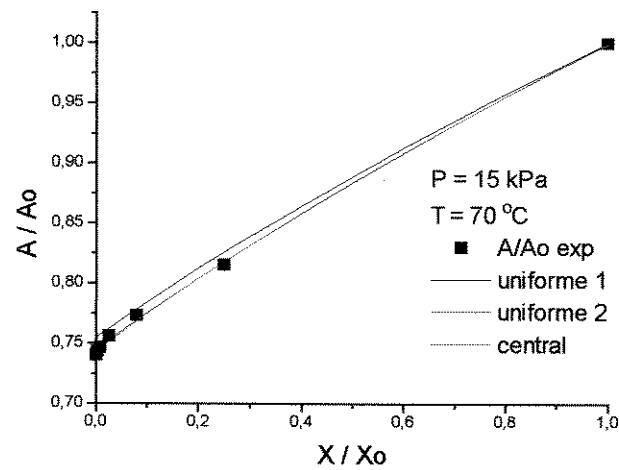


Figura D14. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora branqueada na pressão de 15 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

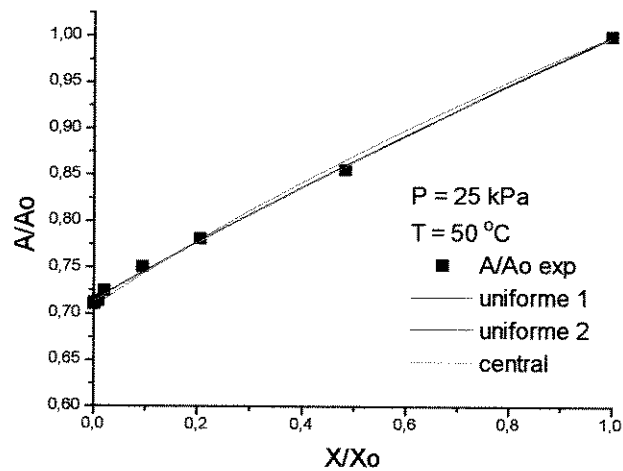
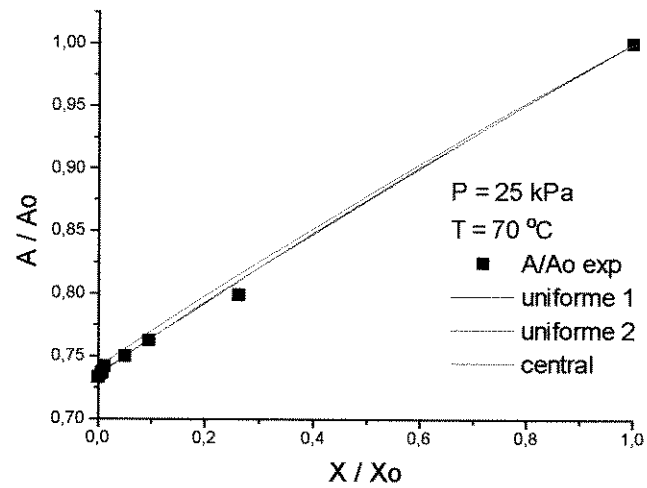


Figura D15. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora branqueada na pressão de 25 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

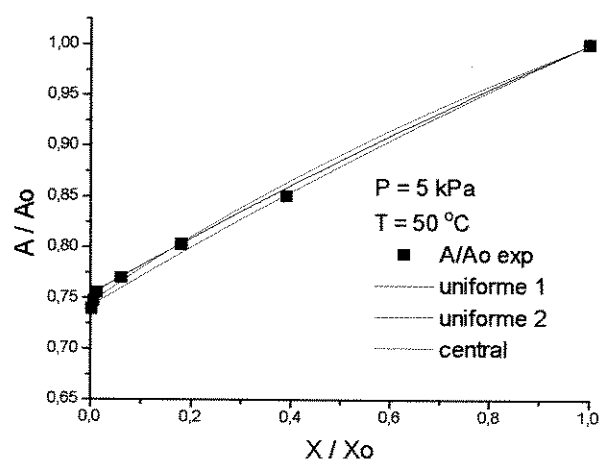
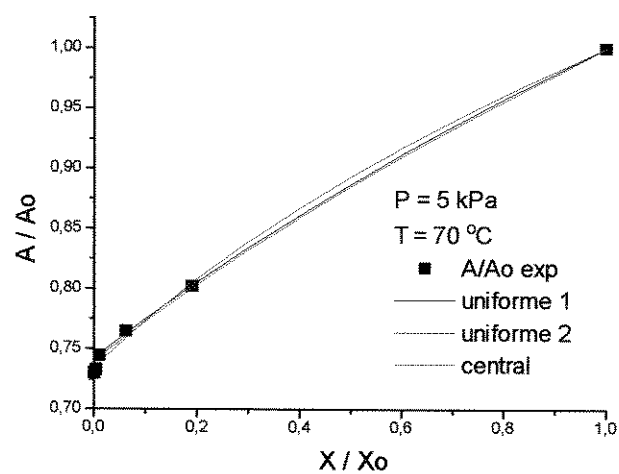


