



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**

Tese de Doutorado

SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA ACEROLA

Aluna: Veruscka Araújo Silva

Orientadora: Odelsia Leonor Sánchez de Alsina

Campina Grande – Paraíba

Agosto/2004

SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DA ACEROLA

VERUSCKA ARAÚJO SILVA

Tese de Doutorado submetida à
Coordenação do Curso de
Doutorado em Engenharia de
Processos da Universidade
Federal de Campina Grande -
Campus I como parte dos
requisitos necessários para
obtenção do grau de Doutora em
Engenharia de Processos.

**Prof.^a Dr.^a Odelsia Leonor Sánchez de Alsina
(Orientadora)**

Campina Grande – Paraíba



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

S586s
2004

Silva, Veruscka Araújo
Secagem osmo-convectiva da acerola / Veruscka Araújo
Silva. – Campina Grande: UFCCG, 2004.
176f. il. col.

Inclui bibliografia.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) –
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de
Ciências e Tecnologia.

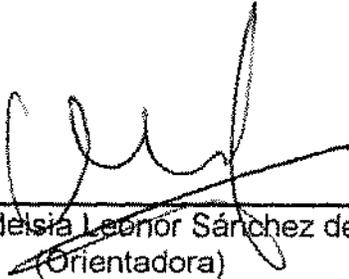
Orientadora: Odelsia Leonor Sánchez de Alsina.

1 – Acerola 2 – Desidratação osmótica 3 – Secagem
convectiva 4 – Modelagem matemática I – Título

CDU: 634.3:631.365

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE
VERUSCKA ARAÚJO SILVA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
GRANDE.

Tese ~~aprovada com distinção~~ em 30 de agosto de 2004.



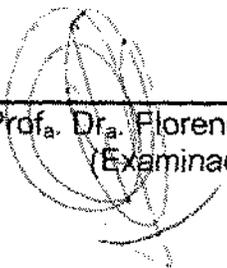
Prof.ª Dr.ª Odelsia Leonor Sánchez de Alsina
(Orientadora)



Prof. Dr. Antônio Gilson B. de Lima
(Examinador Interno)



Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva
(Examinador Interno)



Prof.ª Dr.ª Florencia Cecilia Menegalli
(Examinadora Externa)



Prof. Dr. Edson Leandro de Oliveira
(Examinador Externo)

*"Feliz o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento;
porque melhor é o lucro que ela dá do que o da prata, e melhor sua renda do que
o ouro mais fino."*

Provérbios 3;13-14

Dedico

À Deus;

Aos meus pais *Dinaldo e Helena*;
Aos meus irmãos *Vladimir, Vinicius e Valber*;
Cunhadas e sobrinhos *Igor e Gabriela*.

Agradecimentos

À Deus pela força superior que guia minha vida e o meu saber;

À minha orientadora Dr.^a Odelsia Leonor Sánchez de Alsina pela dedicação, paciência na orientação, apoio para a realização deste trabalho e correções, com informações que muito contribuirão na minha vida profissional;

Ao Professor Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva pela ajuda indispensável da Análise estatística;

Aos professores da Banca Examinadora, pelas atenções e correções indispensáveis a este trabalho;

Aos meus pais, Dinaldo e Helena, pelo incentivo e companheirismo nas horas mais difíceis e aos meus irmãos Valber, Vinicius e Vladimir;

À CAPES pelo suporte financeiro;

Aos funcionários do Laboratório de Processos Químicos Lopes e Nogueira pela sempre boa disposição;

As amigas e amigos do Doutorado, principalmente aqueles que estavam sempre perto Elba, Joelma, Vimário, Fabiana, Vera, Marcelo, Cléssia, Renato, Ana Paula, Wilma e Tânia, que muito contribuíram e me ajudaram bastante na minha caminhada,

As minhas amigas da graduação, Jaciane Andrade, Shirley Waleska e Camila pela ajuda indispensável na parte experimental deste trabalho;

Aos professores do doutorado, pela atenção durante o curso;

*A secretaria da Coordenação do Doutorado em Engenharia de Processo
Fátima;*

*Aos meus amigos do Laboratório de Processos Químicos Oswaldo e
Joselene;*

*À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste
trabalho.*

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	x
NOMENCLATURA.....	xii
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica.....	6
2.1. A acerola.....	7
2.1.1. Ácido ascórbico – (Vitamina C).....	10
2.2. Processo de secagem.....	11
2.2.1. Comportamento geral da secagem.....	12
2.3. Atividade de água.....	14
2.4. Isoterma de sorção.....	17
2.4.1. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas de sorção.....	19
2.5. Secagem de acerola.....	21
2.6. Desidratação osmótica.....	21
2.6.1. Fundamentos teóricos.....	21
2.6.2. Desidratação osmótica seguida da secagem convectiva.....	25
2.6.3. Fatores que influenciam a desidratação osmótica.....	26
2.6.4. Variáveis de processos.....	26
2.6.4.1. Tipo de agente desidratante.....	26
2.6.4.2. Efeito do tempo, da temperatura e da concentração da solução na secagem osmo-convectiva.....	29
2.6.4.3. Agitação.....	33
2.7. Características da membrana celular da fruta.....	35
2.8. Análise sensorial.....	36
2.9. Planejamento experimental fatorial na otimização do processo.....	37
2.9.1. Metodologia de superfície de resposta.....	38
2.10. Modelagem matemática.....	39
2.10.1. Equação teórica do modelo difusional.....	39
2.10.2. Modelagem na desidratação osmótica.....	42
2.10.3. Modelagem na secagem convectiva.....	44
2.11. Encolhimento.....	44
3. Materiais e Métodos.....	48
3.1. Materiais.....	49
3.1.1. Acerola (<i>Malpighia emarginata</i> DC).....	49
3.1.2. Solução de sacarose utilizada.....	49
3.2. Descrição dos Equipamentos.....	49
3.2.1. Equipamentos básicos.....	49
3.2.2. Equipamentos auxiliares.....	50
3.3. Condições de tratamento osmótico.....	51
3.4. Planejamento experimental fatorial.....	51
3.4.1. Planejamento experimental fatorial para a desidratação osmo- convectiva.....	51

3.4.2. Planejamento experimental fatorial para a desidratação osmótica.	52
3.4.3. Planejamento experimental fatorial para o estudo da desidratação através da película da acerola.....	53
3.5. Métodos.....	54
3.5.1. Metodologia da desidratação osmótica.....	54
3.5.2. Metodologia da secagem convectiva e esquema do equipamento de secagem.....	56
3.5.2.1. Câmara de secagem.....	57
3.5.3. Metodologia da desidratação osmótica através da película da acerola.....	59
3.5.4. Determinação de dados de processos.....	61
3.5.4.1. Determinação da umidade inicial.....	61
3.5.4.2. Atividade de água (a_w).....	62
3.5.4.3. Sólidos solúveis durante a desidratação osmótica.....	63
3.5.4.4. Sólidos totais durante a desidratação osmótica.....	63
3.5.4.5. Vitamina C da acerola (Ácido ascórbico).....	63
3.6. Determinação dos parâmetros psicrométricos.....	64
3.7. Determinação da umidade de equilíbrio.....	64
3.7.1. Secagem convectiva.....	64
3.7.2. Desidratação osmótica.....	65
3.8. Determinação das dimensões do sólido.....	65
3.9. Análise sensorial do suco da acerola – aceitação ou opinião do consumidor.....	66
3.10. Ajuste do modelo matemático.....	67
3.10.1. Secagem convectiva.....	67
3.10.2. Desidratação osmótica.....	68
3.10.3. Desidratação osmótica através da película da acerola.....	68
3.11. Tratamento matemático.....	70
3.12. Fluxograma do processo.....	71
4. Resultados e Discussões.....	72
4.1. Caracterização da acerola.....	73
4.1.1. Caracterização físico-química.....	73
4.2. Encolhimento da acerola.....	75
4.3. Isotermas de equilíbrio da acerola.....	76
5. Desidratação osmótica.....	81
5.1. Desidratação osmótica da acerola para tempos longos de imersão sem agitação.....	81
5.2. Desidratação osmótica da acerola para tempos de imersão de 4 horas.....	85
5.2.1. Efeito da velocidade de agitação.....	85
5.2.2. Efeito da temperatura e concentração sobre a cinética de desidratação osmótica.....	87
5.2.3. Experimentos repetidos nas mesmas condições (ponto central) – desidratação osmótica.....	90
5.2.4. Evolução dos sólidos solúveis da acerola.....	91
5.2.5. Sólidos totais da acerola durante a desidratação osmótica.....	94
5.2.6. Atividade de água (a_w) da acerola durante a desidratação osmótica.....	94

5.3.	Cinética da desidratação osmótica com agitação a tempo prolongado	95
5.3.1.	Sólidos solúveis e totais da acerola durante a desidratação osmótica de 48 horas	96
5.3.2.	Atividade de água da acerola durante a desidratação osmótica de 48 horas	98
5.4.	Modelagem da desidratação osmótica	99
5.4.1.	Umidade de equilíbrio da acerola na desidratação osmótica	99
5.4.2.	Modelo difusional para a cinética de desidratação osmótica	101
5.4.3.	Análise dos efeitos da concentração e temperatura sobre o coeficiente de difusão na etapa osmótica	104
5.5.	Desidratação osmótica através da película da acerola	106
5.5.1.	Cinética de desidratação através da película em um sistema agitado durante 7 horas de processamento	106
5.5.1.1.	Efeito da temperatura e concentração inicial da solução	106
5.5.1.2.	Efeito da temperatura e concentração na incorporação de sólidos solúveis ao suco da acerola	108
5.5.1.3.	Efeito da temperatura e concentração nos sólidos totais do suco da acerola	109
5.5.1.4.	Efeito da temperatura e concentração na perda do conteúdo de umidade da película da acerola durante o processo de desidratação	109
5.5.1.5.	Experimentos repetidos nas mesmas condições (ponto central) – desidratação através da película da acerola	110
5.5.2.	Cinética de desidratação através da película sem agitação durante 24 horas	113
5.5.2.1.	Efeito da temperatura	113
5.6.	Modelagem matemática da película da acerola desidratada osmoticamente	116
5.7.	Análise dos efeitos da concentração, temperatura e espessura sobre o coeficiente de difusão através da película da acerola	121
5.8.	Comparação do coeficiente de difusão da fruta com o da película da acerola	122
6.	Secagem convectiva	124
6.1.	Efeito dos tratamentos osmóticos na secagem convectiva	124
6.1.1.	Desidratação osmótica de 24, 48 e 72 horas (sem agitação)	124
6.1.2.	Desidratação osmótica de 4 horas com efeito da agitação	127
6.1.3.	Efeito da temperatura na desidratação osmótica de 30 a 90 minutos sobre a taxa de secagem em função da temperatura de secagem	129
6.1.3.1.	Experimentos repetidos nas mesmas condições (ponto central) - secagem osmo-convectiva	132
6.2.	Modelagem matemática da secagem convectiva	133
6.2.1.	Acerolas desidratadas osmoticamente para tempo de imersão de 24, 48 e 72 horas (sem agitação)	133
6.2.2.	Acerolas desidratadas osmoticamente com efeito da agitação durante 4 horas	135
6.2.3.	Acerolas desidratadas osmoticamente com efeito da agitação durante 30, 60 e 90 minutos	137
6.2.3.1.	Análise da influência da temperatura e tempo de imersão sobre o coeficiente de difusão na etapa convectiva	140

7. Análise do desempenho do processo.....	145
7.1. Vitamina C.....	145
7.2. Análise sensorial.....	147
8. Considerações Finais.....	151
8.1. Resumo dos resultados obtidos.....	152
8.1.1. Desidratação osmótica.....	152
8.1.2. Desidratação através da película da acerola.....	153
8.1.3. Secagem convectiva.....	155
8.1.4. Qualidade do produto final.....	156
8.2. Conclusão.....	157
8.3. Perspectivas para pesquisas futuras.....	157
8.3.1. Estudos fundamentais.....	157
8.3.2. Estudos tecnológicos.....	158
8.3.3. Estudos sobre a qualidade e aplicações do produto.....	158
9. Referências Bibliográficas.....	159
Anexo I.....	172
Anexo II.....	175

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Acerola.....	7
Figura 2.2	Conteúdo de umidade contra o tempo.....	12
Figura 2.3	Velocidade de secagem em função do conteúdo de umidade do material.....	13
Figura 2.4	Isotermas de sorção de umidade típica de um alimento.....	18
Figura 2.5	Transferência de massa durante a desidratação osmótica.....	23
Figura 3.1	Esquema da cesta cilíndrica de alumínio utilizada para imersão das acerolas em solução de sacarose.....	54
Figura 3.2	Esquema do equipamento utilizado na desidratação osmótica a temperatura ambiente.....	55
Figura 3.3	Esquema do equipamento utilizado na desidratação osmótica com sistema de banho termostático.....	56
Figura 3.4	Secador de leito fixo.....	57
Figura 3.5	Esquema do tubo de ensaio preenchido com o suco da acerola e recipiente com solução de sacarose.....	59
Figura 3.6	Esquema da montagem do tubo de ensaio.....	59
Figura 3.7	Esquema de preparação das amostras contendo suco/película da acerola/solução de sacarose.....	60
Figura 3.8	Sistema de agitação de tubos.....	60
Figura 3.9	Sistema de agitação e aquecimento de tubos.....	61
Figura 3.10	Foto do equipamento para determinação da atividade de água (Thermoconstanter Novasina).....	63
Figura 3.11	Medição do raio aparente da acerola.....	66
Figura 3.12	Desidratação através da película da acerola.....	68
Figura 3.13	Gráfico da derivada do conteúdo de umidade em função do conteúdo de umidade.....	70
Figura 3.14	Fluxograma do processo utilizado para realização dos experimentos.....	71
Figura 4.1	Encolhimento da acerola na secagem convectiva, (a) experimentos referentes à Tabela 3.2 e (b) secagem submetida a diversos pré-tratamentos.....	76
Figura 4.2	Encolhimento da acerola na secagem convectiva Experimentos referentes à Tabela 3.2, junto com os dados obtidos por SILVA (1998).....	76
Figura 4.3	Isotermas de sorção da acerola. (a) "in natura" 30, 40 e 50 °C, (b) desidratação osmótica (40 e 70 °Brix) 30 °C.....	78
Figura 4.4	Isotermas de sorção da acerola. (a) desidratação osmótica (40 °Brix) 30 e 40 °C, (b) desidratação osmótica (70 °Brix) 30 e 40 °C.....	78
Figura 5.1	Efeito da concentração de sacarose na redução do conteúdo de umidade da acerola para o tempo de imersão de 24 h sem agitação.....	83
Figura 5.2	Efeito da concentração de sacarose na redução do conteúdo de umidade da acerola para o tempo de imersão de 48 h sem agitação.....	84

Figura 5.3	Efeito da concentração de sacarose na redução do conteúdo de umidade da acerola para o tempo de imersão de 72 h sem agitação.....	84
Figura 5.4	Desidratação osmótica em solução de sacarose 40 °Brix na temperatura ambiente. Efeito da agitação durante a desidratação osmótica sobre a evolução do conteúdo de umidade da acerola em função do tempo.....	85
Figura 5.5	Massa da acerola durante a desidratação osmótica em função do tempo (a) e derivada das curvas de desidratação osmótica da acerola em função do tempo (b).....	87
Figura 5.6	Efeito da temperatura de imersão e da concentração na desidratação osmótica da acerola em solução de sacarose de 40 e 70 °Brix.....	89
Figura 5.7	Reprodutibilidade dos ensaios na desidratação osmótica no ponto central. Temperatura de imersão de 35 °C e solução de sacarose de 55 °Brix.....	91
Figura 5.8	Efeito da temperatura de imersão sobre os sólidos solúveis da acerola durante a desidratação osmótica, (a) 40 °Brix e (b) 70 °Brix.....	92
Figura 5.9	Efeito da temperatura de imersão sobre os sólidos solúveis da acerola durante a desidratação osmótica de 55 °Brix.....	93
Figura 5.10	Efeito da temperatura de imersão sobre os sólidos totais da acerola durante a desidratação osmótica de 4 h. (a) 70 °Brix e (b) 55 °Brix.....	94
Figura 5.11	Efeito do tempo de imersão na desidratação osmótica da acerola em solução de sacarose de 40 e 70 °Brix na temperatura média ambiente.....	96
Figura 5.12	Efeito do tempo de imersão da acerola osmoticamente desidratada em solução de sacarose (a) sólidos solúveis e (b) sólidos totais.....	97
Figura 5.13	Ajuste do modelo difusional para acerola desidratada osmoticamente com o tempo de processamento de 4 h - Experimentos 1, 2 e 3 (a) e Experimentos 4 e 5 (b).....	103
Figura 5.14	Ajuste do modelo difusional para acerola desidratada osmoticamente com o tempo de processamento - Experimentos de 4 h - 6 e 7 (a) Experimentos de 48 h - 8 e 9 (b).....	103
Figura 5.15	Concentração da solução de sacarose durante o processo da desidratação osmótica através da película da acerola - Efeito da temperatura e concentração.....	107
Figura 5.16	Concentração do suco da acerola durante o processo de desidratação osmótica através da película da acerola - Efeito da temperatura e concentração.....	108
Figura 5.17	Sólidos totais do suco da acerola durante o processo de desidratação osmótica através da película da acerola - Efeito da temperatura e concentração.....	109
Figura 5.18	Conteúdo de umidade da película da acerola durante o processo de desidratação osmótica - Efeito da temperatura e concentração.....	110

Figura 5.19	Concentração da solução de sacarose durante o processo da desidratação osmótica através da película da acerola - Efeito da temperatura e concentração nas repetições do ponto central.....	111
Figura 5.20	Concentração do suco da acerola durante o processo de desidratação osmótica através da película da acerola - Efeito da temperatura e concentração nas repetições do ponto central.....	111
Figura 5.21	Sólidos totais do suco da acerola durante o processo de desidratação osmótica - Efeito da temperatura e concentração nas repetições do ponto central.....	112
Figura 5.22	Conteúdo de umidade da película da acerola durante o processo de desidratação osmótica - Efeito da temperatura e concentração.....	112
Figura 5.23	Acompanhamento do °Brix da solução de sacarose, sem o efeito da agitação durante o processo de desidratação osmótica (40 °Brix), através da película da acerola.....	113
Figura 5.24	Acompanhamento do °Brix do suco da acerola, sem o efeito da agitação durante o processo de desidratação osmótica (40 °Brix), através da película da acerola sem agitação.....	114
Figura 5.25	Sólidos totais do suco da acerola, sem o efeito da agitação durante o processo de desidratação osmótica (40 °Brix), através da película da acerola sem agitação.....	114
Figura 5.26	Conteúdo de umidade da película da acerola durante o processo de desidratação osmótica (40 °Brix) sem agitação.....	115
Figura 5.27	Comparação entre os pontos experimentais e o modelo difusional para a película da acerola desidratada osmoticamente na temperatura de 30 °C: (a) 40 °Brix e (b) 70 °Brix.....	117
Figura 5.28	Repetições do ponto central, comparação entre os pontos experimentais e o modelo difusional para a película da acerola desidratada osmoticamente na temperatura de 35 °C: (a), (b) 55 °Brix.....	117
Figura 5.29	Repetição do ponto central, comparação entre os pontos experimentais e o modelo difusional para a película da acerola desidratada osmoticamente na temperatura de 35 °C: (c) 55 °Brix.....	118
Figura 5.30	Comparação entre os pontos experimentais e o modelo difusional para a película da acerola desidratada osmoticamente na temperatura de 40 °C: (a) 40 °Brix e (b) 70 °Brix.....	118
Figura 5.31	Comparação entre os pontos experimentais e o modelo difusional para a película da acerola desidratada osmoticamente durante 24 h em uma concentração de 40 °Brix, na temperatura de (a) 30 °C e (b) 40 °C.....	119
Figura 6.1	Efeito da concentração de sacarose na redução da umidade da acerola para o tempo de imersão de 24 h. (1) - Desidratação osmótica (2) - Secagem convectiva.....	125

Figura 6.2	Efeito da concentração de sacarose na redução da umidade da acerola para o tempo de imersão de (a) 48 h e (b) 72 h. (1) - Desidratação osmótica (2) - Secagem convectiva.....	125
Figura 6.3	Efeito da velocidade de agitação durante a desidratação osmótica da acerola sobre a evolução do conteúdo de umidade com tempo. (1) - Desidratação osmótica (2) - Secagem convectiva.....	127
Figura 6.4	Derivada das curvas de secagem osmo-convectiva da acerola em função do tempo. (1) - Desidratação osmótica (2) - Secagem convectiva.....	129
Figura 6.5	Secagem osmo-convectiva. Efeito das temperaturas nos processos osmóticos na cinética de secagem convectiva, durante a imersão de (a) 30 min e (b) 90 min (1) - Desidratação osmótica (2) - Secagem convectiva.....	130
Figura 6.6	Secagem osmo-convectiva. Reprodutibilidade dos ensaios (1) - Desidratação osmótica (60 min) (2) - Secagem convectiva (6 h).....	132
Figura 6.7	Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola "in natura".....	134
Figura 6.8	Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente: experimentos N ^{os} 1, 3 e 5.....	134
Figura 6.9	Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente: experimentos N ^{os} 2, 4 e 6.....	135
Figura 6.10	Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente com e sem agitação.....	136
Figura 6.11	Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente: experimentos N ^{os} 1, 2 e 3.....	138
Figura 6.12	Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente: experimentos N ^{os} 4, 5 e 6.....	138
Figura 6.13	Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente: experimentos N ^{os} 7 e 8.....	139
Figura 6.14	Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente: experimentos N ^{os} 9, 10 e 11.....	139
Figura 6.15	Respostas previstas pelo modelo linear para o coeficiente de difusão da acerola na etapa convectiva.....	142
Figura 6.16	Superfícies de resposta do coeficiente de difusão para a acerola submetida à secagem osmo-convectiva: efeito do tempo de imersão e temperatura de imersão.....	143
Figura 6.17	Superfícies de resposta do coeficiente de difusão para a acerola submetida à secagem osmo-convectiva: efeito do tempo de imersão e temperatura do ar.....	143

Figura 6.18	Superfícies de resposta do coeficiente de difusão para a acerola submetida à secagem osmo-convectiva: efeito da temperatura do ar e temperatura de imersão.....	144
Figura 7.1	Teste de aceitação quanto ao sabor do suco de acerola osmoticamente desidratado. (Solução de sacarose de 40 °Brix – tempo de imersão 72 h).....	148
Figura 7.2	Teste de aceitação quanto ao aroma do suco de acerola osmoticamente desidratado. (Solução de sacarose de 40 °Brix – tempo de imersão 72 h).....	148
Figura 7.3	Teste de aceitação quanto à cor do suco de acerola osmoticamente desidratado. (Solução de sacarose de 40 °Brix – tempo de imersão 72 h).....	149
Figura 7.4	Teste de aceitação quanto à aparência do suco de acerola osmoticamente desidratado. (Solução de sacarose de 40 °Brix – tempo de imersão 72 h).....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição e valor nutritivo da acerola em 100g de porção comestível.....	9
Tabela 2.2	Atividade de água mínima de crescimento de microrganismos...	16
Tabela 2.3	Modelos para ajustes de isoterms de sorção de umidade.....	19
Tabela 2.4	Modelos para previsão do coeficiente de encolhimento volumétrico.....	47
Tabela 3.1	Condições experimentais usadas nas desidratações osmóticas, seguidas da secagem convectiva ($T_{ar} = 60\text{ °C}$ e $V_{ar} = 1,3\text{ m/s}$)....	51
Tabela 3.2	Planejamento experimental fatorial da desidratação osmoconvectiva.....	52
Tabela 3.3	Planejamento experimental fatorial para a desidratação osmótica.....	53
Tabela 3.4	Variável não controlada (espessura da película da acerola).....	53
Tabela 3.5	Planejamento experimental fracionário para a desidratação osmótica através da película da acerola.....	54
Tabela 4.1	Análise físico-química da acerola "in natura" em base úmida.....	73
Tabela 4.2	Análise físico-química da acerola após a desidratação osmótica	73
Tabela 4.3	Análise físico-química da acerola após secagem convectiva.....	74
Tabela 4.4	Parâmetros da equação de GAB e coeficientes de regressão da acerola para diferentes tratamento e temperaturas.....	79
Tabela 4.5	Constantes que dependem da temperatura ajustada ao modelo de GAB.....	80
Tabela 5.1	Valores de (PA), (GS) e (PP), obtidos experimentalmente na desidratação osmótica da acerola.....	82
Tabela 5.2	Influência da velocidade de agitação em solução de sacarose (40 °Brix) na redução do tempo de desidratação para atingir um conteúdo de umidade normalizada especificada de 99,6% (base úmida).....	86
Tabela 5.3	Influência do °Brix e da temperatura de imersão na redução do tempo de desidratação osmótica em uma relação de umidade especificada de 0,87, 0,91 e 0,94 para 40, 55 e 70 °Brix, respectivamente.....	89
Tabela 5.4	Influência da concentração e da temperatura de imersão no ganho de sacarose na acerola, após 4 h de desidratação osmótica.....	93
Tabela 5.5	Variação da atividade de água da fruta com o tempo de processo.....	95
Tabela 5.6	Efeito dos sólidos solúveis e sólidos totais, após 48 h de desidratação osmótica da acerola.....	98
Tabela 5.7	Efeito do tempo de imersão sobre a atividade de água de acerolas desidratadas osmoticamente a temperatura ambiente.....	99
Tabela 5.8	Valores experimentais e calculados da atividade de água (a_w) das soluções de sacarose.....	100
Tabela 5.9	Valores de M_{∞} , A e D para o modelo difusional com nove termos incluindo o efeito do encolhimento na desidratação osmótica da acerola.....	102

Tabela 5.10	Efeitos das variáveis do coeficiente de difusão efetiva para acerola desidratada osmoticamente.....	104
Tabela 5.11	Dados da espessura (L) e valores do parâmetro (A) e o coeficiente de difusão (D) obtidos através do ajuste do modelo difusional para a geometria de placa plana aplicando quatro termos da série para película da acerola desidratada osmoticamente.....	119
Tabela 5.12	Efeitos das variáveis sobre o coeficiente de difusão efetiva, obtidos através da película da acerola.....	121
Tabela 5.13	Comparação do coeficiente de difusão efetivo (D) da acerola desidratada osmoticamente com o da película da acerola.....	123
Tabela 6.1	Tempo da secagem convectiva para atingir uma umidade normalizada especificada de 0,29 (base seca), nas condições de $T_{ar} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $V_{ar} = 1,3\text{ m/s}$	126
Tabela 6.2	Influência da velocidade de agitação na solução de sacarose (40 °Brix) na redução do tempo de secagem convectiva para um conteúdo de umidade normalizada especificada de 0,59 (base seca).....	128
Tabela 6.3	Influência das temperaturas de imersão e de secagem, na redução do tempo da secagem convectiva para uma umidade considerada de 0,50 com tempo de imersão de 30 e 90 min, comparada com o sem tratamento.....	131
Tabela 6.4	Valores de A, r_{ap} , D para o modelo difusional com quatro termo incluindo o efeito do encolhimento na secagem convectiva da acerola desidratada osmoticamente. $T_{ar} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $V_{ar} = 1,3\text{ m/s}$	133
Tabela 6.5	Valores de A, r_{ap} , D para o modelo difusional com quatro termos incluindo o efeito do encolhimento na secagem convectiva da acerola desidratada osmoticamente, com efeito da agitação. $T_{ar} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $V_{ar} = 1,3\text{ m/s}$	136
Tabela 6.6	Modelagem com os quatro primeiros termos da série incluindo o efeito do encolhimento. ($T_{ar} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $V_{ar} = 1,3\text{ m/s}$).....	137
Tabela 6.7	Efeitos das variáveis no coeficiente de difusão efetiva da acerola osmo-convectiva.....	140
Tabela 6.8	Análise de variância do coeficiente de difusão efetiva para a acerola osmo-convectiva.....	142
Tabela 7.1	Degradação da vitamina C da acerola – Teor de vitamina (%) (base seca).....	146

NOMENCLATURA

A	Parâmetro da equação, adimensional
A_1, A_2	Parâmetros que depende do material e da temperatura, adimensional
A	Parâmetro ajustável da equação de Fick, adimensional
A	Constante da equação, adimensional
a_w	Atividade de água, adimensional
b, b1, b2	Constantes da equação, adimensional
B	Parâmetro da equação, adimensional
C	Constante da equação, adimensional
C_0	Constante ajustada com o efeito da temperatura, adimensional
C/C_i	Concentração normalizada com a concentração inicial, adimensional
C	Concentração (°Brix)
C_0	Concentração uniforme inicial
C_L, C_2	Concentrações nas superfícies da membrana $L=0$ e $L=L$, respectivamente
D	Coefficiente de difusão ou Coeficiente de difusão efetivo (cm^2/min)
dm/dt	Derivada da massa em função do tempo (g/min)
dX/dt	Velocidade de secagem ($\text{g H}_2\text{O}/\text{g ms} \cdot \text{min}^{-1}$)
d, d_i	Diâmetro da amostra e diâmetro da amostra inicial (cm)
GS	Ganho de sólidos, (%)
g.l.	Graus de liberdade
H_m, H_n	Calores de sorção de monocamada e multicamada de água (J/mol)
K^*	Constante do soluto, adimensional
K, K_1, K_2	Constantes da equação, adimensional
K_0	Constante ajustada com o efeito da temperatura, adimensional
L	Espessura da placa (cm)
MA_0	Peso inicial da água (g)
MQ	Média quadrática
MQ_R	Média quadrática da regressão
MQ_r	Média quadrática do resíduo
MS_j	Peso inicial da amostra (g)
MS_t	Peso dos sólidos no tempo t(g)
M_∞	Água difundida no tempo infinito ou conteúdo de umidade total (g $\text{H}_2\text{O}/\text{g ms}$)

Mt	Água difundida no tempo (t) ou conteúdo de umidade no tempo (t) (g H ₂ O/g ms)
M	Molaridade da solução de sacarose (mol/g)
m _i	Peso inicial da amostra (g)
m _t	Peso da amostra no tempo t (g)
M _∞	Massa de água perdida no infinito (g)
m _{ss}	Massa de sólido seco (g)
M	Constante da equação, adimensional
N	Número de termo da série
P	Constante da equação, adimensional
PA	Perda de água (%)
PP	Perda de peso (%)
P, P ₀	Pressão de vapor da água do alimento e da água pura, atm
Q	Constante da equação, adimensional
R	Constantes universal dos gases (kJ/mol °K)
R ²	Coefficiente de correlação
R	Coordenada espacial
r, r _{ap} , r(X)	Raio, raio aparente da amostra e raio em função do conteúdo de umidade (cm)
r _i	Constante da equação, adimensional
ST/ST _i	Sólidos totais normalizado com os sólidos totais iniciais, adimensional
S _b	Coefficiente de encolhimento volumétrico do material, adimensional
SQ	Soma quadrática
T _{ar}	Temperatura do ar de secagem (°C)
T, T _i	Temperatura e temperatura de imersão (°C)
t, t _i	Tempo e tempo de imersão inicial (min) e (h)
U	Constante da equação, adimensional
V _{ar}	Velocidade do ar de secagem (m/seg)
X [*]	Razão de umidade (b.s.)
X	Conteúdo de umidade do material (b.s.) e (b.u) (g H ₂ O/g ms)
\bar{X}	Conteúdo de umidade do material no instante t (g H ₂ O/g ms)
X _i	Conteúdo de umidade inicial (b.s.) (g H ₂ O/g ms)
X _e	Conteúdo de umidade no estado estacionário, (b.s.) (g H ₂ O/g ms)
X _{eq}	Conteúdo de umidade de equilíbrio, (base seca) (g H ₂ O/g ms)
X _R	Conteúdo de umidade relativa (%)

X/X_i	Conteúdo de umidade normalizada com o conteúdo de umidade inicial, adimensional
X_m	Conteúdo de umidade em monocamada (base seca) (g H ₂ O/g ms)
X_c	Conteúdo de umidade crítica (g H ₂ O/g ms)
X_1, X_2	Concentrações constantes em ambos os lados da superfície da membrana
λ	Calor latente de condensação da água pura (kJ/mol)
$\Delta H_c, \Delta H_k$	Calores de sorção (kJ/mol)
$\rho, \rho_{be}, \rho_{b,0}$	Densidade (g/cm ³)
ϕ	Relação definida na equação, adimensional
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo principal estudar a secagem osmoconvectiva da acerola (*Malpighia emarginata* DC) mediante desidratação em soluções de sacarose, seguida de secagem convectiva em ar sob diversas condições de operação. Foram estudados os efeitos do tempo de imersão, agitação, concentração e temperatura da solução osmótica e temperatura do ar de secagem, por meio de três planejamentos fatoriais, para o estudo da cinética da desidratação osmótica e da secagem convectiva. As condições operacionais foram: concentração de 40, 55 e 70 °Brix; a temperatura na etapa osmótica foi de 28, 30, 34, 35 e 40 °C enquanto que na convectiva foi de 60, 65 e 70 °C; o tempo de imersão na solução de sacarose variou de tempos curtos (30, 60 e 90 min), tempos intermediários (4 e 7 h) e tempos longos (24, 48 e 72 h). Quanto aos aspectos de transferência externa, foi analisado o efeito da agitação na etapa osmótica, variando sem agitação até 780 rpm e na célula diferencial 20 rpm, sendo que na etapa convectiva a velocidade do ar no secador foi fixada em 1,3 m/s. A influência das diversas condições do tratamento osmótico nas isotermas de equilíbrio, na cinética de secagem convectiva e em relação à qualidade do produto foi também analisada. Para uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos na desidratação osmótica foram realizados estudos da permeabilidade da casca da acerola em célula difusional. Foi verificado que o tempo de desidratação osmótica e secagem convectiva diminui quando aumenta a concentração de sacarose e o tempo de imersão. Foram aplicados modelos Fickianos simples para analisar a difusão de água nas etapas osmótica e convectiva, bem como a transferência de massa através da casca nos experimentos em célula difusional. O coeficiente de difusão de água na fruta inteira variou entre $0,40 \times 10^{-5}$ e $8,0 \times 10^{-5}$ cm^2/min , na etapa osmótica, e $0,5 \times 10^{-4}$ e $1,8 \times 10^{-4}$ cm^2/min na convectiva. Como esperado, o coeficiente de difusão na película foi menor que na fruta inteira, embora na mesma ordem de magnitude, variando entre $0,14 \times 10^{-5}$ e $1,0 \times 10^{-5}$ cm^2/min confirmando que é na película cerosa externa onde se encontra a maior resistência à transferência de massa. A análise sensorial do suco da acerola processada apresentou boa aceitabilidade por parte dos provadores, tanto quanto ao sabor, aroma, cor e aparência. O suco da acerola submetida à secagem osmoconvectiva apresentou menores perdas de Vitamina C quando comparada com a acerola "in natura".