Figura D16. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora ‘in natura’ na pressão de 5 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

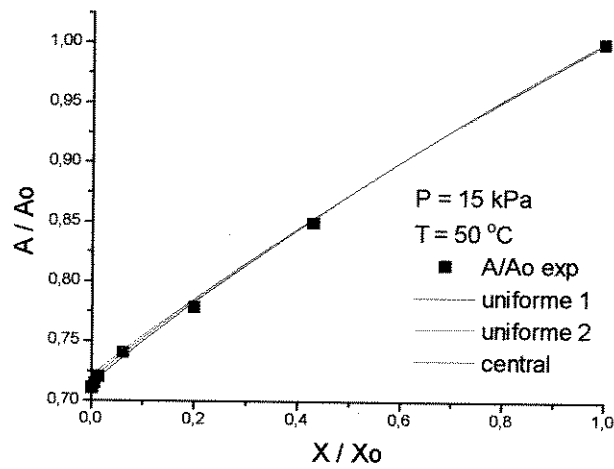
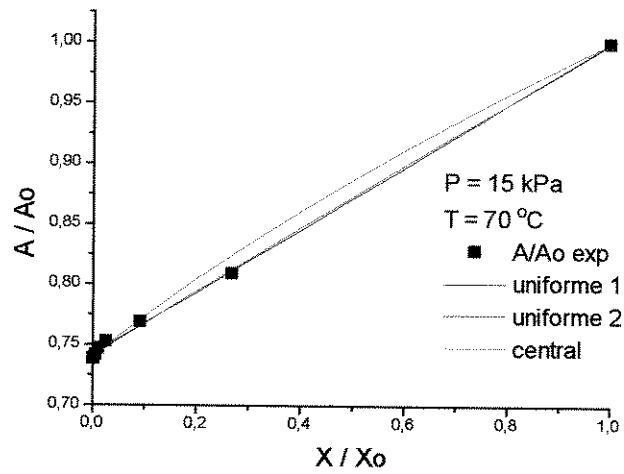


Figura D17. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora ‘in natura” na pressão de 15 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

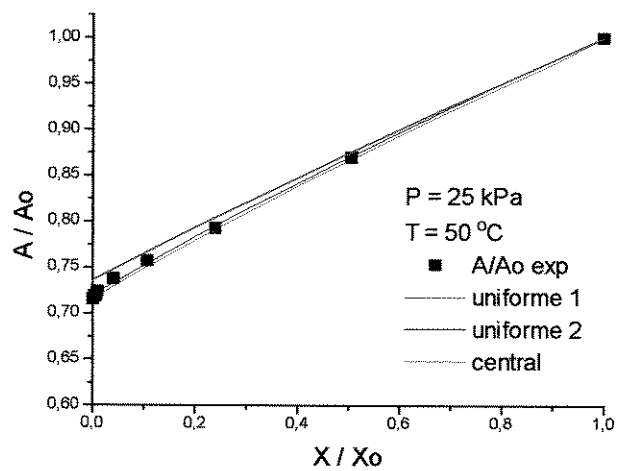
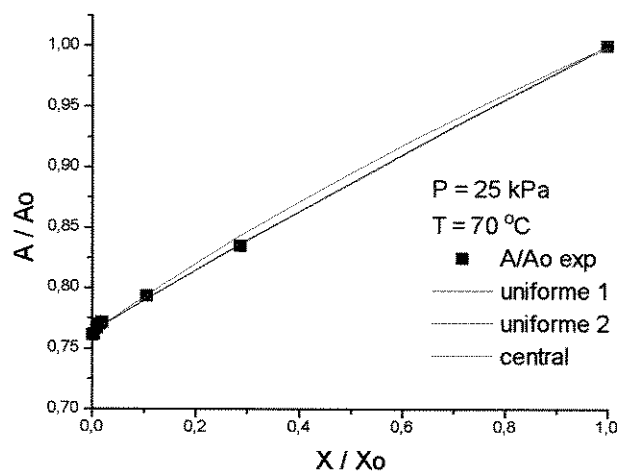


Figura D18. Comparação entre os modelos uniforme 1, uniforme 2 e central para abóbora ‘in natura’ na pressão de 25 kPa e temperaturas de 70 e 50 °C.

APENDICE E.

E1: Dados de concentração de umidade de cenoura congelada na temperatura de 70, 60 e 50 °C e pressão de 5 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(C-Ce)/(Co-Ce)$	$(C-Ce)/(Co-Ce)$	$(C-Ce)/(Co-Ce)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
1,00	0,3750	0,4400	0,5340
2,00	0,1090	0,2240	0,3400
3,00	0,0160	0,0660	0,1570
4,00	0,0070	0,0073	0,0280
5,00	0,0001	0,00012	0,00015

E2: Dados de concentração de umidade de cenoura branqueada na temperatura de 70, 60 e 50 °C e pressão de 5 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(C-Ce)/(Co-Ce)$	$(C-Ce)/(Co-Ce)$	$(C-Ce)/(Co-Ce)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
1,00	0,4150	0,5000	0,5800
2,00	0,1890	0,2570	0,3300
3,00	0,0530	0,1120	0,2110
4,00	0,0210	0,0240	0,0400
5,00	0,00013	0,00016	0,00018

E3: Dados de concentração de umidade de cenoura “in natura” na temperatura de 70, 60 e 50 °C e pressão de 5 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(C-Ce)/(Co-Ce)$	$(C-Ce)/(Co-Ce)$	$(C-Ce)/(Co-Ce)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
1,00	0,4700	0,5800	0,6300
2,00	0,2800	0,3600	0,4200
3,00	0,1190	0,2200	0,2800
4,00	0,0460	0,1070	0,1850
5,00	0,0030	0,0010	0,0030
6,00	0,00015	0,00019	0,00020

E4: Dados de concentração de umidade de abóbora congelada na temperatura de 70, 60 e 50 °C e pressão de 5 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(C-Ce)/(Co-Ce)$	$(C-Ce)/(Co-Ce)$	$(C-Ce)/(Co-Ce)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
1,00	0,2800	0,3600	0,4900
2,00	0,0400	0,1300	0,2550
3,00	0,0130	0,0230	0,0950
4,00	0,0018	0,0019	0,0030
5,00	0,0002	0,00026	0,00031

E5: Dados de concentração de umidade de abóbora branqueada na temperatura de 70, 60 e 50 °C e pressão de 5 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(C-Ce)/(Co-Ce)$	$(C-Ce)/(Co-Ce)$	$(C-Ce)/(Co-Ce)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
1,00	0,3400	0,4500	0,600
2,00	0,1200	0,2200	0,3300
3,00	0,0160	0,0940	0,1600
4,00	0,0024	0,0040	0,0290
5,00	0,0018	0,0020	0,0050
6,00	0,0001	0,00011	0,00012

E6: Dados de concentração de umidade de abóbora “in natura” na temperatura de 70, 60 e 50 °C e pressão de 5 kPa.

Tempo (h)	Temperaturas		
	70 °C	60 °C	50 °C
	$(C-Ce)/(Co-Ce)$	$(C-Ce)/(Co-Ce)$	$(C-Ce)/(Co-Ce)$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000
1,00	0,400	0,5000	0,6200
2,00	0,1670	0,2300	0,3600
3,00	0,029	0,0770	0,1600
4,00	0,0190	0,0320	0,0390
5,00	0,0010	0,0120	0,0150
6,00	0,0001	0,00013	0,00017