ABSTRACT

This work deals with the study of osmotic-convective drying of West Indian cherry (*Malpighia emarginata* DC) by dehydration in sucrose solutions, followed by convective drying in air under several operating conditions. The effects of immersion time, agitation, concentration and temperature of the osmotic solution and temperature of the drying air on the osmotic dehydration kinetics and convective drying were studied by means of three factorial designs. The operational conditions were: 40, 55 and 70 °Brix; the operating temperature at the osmotic stage varied 28, 30, 34, 35 and 40 °C while in the convective step it was between 60, 65 and 70 °C; the immersion time in the sucrose solution varied from short times (30, 60 and 90 min), intermediate times (4 and 7 h) and longer times (24, 48 and 72 h). Relative to the external transfer aspects, the effect of agitation in the osmotic stage was analyzed, varying no agitation to up to 780 rpm and in the differential cell 20 rpm, whereas in the convective stage the air velocity in the dryer was fixed at 1.3 m/s. The influence of several osmotic treatment conditions in the equilibrium isotherms, in the drying kinetics and in the quality of the product was also analyzed. For a better comprehension of the mechanisms involved in the osmotic dehydration, studies were made on the permeability of the West Indian cherry skin in a diffusion cell. It was found that the time for osmotic dehydration and convective drying diminishes when the concentration of sucrose and the immersion time increases. Simple Fickian models were used to analyze the water diffusion in the osmotic and convective stages, as well as the mass transfer through the skin in the diffusion cell experiments. The water diffusion coefficient in the whole fruit varied between 0.40×10^{-5} and 8.0×10^{-5} cm²/min, in the osmotic stage and 0.5×10^{-4} and 1.8×10^{-4} cm²/min in the convective. As expected, the diffusion coefficient on the skin was less than on the entire fruit, although in the same order of magnitude, varying between 0.14×10^{-5} and 1.0×10^{-5} cm²/min confirming that it is on the external waxy film where the greatest resistance to the mass transfer is found. The sensorial analyses of the processed West Indian cherry juice presented a good acceptability, in taste, aroma, color and appearance. The West Indian submitted to osmotic convective drying presented less loss of vitamin C during the convective drying when compared to the "in natura" fruit. These results showed that the osmotic pretreatment is efficient in order to diminish the convecting drying time, preserving the quality of the West Indian cherries.

Introdução

O Brasil é uma terra privilegiada no que diz respeito à produção de frutas. É o terceiro produtor mundial, sendo que suas exportações apresentaram um crescimento de 30% nos últimos três anos. As frutas nacionais são saborosas, saudáveis e nutritivas, no entanto, grande parte da colheita é desperdiçada com estimativas que apontam para 40% de perdas. Parte da produção é perdida devido aos baixos preços durante o período de safra, o que torna pouco remunerativo para o produtor, que a comercializa "in natura" na maioria dos casos, sendo penalizado por este motivo a perder parte da produção. Outras perdas ocorrem durante o transporte e armazenamento realizados de maneira inadequada.

A acerola, cujo nome científico é *Malpighia emarginata DC*, têm sido uma fruta largamente cultivada nos últimos anos na região nordestina do Brasil. Também conhecida como cereja das Antilhas, por sua origem, é um pequeno fruto de cor vermelha de sabor ácido e levemente doce, que tem assumido grande importância pelo seu valor nutricional, pois é uma fonte natural de vitamina C ácido ascórbico (SILVA, 1998).

Segundo dados fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE, a área cultivada no Brasil da acerola é mais de 11 mil hectares, com uma produção de aproximadamente 32.990 toneladas e um rendimento de 3.000 quilos por hectare.

Desde da antiguidade sabe-se que os alimentos com maior conteúdo de umidade são mais perecíveis, estragam-se com muita facilidade, de maneira que o controle da umidade do produto têm sido uma ferramenta para sua conservação (WELTI & VERGARA, 1997). Surge então o interesse em desenvolver processos para os quais é necessário encontrar alternativas de preservação, a fim de controlar o conteúdo de umidade, que produzia a estabilidade tanto química quanto biológica, do alimento que possibilite uma melhor e mais prolongada forma de armazenagem. Deste modo, é possível diminuir as perdas e facultar o fornecimento de produtos diversificados ao mercado consumidor visando manter ao máximo possível, suas propriedades sensoriais.

Existem dois modos ou meio de secagem que são: a secagem natural e artificial. A secagem natural consiste na exposição direta do produto úmido ao sol ou à sombra em um ambiente relativamente seco afim de que parte da água seja removida por evaporação. O método é vantajoso no que se refere ao baixo custo de instalação associado ao emprego de fonte natural de aquecimento, por outro lado o processo é lento e depende das condições climáticas. Para evitar estes problemas, assim como o risco de contaminação, decorrente do longo tempo de exposição ao ambiente e a um melhor controle das condições operacionais, usa-se a secagem artificial. Esta secagem consiste em submeter o produto úmido em um sistema ou secador sob a ação de uma corrente de ar aquecido. Apesar das vantagens assinaladas, a secagem artificial é um processo dispendioso em energia térmica ou mecânica para o aquecimento e movimento do ar (BIAGI et al., 1992).

Um dos sistemas mais utilizados para a secagem é o secador de leito fixo, também denominado secador de camada fixa. Estes são secadores em que o produto permanece estático durante a secagem apresentam configurações bastante simples de baixo custo de implantação, com vantagem de serem muito versáteis e utilizados para a secagem dos mais diferentes produtos.

SOARES et al. (2001) afirmaram que a desidratação além de ser utilizada como um método de conservação, impedindo a deterioração e perda do valor comercial, objetiva também o refinamento do alimento, tendo-se como consequência à instalação de um novo produto no mercado, o que usualmente vem motivando os investimentos de produção e beneficiamento agrícola, face aos benefícios monetários que derivam da transformação do produto.

Um dos problemas básicos da desidratação de alimentos tem sido a lenta taxa de remoção do conteúdo de umidade durante o processo de secagem. Tempos de secagem extensos e temperaturas elevadas é freqüentemente requeridos nos secadores tipo túnel, para desidratar materiais até um baixo conteúdo de umidade, resultando em uma perda significativa da qualidade do produto final. (SILVA, 1998). Por outro lado, o processo de secagem requer alto gasto energético, por isso há a necessidade de desenvolver técnicas que

minimizem os custos. A utilização do processo de desidratação osmótica como pré-tratamento, antes da secagem convectiva têm sido sugerida por muitos autores como alternativa para obter produtos desidratados de boa qualidade, já que promove uma melhor estabilidade e necessita de um tempo bem menor de secagem (ALVAREZ et al., 1995). Neste sentido, SILVA (1998) estudou diversos pré-tratamentos como forma de diminuir o tempo de secagem convectiva da acerola.

A desidratação osmótica, além do seu baixo custo energético frente a outros métodos de desidratação, adequa-se a todas as escalas de produção, sendo uma alternativa tecnológica à redução das perdas pós-colheita. Este método consiste na remoção parcial de água do alimento, por imersão em uma solução hipertônica de sacarose (AGUIAR et al., 2002).

A remoção de água através do processo de desidratação osmótica ocorre, em geral, simultaneamente a saída de água do produto para a solução e a transferência de solutos em sentido inverso. Pode ocorrer ainda a saída de sólidos do produto estudado, sendo essa transferência quantitativamente desprezível com relação aos outros dois fluxos, mas, essencial do ponto de vista das qualidades sensoriais e nutricionais do produto transformado (ARGANDOÑA, 1999).

A desidratação osmótica anterior ao processo de secagem surge como uma alternativa de minimizar a perda de vitamina C e de evitar prejuízos ao produto final.

Pelo exposto, o presente trabalho tem por objetivos:

Objetivo geral:

- Estudar a secagem osmo-convectiva da acerola "in natura" verificando o efeito das condições de operação sobre o desempenho do processo.

Objetivos específicos:

- Verificar, a partir do levantamento das curvas de secagem, a influência da desidratação osmótica na redução do tempo de secagem convectiva.
- Verificar o efeito da concentração de sacarose na desidratação osmótica.
- Verificar o efeito do tempo e da temperatura de imersão na desidratação osmótica.
- Verificar o efeito da velocidade de rotação da solução osmótica na desidratação osmótica.
- Modelar a cinética de desidratação osmótica através da película da acerola.
- Estudar a transferência de massa através da película da acerola.
- Modelar a cinética de desidratação osmótica e convectiva.
- Avaliar o processo utilizado a técnica do planejamento experimental fatorial.
- Avaliar a qualidade do produto ao final do processo.

Revisão Bibliográfica

2.1. A acerola

A Acerola (*Malpighia emarginata* DC) – da família das malpighiáceas – é uma planta frutífera, originária do Mar das Antilhas, norte da América do Sul e América Central; teve seu valor vitamínico descoberto em 1945, na Universidade Botânica de Porto Rico, revelando-se então uma nova e preciosa fonte de vitamina C (ácido ascórbico) naturalmente encontrada na fruta apresentando aproximadamente 80 (oitenta) vezes mais teor que o encontrado na laranja e por este motivo ficou conhecida como “cereja da vida longa” (SILVA, 1998). Quando colhida verde possui mais ácido ascórbico que a madura. Os teores de vitamina C na acerola variam de 1000-2000 mg de ácido ascórbico em frutos maduros a 4.827mg de ácido ascórbico por 100g em frutos verdes. Além do altíssimo teor de vitamina C, a acerola é, também, considerada uma fruta rica em vitamina A, ferro e cálcio (NETTO, 1986).



FONTE: PEREIRA (2000)

Figura 2.1 –Acerola

Tratada como segredo de Estado, a pequena fruta ficou aprisionada em Porto Rico e teve sua saída proibida de onde era cultivada e industrializada. Em 1955, uma brasileira escondeu na bolsa algumas sementes da acerola até ser trazida para o Brasil. No ano de 1956 a professora da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) retornou ao Brasil e das 245 sementes que plantou no *campus* da Universidade, apenas 10 germinaram e se transformaram em plantas produtivas, e é bem provável que a maior parte das mudas plantadas no Brasil tenham sido geradas a partir daquelas primeiras matrizes (PEREIRA, 2001).

Apresentando-se como alternativa comercial altamente viável no mercado fruticultor, o cultivo da acerola foi rapidamente se expandindo, gerando uma superprodução que vem justificando estudos direcionados ao desenvolvimento de novos produtos a partir desta matéria-prima, que concentra na fruta "in natura" e na polpa, sua maior forma de consumo (SOARES et al., 2001).

A planta de acerola é um arbusto de tamanho médio com 2 a 3 metros de altura e com ramos densos espalhados. As folhas são compostas, de pecíolo, ovaladas a elípticas, lanceoladas, com 2,5 a 7,5 centímetros de comprimento. As flores são dispostas em pequenas cimeiras axilares pedunculados de 3 a 5 flores perfeitas, com 1 a 2 centímetros de diâmetros. Os frutos variam em tamanho, forma e peso. A forma pode ser oval e subglobosa, a casca é fina e delicada, o tamanho varia de 1 a 2,5 centímetros e o peso varia de 2 a 10 g. Quanto à cor, o fruto apresenta tonalidades diferentes: verde, quando em desenvolvimento, passando a amarelo, e finalmente vermelho-escuro quando maduro. O fruto apresenta normalmente três sementes pequenas, cada uma dentro de um caroço proeminentemente reticulado, com a consistência de um pergaminho, dando ao fruto um aspecto mais ou menos trilobado e um suco avermelhado que representa 80% do peso do fruto (NETTO, 1986).

Os frutos, muitas vezes, são chamados de maçãzinhas devido à existência do ácido málico, que confere a acerola um perfume semelhante ao da maçã, além de serem iguais na forma e na cor. O fruto é macio e sucoso, e quando maduro deterioram-se rapidamente, pois são delicados e qualquer pancada provoca a ruptura da película e a polpa entra rapidamente em processo de fermentação. As variedades classificam-se em doces e ácidas sendo que as ácidas são ricas em ácido ascórbico do que as doces (NETTO, 1986).

A acerola pode ser plantada em todos os meses do ano, em qualquer região do Brasil, desenvolvendo-se bem em clima tropical e subtropical e em quase todos os tipos de solo. Os solos de fertilidade média e os argilo-arenosos, por reterem maior conteúdo de umidade, são os mais indicados (NETTO, 1986). A estação chuvosa é a ideal quando se trata de grandes plantios, nada impede que a acerola seja plantada mesmo em plena seca, desde que bem irrigada no

momento do plantio. Atualmente existem plantios de pequenos e médios portes instalados, e outros em fase de instalação nos estados da Bahia, Pará, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Rio Grande do Norte e São Paulo, visando principalmente à exportação na forma de polpa, suco ou frutas congeladas e de cápsulas de vitamina C, para a Europa, Japão e Estados Unidos. Além disso, a demanda interna aumentou nos últimos anos (MORAIS, 1996).

A cereja-das-antilhas contém também tiamina, riboflavina e niacina em pequenas quantidades e se constitui numa boa fonte de ferro e cálcio. A ingestão diária destas frutinhas, seja através do seu consumo ao natural, seja através de seus produtos-sorvetes, geléias, doces, licores, batidas e outros, propicia aos organismos uma quantidade de vitamina C bem superior às necessidades orgânicas, ao mesmo tempo em que contribui para prevenir uma série de doenças e promove suas curas.

A Tabela 2.1 apresenta a composição e valor nutritivo em g/100g de porção comestível e em miligramas de vitaminas respectivamente.

Tabela 2.1 - Composição e valor nutritivo da acerola em 100g de porção comestível

Composição aproximada	g/100g
Conteúdo de umidade	91,10
Proteínas	0,68
Extrato etérico	0,19
Fibras cruas	0,60
Total de cinzas	0,45
Carboidratos (por diferença)	6,98
Vitaminas	Miligramas
Caroteno (408 U.I. de vitamina A*)	0,408
Tiamina	0,028
Riboflavina	0,079
Niacina	0,34
Ácido ascórbico (vitamina C)	2329,0

*Um micrograma de pigmentos amarelos equivale a uma Unidade Internacional.

FONTE: NETTO (1986)

2.1.1. Ácido ascórbico - (Vitamina C)

A vitamina C (também conhecida como ácido ascórbico) é umas das 13 principais vitaminas que fazem parte de um grupo de substâncias químicas complexas necessárias para o funcionamento adequado do organismo. É uma das vitaminas hidrossolúveis, onde o organismo usa o necessário e elimina o excesso. O ácido ascórbico está amplamente distribuído na natureza em altas concentrações, particularmente em frutas cítricas e vegetais verdes. O teor de ácido ascórbico não é uniforme entre as diversas fontes, variando enormemente com a espécie, tipo de tecido, grau de maturação e procedência. Em alimentos, o ácido ascórbico tem função muito importante devido à sua ação fortemente redutora. É largamente empregado como agente antioxidante para estabilizar cor, sabor e aroma de alimentos.

O seu consumo é particularmente indicado nos casos de carência de vitamina C, como preventivo e curativo e como coadjuvante nas anorexias de várias causas, restrições dietoterápicas prolongadas, infecções de longa duração, gripes, resfriados, e em muitos outros estados patológicos (NETTO, 1986).

O alto teor de ácido ascórbico (vitamina C) encontrado na acerola foi descoberto em 1946, por Ansejo e Gusmán. A descoberta teve muito de casual, como todas as importantes descobertas, mas as experiências rigorosas, feitas a seguir, vieram confirmar que a acerola é, realmente, a mais rica fonte de vitamina C natural conhecida em todo o mundo (NETTO, 1986). A acerola tem sido consumida para atender as necessidades diárias do organismo humano e para suprir em muitos casos de carência desta vitamina em pessoas com problemas nutricionais (BRASILEIRO, 1999). Entretanto, estudos recentes do fruto de uma planta nativa da Amazônia o camu-camu, apresenta também altos valores nutritivos e, em especial, possui uma concentração de vitamina C em sua polpa superior ao da acerola.

Segundo SOARES et al. (2001), as diferenças dos teores de vitamina C é justificada em decorrência da grande sensibilidade do ácido ascórbico aos fatores

de cultivo (solo, clima, variedade), grau de maturação, tamanho dos frutos, posicionamento da árvore de acerola e entre outras.

SOARES et al. (2001) na desidratação de polpa de acerola na condição experimental definida, de tal forma que a polpa foi formulada e desidratada em estufa de secagem com circulação de ar, nas temperaturas de 60 e 70 °C, por 90 min, obtendo-se um produto em pó. Observaram logo após a desidratação (tempo zero), um valor para vitamina C na base seca, da ordem de 16,34%; após 3 meses de estocagem este valor decresceu para 11,32%, observando-se assim uma degradação de 30,8% deste nutriente.

2.2. Processo de secagem

Secagem é a remoção de água ou de qualquer outro material líquido, na forma de vapor, de um material sólido para uma fase gasosa insaturada, através de um mecanismo de vaporização térmica, numa temperatura inferior à de ebulição (OKADA et al., 1997). Na secagem ocorrem dois processos fundamentais e simultâneos: (1) transferência de calor para evaporar o líquido e (2) transferência de massa na forma de líquido ou de vapor dentro do sólido e na de vapor a partir da superfície.

A transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é fenômeno comum a qualquer condição de secagem.^x O processo de secagem, baseado na transferência de calor e de massa, pode ser dividido em três fases: a) evolução do conteúdo de umidade do produto, b) cinética de secagem e c) evolução da temperatura do produto.

^x Alguns dos mecanismos internos possíveis são: (1) difusão em sólidos, (2) escoamento capilar em sólidos granulares e porosos, (3) encolhimento do sólido em condições normais de secagem, (4) escoamento devido à gravidade e (5) escoamento provocado por seqüência de vaporização – condensação. Os mecanismos mais comuns que predominam sobre os demais são: os mecanismos

de difusão para os materiais amorfos e de capilaridade para os materiais porosos (OKADA et al., 1997).

—> Os parâmetros relacionados a variação do conteúdo de umidade com o tempo que tem influência significativa no processo de secagem, envolvendo as condições externas, são: temperatura do ar de secagem, umidade relativa do ar, velocidade do ar e também pela geometria da partícula (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

2.2.1. Comportamento geral da secagem

No estudo da secagem de um material, os dados obtidos experimentalmente relacionam em geral o conteúdo de umidade com o tempo. As curvas características de secagem podem ser representadas de diferentes formas e apresentam diferentes períodos de secagem, conforme ilustram as Figuras 2.2 e —> 2.3 (STRUMILLO & KUDRA, 1986). Toda a secagem ocorre no período transitório, durante o qual o material se adapta às condições de secagem e sua temperatura aumenta com o tempo. O segmento AB representa a fase inicial do processo onde o material se adapta às condições de secagem e sua temperatura atinge o estado estacionário. Apesar da Figura 2.3 mostrar que a velocidade de secagem aumenta durante este período, pode-se encontrar processos de secagem em que a velocidade de secagem diminui. Neste caso, a curva típica seria a do segmento A'B (Figura 2.3).

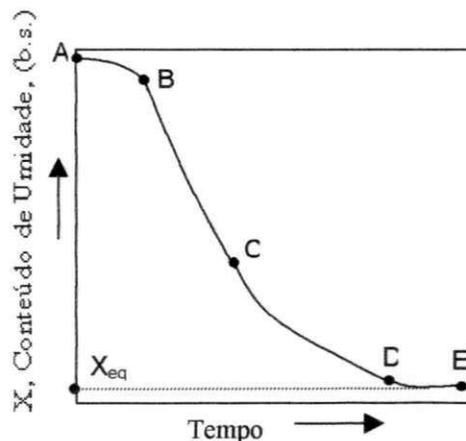


Figura 2.2 – Conteúdo de umidade contra o tempo

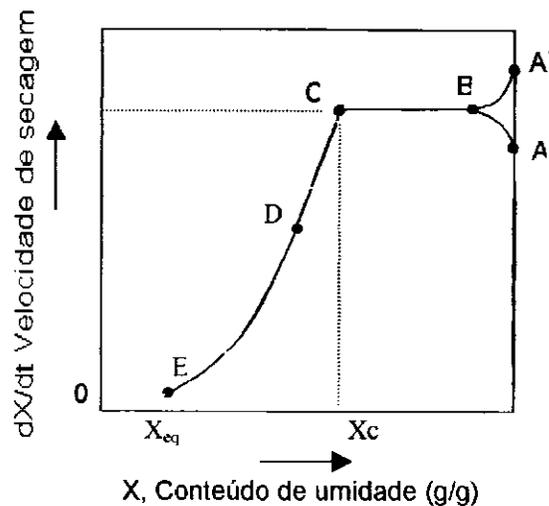


Figura 2.3 – Velocidade de secagem em função do conteúdo de umidade do material

AB – PERÍODO DE ADAPTAÇÃO

BC - PERÍODO DE VELOCIDADE CONSTANTE

CD - PERÍODO DE VELOCIDADE DECRESCENTE (1^o)

C – TEOR CRÍTICO DO CONTEÚDO DE UMIDADE

DE – PERÍODO DE VELOCIDADE DECRESCENTE (2^o)

O trecho BC corresponde ao período de velocidade constante, o ponto C corresponde ao fim deste período, tendo como coordenadas a velocidade constante de secagem (dX/dt) e o conteúdo de umidade crítica (X_c). O trecho da curva CD corresponde ao primeiro período de velocidade decrescente onde, na maioria dos casos, a velocidade de secagem decresce linearmente. A partir do ponto D vem a etapa do segundo período de velocidade decrescente, onde o conteúdo de umidade do material diminui até alcançar o conteúdo de umidade de equilíbrio para as condições usadas. A partir daí, a velocidade de secagem é nula e não se tem mais transferência de massa (TRAVAGLINI et al., 1997).

Tanto a Figura 2.2 quanto a Figura 2.3, mostram a evolução da variação do conteúdo de umidade em função do tempo de secagem. Estas curvas mostram que o processo de secagem não é um processo uniforme e contínuo com um único mecanismo de controle. Porém, é possível definir a duração de cada um

destes períodos ou secagem, o período de velocidade constante, e os períodos de velocidades decrescente.

No período à velocidade constante, a água evaporada é água livre da superfície. As transferências de massa e de calor são equivalentes e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Enquanto houver água na superfície do produto para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante. A temperatura na superfície do sólido é a temperatura de bulbo úmido do meio da secagem, desde que os efeitos de radiação e condução sejam desprezíveis em comparação ao transporte convectivo de calor. Já o período a velocidade decrescente, a quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a taxa de transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa e o fator limitante nessa fase é a redução da migração do conteúdo de umidade do interior para a superfície do produto. Nesta condição a temperatura do produto aumenta até a atingir a temperatura do ar de secagem, o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem e o processo é encerrado (BIAGI et al. (1992).

2.3. Atividade de água

A água é uma substância consideravelmente abundante na natureza sendo essencial para os seres vivos devido às diversas funções que desempenha. É um componente majoritário na maioria dos alimentos, onde contribui na forma determinante a características como textura, aparência e sabor, entre outras. Igualmente, a água é um fator importante na deteriorização dos alimentos, pois desempenha diferentes reações químicas e enzimáticas assim como o crescimento microbiano (WELTI & VERGARA, 1997).

A preservação dos alimentos pela remoção de água permite a redução do crescimento microbiano e reduz o desenvolvimento da maioria das reações bioquímicas que ocorre na presença de umidade, sendo de grande interesse para a indústria de alimentos (SILVEIRA & ALVES, 2002).

Segundo WELTI & VERGARA (1997) a atividade de água é muito adequado para indicar a estabilidade de um produto, toma em conta a interação da água com outros constituintes dos alimentos em condições de equilíbrio termodinâmico e pode ser considerada uma medida indireta da água que está disponível em um produto.

A atividade de água (a_w) é uma das propriedades mais importantes para a conservação e o armazenamento de alimentos, e sua importância é provavelmente maior que o pH, o conteúdo de umidade e outras propriedades constantemente monitoradas em alimentos (SANTIN, 1996).

A atividade de água pode ser definida como a relação entre a pressão de vapor da água no ar e a pressão de vapor da água no ar saturado, medidas à mesma temperatura. Quando se refere à atividade de água de um alimento, isto significa a relação entre a pressão de vapor da água no alimento (P) e a pressão de vapor da água pura (P_0), medidas à mesma temperatura, este tem influência no desenvolvimento de microrganismos em alimentos, velocidade de reações enzimáticas, oxidação de lipídeos, hidrólise e escurecimento não-significativo, assim como na cristalização e retrogradação que podem ocorrer em alimentos (GOUVEIA, 1999). Em símbolos:

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (2.1)$$

A atividade de água (ou umidade relativa) é proporcional à umidade relativa do ar em equilíbrio com o produto, de acordo com a equação:

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

O desenvolvimento microbiano nos alimentos é condicionado por diversos fatores intrínsecos, bem como por fatores extrínsecos (temperatura, umidade relativa e atmosfera). A atividade de água é um dos principais fatores intrínsecos,

tendo ao lado do pH, potencial redox e composição do alimento, uma importância crítica na estabilidade biológica de diferentes produtos (SANTIN, 1996).

Os fatores ambientais afetam o nível de a_w necessário ao desenvolvimento microbiano. O princípio geral que freqüentemente se aplica é aquele em que quanto mais favoráveis sejam os fatores ambientais (adequação nutricional, pH e temperatura) menor se torna a a_w mínima na qual o crescimento pode ocorrer (EIROA, 1997).

O crescimento dos microrganismos depende da a_w em razão da influência da pressão osmótica sobre as trocas através das membranas. O intervalo da a_w no qual são observados os desenvolvimentos microbianos varia de 0,6 a 0,99. Em geral, o valor ótimo da a_w para o crescimento se situa entre 0,9 e 0,99. Abaixo deste valor o crescimento é moderado, retardado ou inibido. Assim, todo microrganismo é caracterizado por um valor de a_w mínimo, abaixo do qual não pode mais se desenvolver (SANTIN, 1996).

De um modo geral, pode-se dizer que o ponto de conservação ótimo dos produtos biológicos, sem aditivos nem refrigeração, se situa geralmente entre 0,25 e 0,35.

A Tabela 2.2 apresenta a a_w mínima que permite o desenvolvimento de diferentes tipos de microrganismos em alimentos.

Tabela 2.2 – Atividade de água mínima de crescimento de microrganismos

Tipos de microrganismos	a_w mínima de crescimento
Bactérias	0,91
<i>Staphylococcus aureus</i>	0,85
Leveduras	0,88
Bolores	0,80
Bactérias halófilas	0,75
Bolores xerófilos	0,61
Leveduras osmotolerantes	0,60

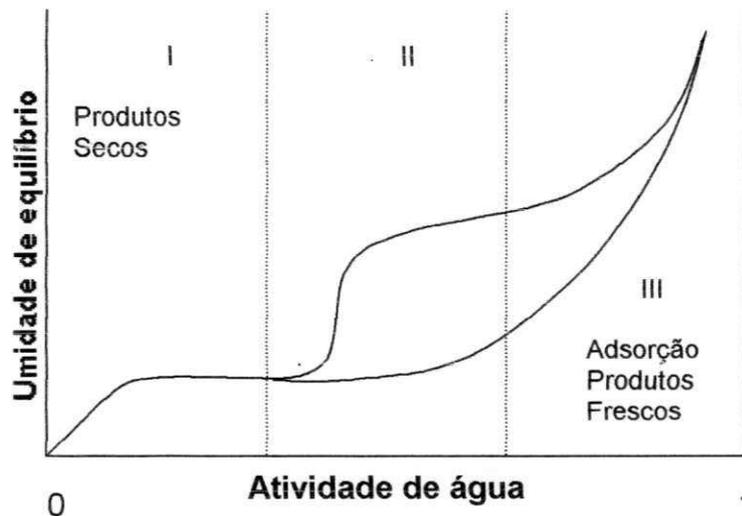
FONTE: EIROA (1997)

2.4. Isoterma de sorção

Segundo PARK et al. (2001) o estudo da atividade de água pode ser feito através das isotermas de sorção. Uma isoterma é uma curva que descreve, em uma umidade específica, a relação de equilíbrio entre uma quantidade de água sorvida por componentes do material biológico e a pressão de vapor ou umidade relativa, a uma dada temperatura, e são normalmente determinadas experimentalmente. Esta relação depende da composição química dos alimentos (gordura, amido, açúcar, proteínas, entre outras).

Através da construção de isotermas, pode-se resolver numerosos problemas de processamento e estocagem de produtos alimentícios (PENA et al., 2000).

A Figura 2.4 esquematiza uma isoterma de sorção típica de produtos alimentícios, normalmente conhecida como "Mapa de estabilidade dos alimentos". Dividida em três zonas, cada uma destas zonas está associado com uma interação diferente da água. A maioria das reações químicas e o crescimento microbiano vêm reduzindo consideravelmente quando diminui a atividade de água. Também se pode observar o fenômeno de histerese que se produz na determinação da isoterma de um produto e que provoca relações diferentes entre o conteúdo de umidade e a atividade de água, em adsorção e em dessorção. A histerese parece ser um índice de que o alimento não está em um verdadeiro equilíbrio termodinâmico.



FONTE: WELTI & VERGARA (1997)

Figura 2.4 - Isoterma de sorção de umidade típica de um alimento

A zona I da isoterma (Figura 2.4), onde a_w estar entre 0 e aproximadamente 0,25, representa água fortemente unida a sítios polares, sendo a mesma difícil de eliminar durante a secagem e no congelamento a $-40\text{ }^\circ\text{C}$. Esta água que está em uma quantidade pequena, trás um efeito plastificante no sólido e se comporta como parte do sólido. O limite entre a zona I e a zona II se tem associado ao conteúdo de umidade de "monocapa" do alimento e representa a fração de água que atua diretamente com a superfície de grupos polares. A zona II da isoterma, corresponde aproximadamente a níveis de a_w entre 0,25 e 0,80. A água nesta zona forma capas adicionais ao redor dos grupos polares e se chama "água de multicapa". Esta água tem propriedades diferentes da água pura. A água da zona I e zona II combinada, constituem em torno de 5% do total de água em um alimento de alta umidade.

A zona III da isoterma corresponde a valores de a_w maiores de 0,80. Frequentemente a proporção de água na parte superior desta zona, se conhece como "água livre". Esta água constitui 95% da água total de um alimento de alta umidade, é suficientemente abundante para permitir reações químicas deteriorativa e ao crescimento microbiano.

2.4.1. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas de sorção

Modelos matemáticos que descrevem isotermas de sorção são de fundamental importância, pois com um certo número de pontos experimentais é possível ajustar uma isoterma teórica e desta forma fazer a correspondência entre conteúdo de umidade do alimento (X) e atividade de água (a_w) podendo-se extrapolar valores de difícil determinação experimental (SANTIN, 1996).

Segundo PARK et al. (2000) com o intuito de prever o comportamento das isotermas, diversos autores propuseram modelos de ajuste de isotermas de sorção, que totalizam cerca de 77 diferentes equações. Estes modelos são úteis no conhecimento das características dos produtos. Em sua maioria são modelos empíricos e alguns são apresentados a seguir na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Modelos para ajustes de isotermas de sorção de umidade

NOME DO MODELO	MODELO
LANGMUIR	$\frac{X_{eq}}{X_m} = \frac{C a_w}{1 + C a_w} \quad (2.3)$
BET (BRUNAUER, EMMETT e TELLER)	$X_{eq} = \frac{(X_m C a_w) \cdot (1 - (b+1)a_w^b + n a_w^{b+1})}{(1 - a_w) \cdot (1 + (C-1)a_w - C a_w^{b+1})} \quad (2.4)$
BET linearizando (BRUNAUER, EMMETT e TELLER)	$\frac{a_w}{(1 - a_w) X_{eq}} = \frac{1}{X_m C} + \frac{a_w \cdot (C-1)}{X_m C} \quad (2.5)$
GAB - GUGGHEMHEIM, ANDERSON e de BOER (PARK & NOGUEIRA)	$X_{eq} = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w) \cdot (1 - K a_w + C K a_w)} \quad (2.6)$
HALSEY	$a_w = \exp\left(\frac{-a}{X_{eq}^b}\right) \quad (2.7)$
OSWIN (CHINNAN & BEAUCHAT)	$X_{eq} = a \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^b \quad (2.8)$
PELEG	$X_{eq} = K_1 a_w^{b1} + K_2 a_w^{b2} \quad (2.9)$
HENDERSON (ASAE)	$1 - a_w = \exp\left[-\left(K \cdot X_{eq}^b\right)\right] \quad (2.10)$
CHUNG & PFOST	$\ln a_w = -\frac{a}{R \cdot T} \cdot \exp(-b \cdot X_{eq}) \quad (2.11)$

O modelo de Guggenheim-Anderson-De Bôer (GAB) é um modelo semiteórico de sorção de multicamada que permite um bom ajuste para a maioria dos alimentos, em cima de uma maior variação de temperatura e atividade de água (OKOS et al.; RAHMAN) citados em RAHMAN et al. (1997).

$$X_{eq} = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (2.6)$$

onde X_{eq} é o conteúdo de umidade de equilíbrio em base seca (g água/g sólidos secos), a_w a atividade de água, X_m o conteúdo de umidade da monocamada (base seca), C a constante relacionada com o calor de sorção da monocamada e K a constante relacionada com o calor total de sorção.

A equação da isoterma de GAB é uma extensão do modelo de BET tomando em conta as propriedades modificadas na região de multicamada e as propriedades líquidas pela introdução de um terceiro constante K (RAHMAN et al., 1997). Nesta equação,

$$C = C_o \exp\left(\frac{\Delta H_c}{RT}\right) \quad (2.12)$$

e

$$K = K_o \exp\left(\frac{\Delta H_k}{RT}\right) \quad (2.13)$$

onde ΔH_c e ΔH_k são funções do calor de sorção da água: $\Delta H_c = H_m - H_n$ e $\Delta H_k = \lambda - H_n$. Nas expressões acima C_o e K_o são constantes ajustadas com o efeito da temperatura, H_m e H_n os calores de sorção de monocamada e multicamada de água, respectivamente e λ o calor de condensação da água pura (TELIS et al., 2000).

Os parâmetros podem ser calculados, ajustando o modelo matemático aos dados experimentais e fazendo-se regressão não-linear.

2.5. Secagem de acerola

BRASILEIRO (1999) estudou a cinética de secagem em leito fixo da acerola "in natura" em monocamada, analisado o efeito da temperatura do ar de secagem (60 - 90 °C) e velocidade do ar de secagem (0,7-1,5 m/s). Concluiu que a velocidade do ar tem pouca influência na taxa de secagem. Porém, esta considerável taxa aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura do ar de secagem.

SILVA (1998) estudou o efeito de vários pré-tratamentos químicos antes da secagem convectiva com o objetivo de reduzir o tempo de secagem da acerola em um secador de leito fixo nas temperaturas de 70 e 80 °C e velocidade do ar de 1,5 e 1,84 m/s. Os pré-tratamentos com sacarose (67%)+NaCl (1%), com tempo de imersão de 4 h e soluções de Hidróxidos de Sódio entre (1% e 3%), variando o tempo de imersão entre 1 e 10 min, com temperatura de pré-tratamentos de 25 °C, não foram eficazes na redução do tempo de secagem. A redução do tempo de secagem foi notória com o aumento da temperatura de imersão, nos pré-tratamentos com 94,78% água+4,74% K₂CO₃+0,48% azeite de oliva, durante 3 min a 35 °C, Hidróxido de sódio (0,3%), durante 5 seg a 93 °C e 94,78 % água + 4,74% K₂CO₃ + 0,48 % azeite de oliva, durante 2 seg a 90 °C, obtendo redução do tempo de secagem de aproximadamente 81 min, nos pré-tratamentos a temperatura alta.

2.6. Desidratação osmótica

2.6.1. Fundamentos teóricos

O processo de osmose consiste basicamente na remoção da água de uma solução menos concentrada, contida dentro de uma membrana semipermeável, envolvendo essa membrana com uma solução mais concentrada (TRAVAGLINI et al., 1997).

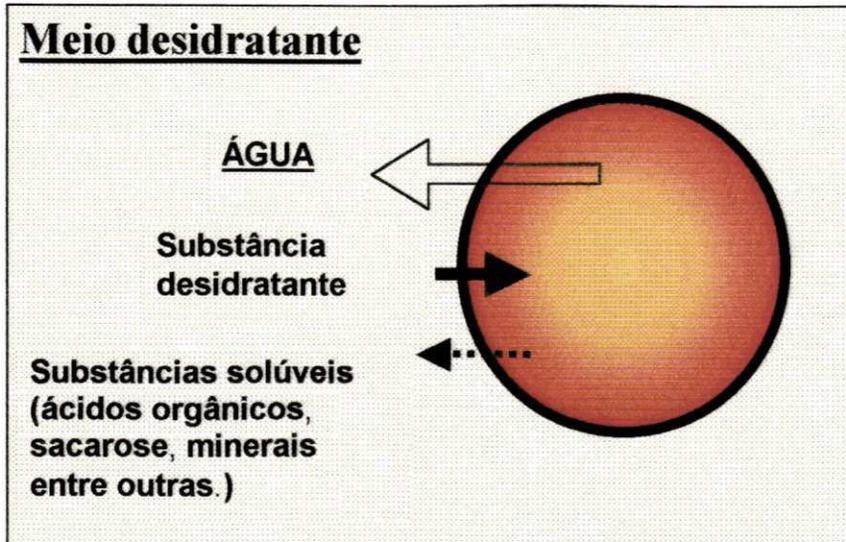
A retirada da água da fruta é possível porque as membranas celulares são semipermeáveis e permitem a passagem de água mais rápida do que a de açúcar. Entretanto, se o processo for muito longo, quantidades consideráveis de açúcar podem passar para a fruta. Durante a osmose, os ácidos da fruta são removidos juntamente com a água. Assim, as características do produto podem variar, controlando-se a temperatura e a concentração da solução de sacarose, de modo a aumentar ou diminuir a velocidade de desidratação (TRAVAGLINI et al., 1997).

A desidratação osmótica tem sido associada a diferentes tipos de processamento na forma de um pré-tratamento, sendo que seus efeitos refletem-se positivamente nas propriedades, nutricionais e funcionais do produto seco (NOVY QUADRI et al., 1996).

Segundo AGUIAR et al. (2002) a desidratação osmótica tem baixos custos energéticos frente a outros métodos de desidratação, adapta-se a todas as escalas de produção, sendo uma alternativa tecnológica à redução das perdas pós-colheitas.

A Figura 2.5 ilustra a "desidratação osmótica". Este processo consiste em mergulhar frutas e vegetais em soluções hipertônicas (açúcares, cloreto de sódio, glicerol, entre outras), permitindo que ocorra uma troca de massa em dois sentidos. Dois fluxos de massa principais existem: o fluxo de água que difunde do interior da amostra para a solução circunvizinha, e no sentido oposto, um fluxo concomitante da substância osmótica que difunde da solução no tecido desidratado. O terceiro fluxo consiste na perda de alguns sólidos naturais da substância desidratada, como açúcares, ácidos orgânicos, sais minerais, entre outro nutritivo. Este fluxo não apresenta nenhum significado na troca de massa, mas tem uma influência nos valores nutritivos finais (vitamina C e mineral) e propriedades organolepticas do alimento (sabor, cor e textura). O resultado da troca de massa é uma diminuição da água com um aumento simultâneo do ganho dos sólidos assim como uma mudança da constituição química do alimento desidratado, resultando num produto mais suave no gosto e mais doce do que o produto sem tratamento. A preservação por meio do método osmo-convectivo

reduz o consumo de energia em uma faixa de 20 à 30% quando comparada à secagem convectiva (LENART, 1996).



FONTE: LENART (1996)

Figura 2.5 – Transferência de massa durante a desidratação osmótica

A desidratação osmótica é um processo que remove água dos alimentos sólidos. Como a atividade de água nos alimentos está relacionada com o crescimento de microrganismos, sua diminuição impede reações bioquímicas que dependem do conteúdo de umidade, evitando a rápida deterioração que ocorre nos frutos "in natura". Além disso, a desidratação se revelou também como uma forma de reduzir os custos energéticos, importante para o transporte, embalagem e armazenamento dos alimentos com alto conteúdo de umidade (PARK et al., 2001).

Segundo GOULARTE et al. (2000), a concentração osmótica apresenta vantagens para as frutas desidratadas, como melhoria na cor e sabor. A sacarose como agente osmótico, pode reduzir a acidez natural das frutas, aumentando o sabor doce no produto final, reduzindo o custo com energia e o tempo de desidratação.

Na desidratação osmótica, o fluxo de água que sai do alimento é grande em relação ao fluxo de substância que entra. Esta relação foi observada, com maçã por LENART & LEWICK (1990).

Segundo LENART (1996), a sacarose é considerada a melhor substância osmótica, especialmente quando a desidratação osmótica é empregada como um tratamento preliminar antes de secar. A presença de sacarose na superfície da amostra é um obstáculo para o contato com oxigênio que resulta em uma redução do escurecimento enzimático.

Algumas vantagens da desidratação osmótica podem ser citadas (SILVEIRA & ALVES, 2002):

- Obtém-se uma diminuição do conteúdo de umidade inicial do alimento em torno de 20-50%.
- Conservação das características organolépticas e nutricionais, que visa primeiramente melhorar a qualidade ao produto.
- Reduzir o tempo de secagem convectiva e custo do processo.

Algumas desvantagens da desidratação osmótica podem ser citadas (TRAVAGLINI et al., 1997):

- Permanência de uma indesejável fina camada de açúcar na superfície da fruta, que pode ser eliminada pela lavagem com água.
- Tendência de tornar rançosa a fruta e com conteúdo de umidade muito baixo.

2.6.2. Desidratação osmótica seguida da secagem convectiva

O processo de desidratação osmótica seguida da secagem convectiva é muito útil, visto que influencia na qualidade do produto e prolonga a vida de prateleira. Consequentemente é de grande importância entender os aspectos físicos e mudanças que acontecem durante esse processo.

A secagem convectiva após o tratamento osmótico tem sido apresentada por vários autores. Eles observaram que durante a osmose, aumenta a estabilidade dos pigmentos das frutas no processo de secagem e armazenagem, e que a qualidade sensorial também melhorou a acidez da fruta. Todavia, comparando frutas que sofreram desidratação osmótica com frutas "in natura", as primeiras apresentaram uma redução de água maior durante o processo de secagem convectiva (PEREIRA, 2000).

A secagem também provoca as mesmas alterações da desidratação osmótica, excluindo a incorporação de sólidos. Entretanto, a perda da quase totalidade da água livre presente não ocorre pela diferença de pressão osmótica, mas pela vaporização ou sublimação da água. Em secagens com ar quente esta vaporização ocorre pela diferença de temperatura entre o ar quente e a fruta, determinando uma diferença de pressão de vapor entre o ar e a superfície da fruta, e, ocasionando a transferência de massa de água para o ar, na forma de vapor de água (PARK et al., 2001).

WELTI et al. (1995) estudaram fatias de mangas com atividade de água de 0,97 e 0,95, as quais foram imersas em solução de sacarose por 3 dias a $25 \pm 0,5$ °C. Em seguida as mangas foram secas em secador tipo túnel com velocidade do ar de 1,5 m/s e temperatura de bulbo seco de 50, 60 e 70 °C. De acordo com os resultados obtidos, o processo de secagem das mangas osmoticamente tratadas depende da temperatura. Outro resultado que obtiveram relaciona-se à umidade, quanto menor era a umidade das mangas desidratadas antes da secagem convectiva, menor a quantidade de água removida durante a secagem convectiva da mesma. Observaram ainda que o tempo necessário para reduzir a umidade

final das mangas osmoticamente desidratadas foi consideravelmente menor quando comparado com o processo sem tratamento.

A desidratação osmótica anterior ao processo de secagem surge como uma alternativa de minimizar a perda de vitamina C e de evitar prejuízos ao produto final.

2.6.3. Fatores que influenciam a desidratação osmótica

A velocidade da desidratação osmótica de produtos depende de diversos fatores tais como: tipo de material, geometria, tamanho, estado de maturidade, natureza da membrana celular, bem como das variáveis do processo: solução desidratante, concentração da solução, temperatura, tempo de contato, nível de agitação, relação de solução/produto, método de contato e tempo de imersão.

Segundo NSONZI & RAMASWAMY (1998a), o objetivo de modelar o processo de desidratação osmótica está relacionado com a compreensão da influência de fatores tais como: temperatura, concentração, tempo de contato da solução osmótica, natureza do material do alimento, tamanho e forma, nos fenômenos de transferência de massa da perda de umidade e do ganho dos sólidos. De acordo com PONTING et al. (1966); TORREGGIANI et al. (1998) e YANG & Le MAGUER (1992). As condições processadas tais como a temperatura, o tempo de contato e a concentração da solução osmótica, influenciaram as características do produto e a qualidade final. Isto sugere obviamente a necessidade de estabelecer a cinética.

2.6.4. Variáveis de processos

2.6.4.1. Tipo de agente desidratante

Os dois tipos mais comuns de solutos usados para tratamentos osmóticos são açúcares (principalmente para frutas) e sais (para vegetais, peixes, carne e queijo), com relevância para a sacarose e cloreto de sódio que apresentam

vantagens descritas já por diversos autores (PONTING, 1973; LENART & FLINK, 1984).

SRZEDNICKI et al. (1996) na secagem de cereja doce Australiana, utilizaram os seguintes pré-tratamentos: I) 67% de sacarose + 0,5% de cloreto de sódio e II) 67% de sacarose + 1% ácido ascórbico, mergulhando as cerejas durante 4 h na solução e em seguida desidratando-as em um secador a uma velocidade do ar de secagem de 0,9 m/s e temperaturas de secagem entre 50 e 90 °C. Observaram o efeito da desidratação osmótica, devido à alta concentração da solução de sacarose e concluíram que estes pré-tratamentos resultam na preservação da cor vermelha.

SILVA (1998) estudou a influência do pré-tratamento químico para acerola, com concentração de sacarose com 67% de sacarose + 1% NaCl durante 4 h à temperatura ambiente e observou a preservação da cor da fruta fresca até o produto seco. Antes de submeter às acerolas ao pré-tratamento, a solução apresentava 67,34% de açúcar, após as 4 h de pré-tratamento a solução do pré-tratamento passou a ter aproximadamente 66,43% de açúcar. Observou ainda que, durante o pré-tratamento, ocorreu uma pequena desidratação osmótica, onde se verificou que a película da acerola é muito resistente à transferência de massa, resultando em uma diminuição de apenas 0,91% da umidade das acerolas durante 4 h de tratamento.

SERENO et al. (2001) na desidratação osmótica da maçã, pela imersão em solução binária aquosa de cloreto de sódio e sacarose com concentrações e temperaturas diferentes. As soluções osmóticas binárias de sacarose (40, 50 e 60%) e de cloreto de sódio (15, 22 e 26,5%) foram usadas junto com soluções de 30/10, 40/10, 50/10 e 20/15, 30/15, 40/15 % de sacarose e de cloreto de sódio, respectivamente; as amostras foram processadas durante 4 h. As experiências foram conduzidas sob condições estáticas em 5, 20, 40 e 60 °C. Em intervalos dados, foram analisadas as perdas de peso, perda de água e o ganho dos sólidos. Os autores concluíram que a razão da perda de água ao ganho dos sólidos para cada tratamento era particularmente elevada nas soluções de sal. Observaram que a temperatura nas soluções de sacarose tem efeito importante

na taxa de desidratação de maçã, e nas soluções com cloreto de sódio o efeito não era tão forte quanto com sacarose, provavelmente devido a um efeito menor na viscosidade da solução. O comportamento da cinética da desidratação de sacarose em dois níveis de cloreto de sódio de 10 e 15%, também foi estudado. Em ambos os casos, observaram que a taxa de desidratação aumentou com a pressão osmótica da solução, o mesmo tipo de dependência foi verificado em temperaturas diferentes.

ARGAIZ et al. (1994) reportaram que o xarope usado para a desidratação osmótica do abacaxi, mamão e pêssago podem ser usados de 4 a 7 vezes, dependendo mais da qualidade microbiológica do açúcar do que do próprio processo. Quando o xarope não é reutilizado, há um desperdício industrial, aumentando extremamente o custo do produto osmo-desidratado, conseqüentemente a reutilização das soluções na desidratação osmótica é muito importante para fazer o processo econômico e viável, do ponto de vista ambiental.

VALDEX-FRAGOSO et al. (1998) estudaram a reutilização das soluções concentradas de desidratação osmótica, para garantir a viabilidade econômica deste processo, determinando assim as modificações que uma solução de açúcar sofre quando usada 20 vezes, durante a desidratação osmótica de cubos de maçã, medindo a evolução de suas propriedades físico-químicas. Ao começar um processo novo de desidratação osmótica, a massa do xarope foi reajustada a seu valor inicial pela adição de sacarose cristalizada. Foi observado um aumento de 3,4% na massa do xarope para cada processo de desidratação osmótica e quanto a sua acidez, o pH da solução estabilizou-se após a terceira reutilização, os açúcares se reduziram e a condutividade elétrica se estabilizou depois da sexta reutilização. A análise microbiológica do xarope mostrou níveis elevados de leveduras e bolores, e somente depois de 15 vezes de reutilização apresentou um aumento progressivo da turbidez e escurecimento.

2.6.4.2. Efeito do tempo, da temperatura e da concentração da solução na secagem osmo-convectiva

PONTING et al. (1966) e VIDEV et al. (1990) verificaram o efeito da temperatura na desidratação osmótica e verificaram que com o aumento da temperatura, a transferência de massa aumenta. Por outro lado com temperaturas acima de 45 °C, ocorre o escurecimento enzimático e em alguns produtos há deterioração do sabor.

AGUIAR et al. (2002) no estudo da desidratação osmótica da banana nanica aliada à secagem visando à obtenção de um produto com características organolépticas e nutricionais o mais próximos da fruta "in natura". Foram realizados análises físico-químicas para toda o processo e análise sensorial. A solução osmótica utilizada foi 50 °Brix na temperatura de 50-70 °C, com tempo de imersão de 1 - 4 h seguida da secagem em estufa com circulação de ar a 60 °C, por tempos que variam de 4 a 6 h. Concluíram que a condição 50 °Brix / 70 °C com tempo de imersão de 3 h, foi a mais adequada, pois possibilitou maior perda de umidade, mantendo as características do produto original, apresentando um índice de aceitabilidade acima de 70%. Obtiveram na desidratação osmótica perda de peso de 30%, perda de umidade de 45%, ganho de sólidos 15%, e no processo global, a perda de peso foi na faixa de 70% e perda de umidade 76%.

Segundo ARGANDOÑA (1999) e LEVI et al. (1983) relataram que um tratamento osmótico a temperatura ambiente apresenta vantagens em relação ao tratamento osmótico a altas temperaturas: (a) durante o tratamento osmótico a quente, ocorre considerável impregnação dos tecidos da fruta com açúcar, o que não ocorre no tratamento osmótico à temperatura ambiente; (b) o tratamento osmótico à temperatura ambiente evita danos à estrutura da fruta resultando em melhor qualidade (em termos de cor, sabor e aparência). Os autores, entretanto, destacaram as seguintes desvantagens esperadas do tratamento à temperatura ambiente: (a) necessidade de maior quantidade de açúcar (o que pode ser minimizado por recirculação do xarope) (b) aumento do risco de contaminação

microbiana (que pode ser reduzido por abaixamento do pH e por incorporação de agentes preservantes).

NOSNZI & RAMASWAMY (1998a) avaliaram a influência da secagem osmo-convectiva em relação à cor, a textura e razão de rehidratação das uvas. As amostras foram desidratadas em cinco níveis da concentração de sacarose (47, 50, 55, 60, 63 °Brix), nas temperaturas de 37, 40, 45, 50 e 53 °C e o tempo de contato de 0,5; 1,5; 4,5; 5; e 5,5h. Após o tratamento as amostras foram desidratadas em um secador convectivo de bandeja a um índice de umidade final de 18% (b.u.), nas seguintes condições: temperatura 50 ± 1 °C, velocidade do ar $0,64 \pm 0,2$ m/s e umidade relativa $14 \pm 1\%$. Observaram que a diferença da cor e a dureza do produto foram relacionadas à temperatura, concentração de sacarose e tempo de contato durante o pré-tratamento osmótico. A desidratação osmótica realizada em um tempo curto de contato minimizou perdas da cor durante a secagem convectiva, e a relação da rehidratação das uvas-do-monte desidratadas mediante processo osmo-convectiva foram mais baixas que às relações de rehidratação de uvas-do-monte desidratadas em freezer e em secagem convencional. RAMASWAMY & NOSNZI (1998c), nas mesmas condições da desidratação osmótica seguida da secagem em um secador de bandeja (53 °C, umidade relativa: 14% e velocidade do ar: 0,6 m/s), verificaram que a temperatura e a concentração de sacarose durante o pré-tratamento osmótico influenciaram na redução do tempo de secagem.

SHI et al. (1995) verificaram a influência de tratamentos à vácuo na perda de água e ganho do açúcar no tecido das frutas (damasco, morango e abacaxi), durante a desidratação osmótica. As frutas frescas foram descascadas e cortadas em cubos e imersas na solução de sacarose de 65 °Brix nas temperaturas entre 30-50 °C em uma imersão de 15 – 240 min sob tratamento a pressão atmosférica e vácuo (100 mbar). Concluíram que na desidratação osmótica das frutas sob vácuo tornou possível obter-se uma taxa mais elevada da perda de água em temperaturas mais baixas da solução. Os tratamentos à vácuo conduzem a um aumento importante na perda de água do abacaxi de 24,3%, no damasco de 24,2% e no morango de 15,2% em comparação aos tratamentos normais de pressão. O ganho do açúcar está relacionado às características biológicas da

fruta fresca. As frutas com porosidade mais elevada são mais apropriadas para o tratamento com vácuo.

ALVAREZ et al. (1995) na desidratação osmótica do morango, com umidade inicial de aproximadamente 86%. Na desidratação osmótica os morangos foram imersos em soluções de sacarose de 51% com tempo de imersão de 48 h a 25 °C. Observaram que o morango desidratado a 35% da solução de sacarose, removeu 10% da umidade inicial e submetidos a 51% da solução de sacarose removeu 19%.

Segundo ARGANDOÑA (1999), MOY et al. (1978) mostraram que a remoção de água na desidratação osmótica de fatias de mamão e manga é diretamente proporcional à concentração do xarope de sacarose (0-60%) a 21 °C por tempo variado (1 – 12h), sendo o melhor tempo de desidratação 6 h. Para desidratação de manga, os autores combinaram sacarose com ácidos orgânicos (lactose e acético) afim de evitar a gelatinização da pectina e obter velocidade de remoção de água eficiente.

Segundo NSONZI & RAMASWAMY (1998b) a desidratação osmótica de uva, o coeficiente de difusão aumenta com a concentração crescente e a temperatura. Exceto para a temperatura de 40 °C, quando a difusividade da solução de 70 °Brix era mais baixa que da solução de 40 °Brix. Para a condição de 40 °C – 70 °Brix, ocorre à formação de uma camada mais grossa de solução de sacarose em torno da superfície. A viscosidade de sacarose aumenta, quando há um aumento da concentração de sacarose de 60 para 70 °Brix, na solução altamente viscosa de sacarose pode mesmo ter iniciado a formação de um filme de açúcar ao longo da película, relativamente estagnada na superfície da uva, inibindo assim a perda de umidade.

VIBERG et al. (1998) no tratamento osmótico de duas variedades de morango e o efeito do encolhimento, em soluções aquosas de sacarose granulada de 20 – 85%. Observaram que o aumento da concentração da solução de sacarose (até 85%), aumentou a perda de água e conseqüentemente um lento ganho dos sólidos, menor quando os morangos foram processados no açúcar. O

pré-tratamento em uma solução de sacarose 60 % em 90 °C por 12 min sem agitação apresentou o melhor resultado e resultou em um aumento da densidade combinada com um pequeno aumento de volume. Portanto, o uso de sacarose granulada resultou num encolhimento maior. Os morangos osmoticamente processados não apresentaram mudança notável em seu volume e o tratamento térmico não alterou o volume dos morangos.

SILVEIRA et al. (1996) estudaram a cinética da desidratação osmótica do abacaxi e a qualidade do produto, com concentrações do xarope de sacarose de 50 a 75% e temperatura de 30 a 60 °C, respectivamente. A duração da desidratação osmótica foi de 5 à 20h, dependendo das circunstâncias do processo. Em seguida a amostra foi dividida em duas parcelas para secagem convectiva em dois tipos de secadores (gabinete e bandeja). Concluíram que a perda de água e o ganho dos sólidos aumentaram com o aumento da concentração e da temperatura do xarope de sacarose. As constantes de equilíbrio e as taxas de secagem foram modeladas em função da concentração e da temperatura do xarope de sacarose e serão úteis para projetar o equipamento de desidratação osmótica do abacaxi. A cor, o sabor e a textura do abacaxi desidratado osmo-ar foi organolepticamente aceitável após 3 meses de estocagem a 25 °C.

AZEREDO & JARDINE (2000) otimizaram o processo de desidratação osmótica, no sentido de minimizar a incorporação de solutos e maximizar a perda de água, afim de se obter um produto com boa estabilidade microbiológica. Analisaram pedaços de abacaxi não-revestidos (A), revestidos com cobertura de alginato (B) e revestidos com cobertura de pectina de baixa metoxilação (C). O processo envolveu as etapas principais: inativação enzimática de pedaços da fruta; para os tratamentos B e C, revestimento da fruta com as respectivas coberturas; e desidratação osmótica em solução de sacarose contendo sorbato de potássio e ácido cítrico. As condições ótimas do processo, determinadas a partir da Metodologia de Superfície de Resposta, foram as seguintes: desidratação da fruta revestida com alginato, as temperaturas na faixa de 42 a 47 °C, em xarope de sacarose a 66-69 °Brix, por 220 a 270 min. Os resultados indicaram que as coberturas afetaram significativamente as transferências de

massa do processo, reduzindo a incorporação de sólidos e aumentando a perda de umidade, com conseqüente aumento na perda de massa e aumento na relação de performance (perda de umidade e incorporação de sólidos). A atividade de água final do produto não foi afetada de forma marcante pela presença das coberturas, e o produto obtido apresenta uma boa aceitação.

2.6.4.3. Agitação

Segundo ARGANDOÑA (1999), muitos trabalhos mostraram que a agitação de solução osmótica tem um efeito significativo sobre a perda de água. Na ausência de agitação, a perda de água é menor devido à formação de uma camada estagnada de solução ao redor do material que torna mais lenta a saída da água do seu interior. A agitação garante a remoção da solução concentrada ao redor do material e, portanto uma diferença de concentração é criada favorecendo a perda de água e um menor ganho de sólidos (RAOULT-WACK et al., 1992; LAZARIDES et al., 1995; LENART, 1996).

A desidratação osmótica normalmente é administrada com agitação da solução líquida para reduzir a resistência externa e aumentar a taxa de transferência de massa global. MOREIRA & SERENO (2003) para alcançar um controle hidrodinâmico, construíram uma coluna cilíndrica que manteve as amostras (cilindros de maçã) submergidas em uma solução líquida dinâmica, inserido em um circuito (bomba de centrifuga) que permite um fluxo contínuo em uma velocidade especificada do fluxo da solução ao redor do material.

SOUZA (2002) estudou a desidratação osmótica de pedaços de tomate com e sem pele em solução osmótica variando de NaCl (5-10%) + Sacarose (25-35%), em tempo de imersão entre 30 e 360 min e temperatura da solução variando de 30 a 60 °C, sob o efeito de agitação com um agitador mecânico. Após a desidratação osmótica, os tomates foram levados a um secador convectivo de bandejas nas condições de 50 – 60 °C e velocidade do ar de 0,87 m/s. Observou que a elevação da temperatura da solução osmótica provoca um aumento da perda de umidade, em proporção bem maior do que o ganho de sólidos. A pré-

desidratação com e sem pele em solução osmótica com 5% de NaCl e 35% de sacarose durante 180 min a 60 °C apresentou os melhores resultados. A temperatura de secagem no secador convectivo de 60 °C promoveu as maiores taxas de evaporação aos tomates com pele pré-desidratada osmoticamente e aos tomates "in natura" sem pele.

SILVEIRA & ALVES (2002) na cinética de secagem do tomate, a qual consistiu de várias etapas: primeiramente preparou-se a amostra fazendo uma seleção visual, retirando a pele e cortando-as em diferentes formas. Estudaram também o efeito do tratamento químico e físico da pele. Os tomates foram osmoticamente desidratados em solução de sacarose 45, 50 e 55% e de NaCl 10, 15 e 25% agitados com velocidade de 150, 190 e 220 rpm, nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C, durante 6 h, e em seguida desidratados em um secador de bandejas nas temperaturas de 45, 55 e 65 °C e velocidade do ar de secagem de 1,5, 2,0 e 2,5 m/s, e na estufa a vácuo com pressão de vácuo de 5, 16 e 25 inHg, comparando os resultados dos dois secadores. Concluíram que o secador de bandeja obteve menores tempos de secagem do que a estufa a vácuo, e as taxas de desidratação osmótica são influenciadas pela concentração da solução osmótica, presença da pele, forma do tomate e a temperatura do processo. Portanto a temperatura do processo exerce uma maior influência na cinética da secagem do que a velocidade e pressão de vácuo.

SHI et al. (1997) utilizaram três soluções químicas para remover parcialmente a camada de cera da superfície da pele dos tomates para aumentar a permeabilidade de água: a) 1-8% de NaOH com ou sem 2-8% oleato de etil, b) 1-8% de HCl com ou sem 2-5% de cloreto de etil e c) 2-8% de oleato de etil, mergulhando tomate inteiro em uma solução acima de 25 °C ou em 30 °C, com agitação por 20 min. Após o tratamento da pele, foram desidratadas osmoticamente em uma solução de açúcar (60 °Brix) durante 6 h a 20 °C, usando uma bomba para circular a solução osmótica. O índice de água da amostra foi determinado gravimetricamente pela secagem em forno a vácuo em 70 °C durante 24 h. Observaram que a perda de peso dos tomates tratados em solução misturada de NaOH e o cloreto de etil foram mais elevados, que a solução NaOH na mesma concentração. Verificaram também que o aumento da temperatura do

tratamento, aumenta a perda de peso e que a pele do tomate não danificada após o tratamento é uma barreira eficaz para manter o açúcar no tecido do tomate, não apresentando nenhum efeito negativo, tanto no gosto quanto no sabor natural do tomate.

EL-AOUAR et al. (2002) na cinética do processo de desidratação osmótica de cubos de mamão formosa e avaliaram a qualidade do produto final. O tratamento osmótico foi conduzido a 30 °C, com agitação de 110 rpm, utilizando-se dois tipos de soluções de sacarose 70 °Brix: a primeira contendo lactato de sódio 2,4% p/p e ácido láctico 0,1M e a segunda com lactato de sódio 2,4% p/p e ácido cítrico 0,1M. Concluíram que a solução desidratante contendo ácido cítrico apresentou maior perda de água que a solução contendo ácido láctico. Um comportamento contrário ocorreu no ganho de sólidos.

ARGANDOÑA (1999) estudou a desidratação de goiaba por imersão e secagem, seguindo um planejamento em três concentrações (50, 60 e 70 °Brix) e três temperaturas (30, 40 e 50 °C), com o meio agitado a 120 rpm, para garantir a completa homogeneidade e contato com a solução desidratante. Observou que o pré-tratamento osmótico foi eficaz, obtendo um produto de umidade intermediária em menor tempo e com qualidades sensoriais superiores às do produto sem pré-tratamento osmótico. O melhor tratamento foi o de concentração da solução desidratante 60 °Brix, temperatura 40 °C e 3 h de processo, apresentando uma redução de peso de aproximadamente 40%. Verificou que a concentração da solução desidratante foi a variável que mais influenciou as taxas de remoção de água e o ingresso de sacarose, enquanto que a temperatura teve um efeito moderado.

2.7. Características da membrana celular da fruta

A membrana celular da fruta separa o meio intracelular do extracelular. A passagem aleatória de algumas substâncias do meio celular para o meio externo ou vice-versa define sua permeabilidade. As frutas são compostas por substâncias dissolvidas em água, como ácidos, pigmentos, açúcares, minerais,

vitaminas, etc. Estas substâncias podem sair com certa facilidade através de orifícios da membrana ou parede celular, favorecido pela pressão osmótica quando a mesma é submetida a uma alta concentração de sacarose.

Segundo RIVA & PERI (1983) a película da uva representa para a fruta uma barreira para perda de água e para penetração de parasitas, constituindo a resistência mais importante para a saída de água durante a secagem. Do ponto de vista estrutural, a superfície da uva representa uma estrutura complexa, constituída por uma camada coerente de células onde se intercalam compostos peptídicos fortemente hidrófilos. A parte mais externa da película é constituída por cera que aparece, em microscópio eletrônico, com o formato de pequenos discos situados uns sobre os outros (POSSINGRHAM & CHAMBERS, 1963).

A casca da fruta é constituída de substâncias de caráter oleoso e ceroso. Os pré-tratamentos dissolvem as ceras e aumenta a permeabilidade da parede celular. Tratamentos como branqueamento químico ou por calor, congelamento, amadurecimento ou ação enzimática influenciam diretamente as características do tecido vegetal (TORREGGIANI, 1993). A lavagem alcalina quente tem como resultado retirar a camada cerosa e produzir a desagregação mecânica da película. O tratamento com tensoativos tem uma ação completamente eficaz sem danificar a integridade da película (RIVA & PERI, 1983).

A camada de cera parte mais externa da casca das frutas, representa uma barreira para a perda de água. SILVA (1998) utilizou diversos pré-tratamentos químicos que agem modificando a estrutura física da película externa da fruta, facilitando a desidratação.

2.8. Análise sensorial

O termo análise ou avaliação sensorial reflete, de forma mais apropriada, o desenvolvimento da Ciência de Alimentos, Percepção e Sentidos Humanos, Metodologia Sensorial, Estatística, Comportamento Humano e Psicofísica da Percepção Humana. Com isso, as análises são realizadas com base em seus

objetivos, e testes mais apropriados são selecionados e conduzidos de acordo com delineamentos experimentais que melhor se ajustem a uma situação particular. Desta forma, os resultados da análise sensorial podem ser submetidos a tratamentos estatísticos, e conclusões mais completas podem ser obtidas.

A Análise sensorial, embora embasada em fundamentos que a elevam à categoria de ciência, deve também ser considerada uma tecnologia, em razão de sua intensa utilização prática. Normalmente, a tecnologia tem origem em descobertas científicas, mas com a análise sensorial se observa uma ciência crescendo a partir de uma tecnologia forte e relativamente bem estabelecida. A necessidade de técnicas para solucionar problemas reais existiu muito antes de serem desenvolvidos conhecimentos suficientes para facilitar suas soluções (PEREIRA, 2001).

2.9. Planejamento experimental fatorial na otimização do processo

Um método científico de planejamento e análise deve ser seguido para que se tenha experimento eficiente. Quando o problema envolve dados que podem conter erros experimentais, o único modo objetivo de análise é por métodos estatísticos. Em qualquer experimento, há duas etapas: o planejamento do experimento e a análise estatística dos dados obtidos. Estas etapas estão intimamente ligadas, uma vez que o método a ser utilizado para a análise depende diretamente do planejamento realizado (FREIRE, 1992).

O método clássico de análise é o método univariado, no qual os parâmetros são variados um de cada vez enquanto os demais ficam constantes. Quando se deseja o estudo de dois ou mais parâmetros em um experimento, os métodos estatísticos mais eficientes de análise são, em geral, os de planejamento fatorial. Em um planejamento do tipo fatorial completo, todas as combinações possíveis de todos os fatores são investigadas em um experimento. Os planejamentos fatoriais têm sido utilizados por muito tempo em pesquisas agrárias e biológicas, onde os custos de cada experiência são pequenos, porém o tempo consumido é grande (FREIRE, 1992).

Segundo BARROS NETO et al. (1995) o primeiro passo a ser feito, no planejamento, é determinar quais são os fatores (variáveis de entrada) e as (variáveis de saída) de interesse para o sistema que se deseja estudar e em seguida, definir que objetivo se pretende alcançar com os experimentos, para determinar que tipo de planejamento fatorial deve ser utilizado.

Para executar um planejamento fatorial precisa-se em primeiro lugar especificar os níveis em que cada fator será estudado, isto é, os valores dos fatores (ou as versões, nos casos qualitativos) que serão empregados nos experimentos. Havendo K fatores, isto é, K variáveis controladas pelo experimentador, o planejamento de dois níveis irá requerer a realização de $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^K$ ensaios diferentes, sendo chamado por isso de planejamento fatorial 2^K . Nos planejamentos de dois níveis costuma-se identificar os níveis superior e inferior com os sinais (+) e (-), respectivamente. A atribuição desses sinais também pode ser feita para os níveis dos fatores qualitativos, mesmo para variáveis quantitativas é natural atribuir o nível superior aos valores mais altos (BARROS NETO et al., 1995).

2.9.1. Metodologia de superfície de resposta

A metodologia de superfícies de resposta é uma técnica de otimização baseada no emprego de planejamentos fatoriais, empregada desde a década de 1950, e que desde então tem sido usada com grande sucesso na modelagem de diversos processos industriais (BARROS NETO et al., 1995). A metodologia de superfícies de resposta é constituída de duas etapas distintas: modelagem e deslocamento. Essas etapas são repetidas tantas vezes quantas forem necessárias, com o objetivo de atingir uma região ótima (máxima ou mínima) da superfície investigada. A modelagem normalmente é feita ajustando-se modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais, obtidos a partir de planejamento fatorial. O deslocamento se dá sempre ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo que é a trajetória na qual a resposta varia de forma mais pronunciada.

A análise estatística utiliza dois parâmetros importantes: o percentual de variação explicada R^2 e o valor estimado para o teste F. O percentual de variação explicada (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 (GOUVEIA, 1999). O maior valor possível para R^2 obviamente é 100%, e ele só ocorrerá se não houver resíduo algum e, portanto toda a variação em torno da média é explicada pela regressão. Quanto mais perto de 100% estiver o valor de R^2 , melhor terá sido o ajuste do modelo aos dados observados (BARROS NETO et al., 1995).

O teste F consiste em verificar se existe relação entre as variáveis e a resposta, quando não existe correlação pode-se demonstrar que a razão entre as médias quadráticas MQ_R e MQ_r , segue uma distribuição F (hipótese nula). Se MQ_R/MQ_r é maior que o valor de F tabelado, a possibilidade da hipótese nula deve ser descartada. Quanto maior MQ_R/MQ_r melhor, para que se possa dizer que a regressão é estatisticamente significativa. Se o valor da razão MQ_R/MQ_r for acima de quatro vezes maior que o valor de F tabelado a equação é além de estatisticamente, significativa, no percentual de confiança utilizado, o modelo é preditivo.

2.10. Modelagem matemática

2.10.1. Equação teórica do modelo difusional

A teoria da migração de água por difusão apoia-se exclusivamente na lei de Fick expressa em termos do gradiente de umidade. Os primeiros trabalhos que fizeram referência explícita a esta lei foram LEWIS (1921), onde sugeriu que o processo de secagem nos sólidos era difusional, o que levou a SHERWOOD (1931) a desenvolver trabalhos sobre secagem de sólidos, propondo explicitamente que o movimento da umidade num sólido pode ocorrer por um mecanismo de difusão líquida, permitindo a aplicação da lei Fick para descrever o mecanismo de transporte da umidade. No caso de geometrias simples e transferência unidirecional, a Lei de Fick pode ser expressa por:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^q} \frac{\partial}{\partial r} \left(D r^q \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (2.14)$$

Onde:

$q = 0$, para placa plana

$q = 1$, para cilindro

$q = 2$, para esfera

A Equação (2.14) tem sido usada para diversas formas de sólidos na secagem de vários materiais, assumindo geralmente para a geometria esférica, as seguintes condições iniciais de simetria e de contorno:

$$X(r, 0) = X_i \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial X(0, t)}{\partial r} = 0 \quad (2.16)$$

$$X(r, t) = X_{eq} \quad (2.17)$$

onde r é a coordenada espacial e r representa o raio da esfera ou cilindro ou espessura da placa.

A condição (2.17) corresponde ao caso em que a resistência externa é desprezível e o processo é controlado pela difusão interna.

CRANK (1975) e KEEY (1997) apresentam as soluções analíticas da Equação (2.14) para as três formas geométricas para uma variável. No caso de esfera, a integração desta equação leva à seguinte equação para a umidade média:

$$X^* = \left(\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \right) = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(\frac{-D n^2 \pi^2 t}{r^2} \right) \quad (2.18)$$

A quantidade total de substância que entra ou deixa a esfera é determinada pelo modelo difusional de Fick, apresentada analiticamente por CRANK (1975). Esta equação é válida tanto para tempos curtos quanto para tempos longos e é dada por:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (2.18a)$$

onde M_t é a quantidade de água difundida com o tempo, M_∞ é a quantidade de água difundida no tempo infinito, n é o número de termos da série, D é o coeficiente de difusão e r é o raio.

Para a geometria de placa plana, CRANK (1975) apresenta para a Equação (2.19), tendo como condição inicial umidade uniforme em toda a placa, e como condição de contorno, taxa de evaporação nula no centro da placa e umidade de equilíbrio na superfície, a seguinte solução:

$$X^* = \left(\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \right) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{D\pi^2 t}{L^2}\right) \quad (2.19)$$

onde L representa metade da espessura da placa.

Para concentrações diferentes em ambos os lados da placa que é o caso, por exemplo, do fluxo através de uma membrana, existe um intervalo de tempo onde a transferência de massa ocorre no regime transiente antes de atingir o perfil linear previsto no estado estacionário. Colocando a origem de coordenadas ($r=0$) numa das faces da placa, as condições inicial e de contorno expressa anteriormente nas equações 2.15 a 2.17 resultam:

$$X(r,0) = C_0 \quad (2.20)$$

$$X(0,t) = C_1 \quad (2.21)$$

$$X(L,t) = C_2 \quad (2.22)$$

Onde L é agora a espessura total da membrana. A solução apresentada por CRANK (1975) para este caso é:

$$\left(\frac{M_t}{M_\infty}\right) = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{D\pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (2.23)$$

$M_\infty = L(1/2(C_1 + C_2) - C_0)$ é o conteúdo de umidade total da membrana no estado estacionário e $M_t + LC_0$ denota o conteúdo de umidade na placa no tempo t .

O modelo difusional sofreu severa crítica, devido às discrepâncias observadas entre os valores experimentais e teóricos. As principais falhas podem ser atribuídas à consideração do coeficiente de difusão constante (independente da temperatura e do conteúdo de umidade), alteração da forma e tamanho do sólido durante a secagem e condições de contorno inadequadas.

O coeficiente de difusão raramente é constante, pois varia com o conteúdo de umidade e com a temperatura. Neste sentido diversos modelos para a variação do coeficiente de difusão são encontrados na literatura recente, (KEEY, 1997) apresenta modelos, que envolve o efeito do encolhimento de sólido.

2.10.2. Modelagem na desidratação osmótica

AZOUBEL (2002) modelaram a cinética de desidratação osmótica do tomate cereja em soluções hipertônica de NaCl (com e sem sacarose), usando a segunda lei de Fick aplicada para a geometria esférica, obtendo uma difusividade em torno de $0,43 \times 10^{-9} - 1,77 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para perda de água e $0,04 \times 10^{-9} - 0,54 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para o ganho de sólidos. Concluíram que a velocidade da perda de água e o ganho de sólido na desidratação osmótica foram diretamente relacionadas com a concentração.

EL-AOUAR et al. (2002) modelaram a cinética de desidratação osmótica de cubos de mamão e ajustaram os dados experimentais ao modelo difusional para a geometria cúbica, obtendo os coeficientes de difusão de água (D) entre 1,27 a

$5,03 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Concluíram que o modelo difusional mostrou-se preditivo apenas para a condição de desidratação contendo ácido cítrico. Neste caso, o modelo empírico proposto por AZUARA et al. (1992), mostrou-se bastante preditivo apresentando valores de erro relativo médio aceitável e, sendo assim, foi considerado como o que melhor descreveu a cinética de desidratação osmótica do mamão.

SOUZA (2002) utilizou o modelo difusional baseado na 2ª Lei de Fick, que aplicado aos dados experimentais obtidos nos dois períodos de taxa decrescente, permitiu a determinação dos coeficientes de difusão da água nos tomates. Apesar das simplificações consideradas, a consistência dos resultados obtidos mostra que o modelo proposto para os dois períodos pode ser empregado para uma predição aproximada da cinética de secagem dos tomates.

AZOUBEL & MURR (2000) modelaram a cinética de desidratação osmótica de tomate cereja, baseado no modelo de AZUARA et al. (1992), verificando a influência do agente osmótico (cloreto de sódio e a mistura cloreto de sódio-sacarose) e da concentração da solução (10 e 25% p/p) na desidratação osmótica de tomate cereja na temperatura ambiente (25 °C). A cinética de perda de água foi determinada através de uma equação de dois parâmetros, baseada na segunda lei de Fick e aplicada para uma geometria esférica. Os coeficientes de difusividade aparente obtidos ficaram na faixa de $2,17 \times 10^{-10}$ a $11,69 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

AZUARA et al. (1992) desenvolveram um modelo para a cinética de desidratação osmótica, partindo de um balanço de massa no material que sofre desidratação bem como a determinação do ponto final de equilíbrio, sem a necessidade de se chegar, de fato, ao equilíbrio, utilizando apenas um curto período de processo. Concluíram que o modelo proposto pode ser usado para diferentes geometrias e é possível obter expressões para o coeficiente de difusão para alimentos.

2.10.3. Modelagem na secagem convectiva

EL-AOUAR et al. (2003) modelaram a cinética de secagem convectiva de cubos de mamão papaia "in natura" e pré-tratado osmoticamente usando a solução difusional com 15 termos da série. Observaram que o aumento da temperatura aumenta o coeficiente de difusão, tendo em vista que este aumento foi mais evidente para a fruta "in natura".

SIMAL et al. (1997) modelaram a cinética da secagem convectiva de cubos de maçã "in natura" e tratada osmoticamente e observaram que o coeficiente de difusão calculada para amostra "in natura" desidratada à temperatura do ar de 60 °C foi $12,7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. No entanto, para a amostra tratada osmoticamente seguida da secagem convectiva na mesma temperatura de processo, obtiveram difusividades menores entre $(4,54 \times 10^{-10} - 5,65 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s})$. Por outro lado o aumento da temperatura do processo de 30 para 90 °C aumenta a difusividade efetiva com valores que variaram de $(1,98 \times 10^{-10} - 9,79 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s})$.

2.11. Encolhimento

O encolhimento de produtos agrícolas durante a secagem é um fenômeno físico observável que ocorre simultaneamente com a difusão de umidade (SILVA, 2002). Segundo VALLE et al. (1998) o encolhimento tem um efeito negativo na qualidade de alimentos desidratado, geralmente ocorre particularmente em frutas e legumes, não só afeta a taxa de secagem, mas também as propriedades físicas e funcionais do produto desidratado.

ALSINA et al. (1998) na cinética de secagem da acerola em monocamada submetida ao efeito de diversos pré-tratamentos químicos. Foi observado que o encolhimento durante a secagem segue o mesmo comportamento com relação ao encolhimento determinado anteriormente sem o efeito do pré-tratamento.

BRASILEIRO (1999) estudou a cinética de secagem da acerola acompanhando o encolhimento e a degradação da cor por fotografias e propôs

equações empíricas para descrever a cinética de secagem, sem levar em conta o encolhimento, representado por uma relação exponencial simples e incluindo um fator de correlação por encolhimento. Concluiu que ambas equações ajustam bem as curvas de secagem. Entretanto, a segunda, por incluir o encolhimento é uma representação mais realística do comportamento.

GOUVEIA (1999) durante a secagem de gengibre foram fotografadas as amostras para que se obtivesse as áreas. Estas fotografias foram retiradas de hora em hora, até que não houvesse mais variações de peso da amostra. Com os dados de encolhimento e os modelos de SUZUKI foi possível correlacionar os valores experimentais através de regressões não-lineares, de forma a se obter os valores dos coeficientes de encolhimento para os três modelos estudados.

TELIS-ROMERO et al. (2001) na cinética de secagem da persimmons e propuseram um modelo difusional simplificado envolvendo simultaneamente o efeito do encolhimento volumétrico. No modelo proposto o coeficiente de difusividade foi calculado a partir da solução de Fick para esferas, onde o raio foi substituído por um valor instantâneo do raio em função do conteúdo de umidade $r(X)$.

ALSINA et al. (1997) desenvolveram um modelo para o encolhimento da acerola. Os autores propuseram encolhimento de área linear com o conteúdo de umidade. A variação do diâmetro (d) como função do conteúdo de umidade (base seca) durante a secagem convectiva, normalizada com as condições iniciais, é expressada pela seguinte Equação (2.24):

$$\frac{d}{d_i} = A + B \left(\frac{X}{X_i} \right) \quad (2.24)$$

BACELOS & ALMEIDA (2002) na modelagem do fenômeno de encolhimento durante a secagem de batatas cortadas em esferas, em estufa sob convecção natural a uma temperatura de 60 °C. O encolhimento das amostras foi acompanhado através de imagens captadas por uma câmara de vídeo.

Concluíram que o ajuste polinomial representou bem o encolhimento do material baseado na variação da área superficial, e isso permitiu uma boa estimativa do raio e do coeficiente de difusão ao longo do processo, e conseqüentemente uma boa estimativa da curva de secagem com a utilização do modelo difusional baseado na 2ª Lei de Fick com encolhimento evolutivo no tempo, o qual foi proposto e solucionado pelo método dos volumes finitos.

SUZUKI et al. (1976) desenvolveram três modelos para formular a relação entre a mudança de volume e o conteúdo de umidade, na secagem de raízes de vegetais (cenoura, batata doce e rabanetes):

(a) modelo de secagem uniforme: o encolhimento no volume é igual ao volume de água perdida por evaporação durante todos os estágios de secagem;

(b) modelo de secagem central: neste caso, é suposto que a camada seca é formada na superfície externa, e o centro permanece com o conteúdo de umidade igual a do material inicial no interior desta camada; ou seja, a densidade do centro é igual a do material inicial, e a densidade da camada externa seca é a mesma de equilíbrio do material;

(c) modelo de secagem semi-central: a densidade da camada seca não é igual a do material seco. Neste caso a densidade da camada seca é um valor médio entre as densidades inicial e do material seco.

Segundo os autores, o primeiro modelo resulta em duas equações alternativas: uma necessita dos dados de equilíbrio de umidade e massa específica, enquanto que a outra requer a umidade inicial e a massa específica inicial. O segundo e o terceiro modelo necessitam dos valores iniciais e de equilíbrio para a umidade e a massa específica. As equações do primeiro e do segundo modelos de SUZUKI são apresentados na Tabela abaixo:

Tabela 2.4 – Modelos para previsão do coeficiente de encolhimento volumétrico

Modelo	Equação
Secagem Uniforme:	
tipo (a)	$S_b = (\bar{X} + m) / (X_i + m)$ $m = X_c ((1/\rho_{be}) - 1) + (1/\rho_{be})$
tipo (b)	$S_b = \rho(\bar{X}/X_i) + q$ $p = \rho_{bo} X_i / (X_i + 1)$ $q = 1 + p + \rho_{bo}$
Secagem central:	$S_b = r(\bar{X}/X_i) + u$ $r = (1 - \phi) X_i / (X_i - X_{cq})$ $u = (\phi X_i - X_{cq}) / (X_i - X_{cq})$ $\phi = (X_{cq} + 1) \rho_{b,o} / (X_i + 1) \rho_{bc}$

FONTE: SUZUKI et al. (1976)

LOZANO et al. (1983) mostraram ser possível estabelecer um modelo para o coeficiente de encolhimento volumétrico em função da composição dos produtos alimentícios. Eles propuseram uma correlação generalizada capaz de determinar o coeficiente de encolhimento conhecendo somente a umidade inicial do alimento.

Material e Métodos

3.1. Materiais

3.1.1. Acerola (*Malpighia emarginata* DC)

As frutas utilizadas "in natura", adquiridas no comércio de Campina Grande-PB, foram escolhidas de modo a apresentar grau de maturidade semelhante, consistência mais firme, tamanho e cores semelhante, cascas sem fissuras ou manchas.

As acerolas possuíam as seguintes características: diâmetro variando entre 2,15 e 2,38 cm, umidade inicial em torno de 87 a 90% (em base úmida), teor de sólidos solúveis (°Brix) na faixa de 6 a 8 °Brix e coloração da casca avermelhada.

3.1.2. Solução de sacarose utilizada

A solução osmótica foi preparada utilizando água destilada e sacarose comercial (açúcar União), adquirida no supermercado, nas concentrações desejada de 40, 55 e 70 °Brix. As concentrações das soluções foram determinadas através de um refratômetro digital.

3.2. Descrição dos equipamentos

Os equipamentos utilizados para o processo de desidratação osmótica, desidratação através da película da acerola e o funcionamento da câmara de secagem, serão descritos nos itens abaixo.

3.2.1. Equipamentos básicos

- Aquecedor de ar tipo RM 2560.9 com 22,5 kw, fabricado pela PALLEY – ind. Brasileira.
- Compressor Radial, tipo exportação, fabricado pela lavagem Americana Garantia, dotado de motor assíncrono trifásico, tipo S100L2, com 4 CV e 2920

rpm, fabricado pela Metalúrgica Abramo Eberlt S/A – Caxias do Sul – Ind. Brasileira.

- Controlador de temperatura proporcional, tipo P300, faixa de operação entre 20-200 °C, fabricado pela Euro Control Aut. Ind. LTDA.
- Milivoltímetro, tipo MD – 045, fabricado pelo Equipamento Científico do Brasil – Ind. Brasileira.
- Válvulas, tipo globo.

3.2.2. Equipamentos auxiliares

- Anemômetro Digital, tipo AM – 4201, com medidas de velocidade do ar de 0,4 a 30 m/s, através de um sensor tipo hélice de baixa fricção, fabricado pela Homis Controle e Instrumentação LTDA.
- Balança Mettler PC 440, capacidade de 420 g, com precisão de leituras de 0,001 g, fabricado pela Mettler Instrument AG.
- Balança analítica AND – HR – 200.
- Cronômetro marca Pocket Timer.
- Estufa de secagem e esterilização, modelo 315 SE, escala 0-10, temperatura máxima 180 °C, fabricado pela FANEM – São Paulo.
- Estufa com circulação e renovação de ar, marca Marconi, MA 035.
- Higrômetro digital, tipo HT – 3003 com medidores de umidade relativa entre 10-95%, fabricado pela Homis Controle e Instrumentação LTDA.
- Paquímetro-fabricado pela Mitutoyo Corporation CE, Made in Japan.
- Termopares, tipo Chromel-Alumel.
- Termômetro Químico Arba, faixa de -10° a +100 °C com divisão de 0,5 °C e enchimento mercúrio, fabricado pela ARBA.
- Thermoconstanter Novasina (TH-200).
- Refratômetro digital automático Acatec RDA 8600.
- Agitador mecânico, modelo Fisatom MOD. 713D.
- Banho Termostático.

3.3. Condições de tratamento osmótico

Na Tabela 3.1 são apresentados os parâmetros das desidratações osmóticas: o grau Brix, tempo de imersão e o efeito da velocidade de agitação, bem como a condição para a secagem convectiva.

Tabela 3.1 – Condições experimentais usadas nas desidratações osmóticas, seguidas da secagem convectiva ($T_{ar} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $V_{ar} = 1,3\text{ m/s}$)

°Brix	Tempo de Imersão (h)	Agitação (rpm)	Temperatura ambiente média de imersão ($^{\circ}\text{C}$)
Sem tratamento	—	—	—
40	24	—	26
40	48	—	28
40	72	—	29
70	24	—	24
70	48	—	29
70	72	—	28
40	4	—	29
40	4	150	27
40	4	420	26
40	4	780	27

3.4. Planejamento experimental fatorial

3.4.1. Planejamento experimental fatorial para a desidratação osmo-convectiva

Foram definidas as variáveis dependentes dos processos: a temperatura de imersão, tempo de imersão e temperatura de operação do secador convectivo, objetivando verificar o efeito das variáveis no estudo da secagem osmo-convectiva com o mínimo de experimentos. Neste caso, optou-se por empregar um planejamento fatorial com 2^3 + três repetições no ponto central totalizando 11 ensaios, como mostra a Tabela 3.2.

Para a desidratação osmótica da acerola na concentração de 40 °Brix e velocidade de agitação de 780 rpm, fixou-se a temperatura de imersão em 28, 34 e 40 °C e tempo de imersão em 30, 60 e 90 min. Na secagem convectiva fixou-se as temperaturas do ar de secagem de 60, 65 e 70 °C, na condição da velocidade do ar de secagem 1,3 m/s. Observou-se a influência destas variáveis sobre a variável independente, o coeficiente de difusão efetivo.

Tabela 3.2 – Planejamento experimental fatorial da desidratação osmo-convectiva

Experimento	Temperatura de imersão (°C)		Tempo de imersão (min)		Temperatura de operação do secador (°C)	
	Codificado	Real	Codificado	Real	Codificado	Real
1	(-1)	28	(-1)	30	(-1)	60
2	(+1)	40	(-1)	30	(-1)	60
3	(-1)	28	(+1)	90	(-1)	60
4	(+1)	40	(+1)	90	(-1)	60
5	(-1)	28	(-1)	30	(+1)	70
6	(+1)	40	(-1)	30	(+1)	70
7	(-1)	28	(+1)	90	(+1)	70
8	(+1)	40	(+1)	90	(+1)	70
9	0	34	0	60	0	65
10	0	34	0	60	0	65
11	0	34	0	60	0	65

3.4.2. Planejamento experimental fatorial para a desidratação osmótica

Para estudar a influência das variáveis no estudo da desidratação osmótica com o mínimo de experimentos, realizou-se um planejamento fatorial com $2^2 + 3$ repetições no ponto central totalizando sete ensaios, objetivando avaliar o efeito das variáveis dependentes: concentração e temperatura da desidratação osmótica.

Fixou-se a temperatura de imersão em 30, 35 e 40 °C, a concentração da solução osmótica em 40, 55 e 70 °Brix e a velocidade de agitação de 780 rpm, durante 4 h, como mostra a Tabela 3.3. Observou-se a influência destas variáveis sobre a variável independente, o coeficiente de difusão efetivo.

Tabela 3.3 – Planejamento experimental fatorial para a desidratação osmótica

Experimento	Concentração da solução (°Brix)		Temperatura (°C)	
	Codificado	Real	Codificado	Real
1	(+1)	70	(-1)	30
2	(-1)	40	(-1)	30
3	(+1)	70	(+1)	40
4	(-1)	40	(+1)	40
5	0	55	0	35
6	0	55	0	35
7	0	55	0	35

3.4.3. Planejamento experimental fatorial para o estudo da desidratação através da película da acerola

Com a finalidade de estudar a desidratação através da película da acerola, realizou-se um planejamento fatorial com $2^2 + 3$ repetições no ponto central totalizando sete experimentos.

Fixou-se a temperatura de operação em 30, 35 e 40 °C, a concentração da solução de sacarose em 40, 55 e 70 °Brix e a velocidade de agitação de 20 rpm, durante 7 h de processo. Neste caso, foi utilizada mais uma variável que não foi controlada, a espessura da película da acerola, como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Variável não controlada (espessura da película da acerola)

Variável	-1	0	+1
Espessura 1 (cm)	0,0277	0,0356	0,0468
Espessura 2 (cm)	0,0344		0,0384
Espessura média (cm)	0,0310	0,0368	0,0426

Com a utilização da espessura da película da acerola da Tabela 3.4, resultou em um planejamento fatorial fracionado $2^{3-1} = 4$ experimentos + 1 experimento no ponto central, totalizando 5 experimentos, como mostra a Tabela 3.5. Observou-se a influência destas variáveis sobre a variável independente, o coeficiente de difusão efetivo.

Tabela 3.5 – Planejamento experimental fracionário para a desidratação osmótica através da película da acerola

Experimento	Concentração da solução (°Brix)		Temperatura (°C)		Espessura (cm)	
	codificado	Real	Codificado	Real	Codificado	Real
1	(+1)	70	(-1)	30	(-1)	0,0310
2	(-1)	40	(-1)	30	(+1)	0,0426
3	(+1)	70	(+1)	40	(+1)	0,0426
4	(-1)	40	(+1)	40	(-1)	0,0310
5	0	55	0	35	0	0,0368
6	0	55	0	35	0	—
7	0	55	0	35	0	—

3.5. Métodos

3.5.1. Metodologia da desidratação osmótica

Foi confeccionada uma cesta cilíndrica em tela de alumínio, com capacidade para 200 a 250 g de frutas (Figura 3.1).

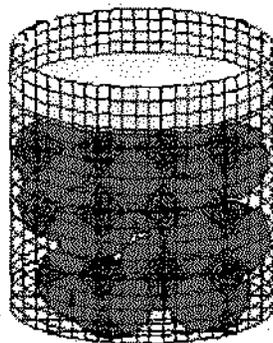


Figura 3.1 – Esquema da cesta cilíndrica de alumínio utilizada para imersão das acerolas em solução de sacarose

Com as massas estipuladas em aproximadamente 123,0 a 128,0 g, as frutas "in natura" foram lavadas com água destilada e posteriormente secas com papel toalha.

Inicialmente as frutas foram colocadas na cesta, e havia um suporte cuja finalidade era mantê-las totalmente imersas em 1000 a 1800 ml de solução osmótica em uma determinada concentração e tempo de imersão, com e sem o efeito da agitação nas temperaturas ambiente e controlada por um sistema de banho termostático, como mostram as Figuras 3.2 e 3.3. Para as amostras desidratadas osmoticamente sob agitação utilizou-se o agitador mecânico Fisatom MOD. 713D com rotação para cada experimento em particular.

Os esquemas dos equipamentos usados no processo da desidratação osmóticos são mostrados nas Figuras 3.2 e 3.3.

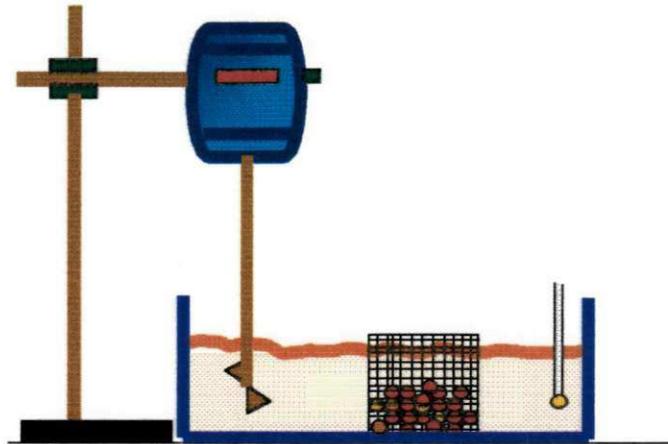


Figura 3.2 – Esquema do equipamento utilizado na desidratação osmótica a temperatura ambiente

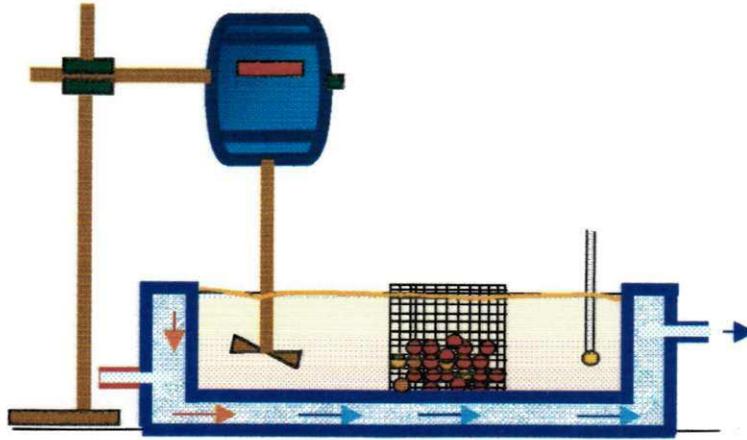


Figura 3.3 – Esquema do equipamento utilizado na desidratação osmótica com sistema de banho termostático

Em intervalos regulares de tempo, as frutas foram retiradas da cesta, drenada, enxaguada com água destilada para retirar o excesso da solução, e a água removida suavemente com papel absorvente. Posteriormente foi pesada em balança analítica e imediatamente retornava a solução de sacarose. Determinava-se também em cada intervalo o °Brix da solução e °Brix da amostra, através de um refratômetro digital automático Acatec RDA 8600 e a atividade de água da acerola, através do Thermoconstanter Novasina (TH-200). Ao completar o tempo de imersão desejado as frutas desidratadas estavam prontas para a etapa da secagem convectiva.

3.5.2. Metodologia da secagem convectiva e esquema do equipamento de secagem

Para obtenção das curvas de secagem das acerolas “in natura” e após a desidratação osmótica foi utilizado um secador de leito fixo. A instalação completa do conjunto de equipamento é mostrada na Figura 3.4 e é constituída basicamente por: (A) controlador de temperatura; (B) – Milivoltímetro; (C) câmara de secagem, cônico-cilíndrica; (D) resistências elétricas, para aquecer o ar de secagem; (E) compressor radial, para impulsionar o ar no interior da linha de alimentação do leito; (F) rotâmetro, para medir a vazão do ar de secagem, (G)

termopares do tipo Chromel-Alumel; e (H) válvula para especificar a vazão na linha de alimentação.

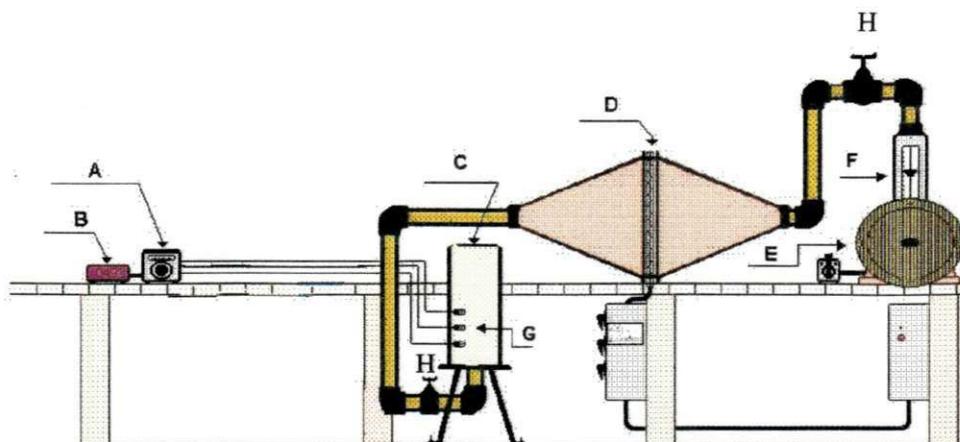


Figura 3.4 – Secador de leito fixo

FONTE: GOUVEIA et al. (2002)

- A – Controlador de temperatura
- B – Milivoltímetro
- C – Câmara de secagem
- D – Aquecedor
- E – Compressor radial
- F – Rotâmetro
- G – Termopares
- H – Válvula

3.5.2.1. Câmara de Secagem

A câmara de secagem é formada por uma coluna cilíndrica de 17,80 cm de diâmetro e 60 cm de altura. Possui uma seção inferior tronco-cônica que funciona como um distribuidor de ar onde são colocadas esferas de vidro uniformes, empilhadas aleatoriamente, que permite a uniformidade do ar de secagem em todo o leito. A câmara é isolada termicamente nas laterais com cordão de

amianto. Nas suas laterais, a câmara contém furos onde são colocados termopares. Um termopar é inserido no fundo da seção cônica, para se obter a temperatura do ar de secagem na entrada do secador e o outro acima da cesta, medindo assim a temperatura de saída do secador. O conjunto de termopares foi aferido, junto com o respectivo instrumento de medida (milivoltímetro) e as temperaturas são distinguidas por meio de uma chave seletora.

As frutas "in natura" após a desidratação osmótica foram submetidas à secagem convectiva durante 6 h. Os seguintes procedimentos foram adotados:

- a) Acionamento do compressor e o sistema de aquecimento do ar (resistências), escolhendo a temperatura do ar em 60 e 70 °C com o uso do controlador de temperatura.
- b) A velocidade do ar de secagem era medida, mediante um anemômetro digital, tipo AM-4201 colocado na parte superior da câmara de secagem. A velocidade utilizada foi de 1,3 m/s aproximadamente.
- c) Com a temperatura e a velocidade do ar pré-estabelecida, as frutas desidratadas foram colocadas em uma cesta em monocamada. Pesava-se a cesta em Balança Mettler, e em seguida colocava-se a amostra na câmara de secagem para iniciar o processo.
- d) Em intervalos regulares de tempo variados de 5, 10, 20 e 30 min, a cesta contendo a amostra, foi retirada da câmara de secagem, pesada e recolocada rapidamente no secador.
- e) Em intervalos de tempos, a temperatura era medida através de dois termopares (Chromel-Alumel), um para medir a temperatura de entrada e outro para medir a temperatura de saída da câmara de secagem. Além disso, foram registradas simultaneamente as leituras da umidade relativa do ar e a temperatura ambiente.
- f) Ao término da secagem convectiva, as frutas foram colocadas em um prato de vidro e o conjunto pesado e levado à estufa com temperatura de 70 °C, em presença de sílica-gel, durante 24 h para posterior determinação de sólidos secos.

3.5.3. Metodologia da desidratação osmótica através da película da acerola

Primeiramente, foi preparada a solução osmótica e extraído o suco da acerola, com a finalidade de conhecer inicialmente o °Brix da solução e do suco. Os tubos de ensaio no total de 15 tubos de (6 ml) com 10,3 mm de diâmetro e 75,3 mm de altura foram preenchidos com o suco da acerola e a solução de sacarose era adicionada (22 ml) em cada recipiente, totalizando 15 recipientes de plástico com tampa, como mostra as Figuras 3.5.



Figura 3.5 – Esquema do tubo de ensaio preenchido com o suco da acerola e recipiente com solução de sacarose

As cascas das acerolas foram retiradas praticamente inteiras, sem fissuras e secas com papel absorventes, com a finalidade de estudar a desidratação osmótica através da mesma. Depois destes procedimentos as cascas foram utilizadas com o objetivo de fechar os 15 tubos de ensaio, preenchidos com o suco extraído da acerola, onde as mesmas foram presas com ligas de silicone e isoladas na lateral com o filme de PVC, deixando apenas livre a porção que fecha o tubo como área de contato, como mostra a Figura 3.6.

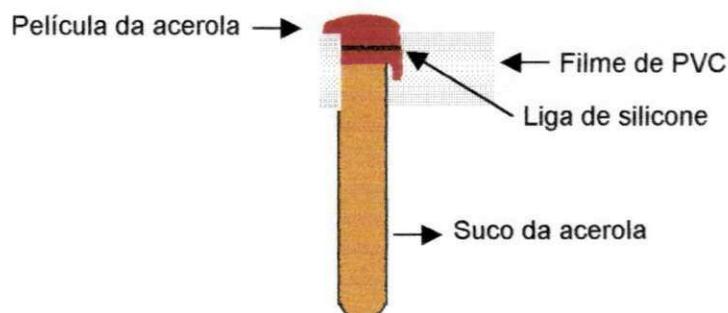


Figura 3.6 – Esquema da montagem do tubo de ensaio

Após este procedimento os 15 tubos de ensaio foram colocados virados (casca com área livre) em contato com a solução de sacarose nos pequenos recipientes contendo solução de sacarose e inteiramente fechados, formando 15 amostras contendo suco/película da acerola/solução de sacarose, como mostra a Figura 3.7.

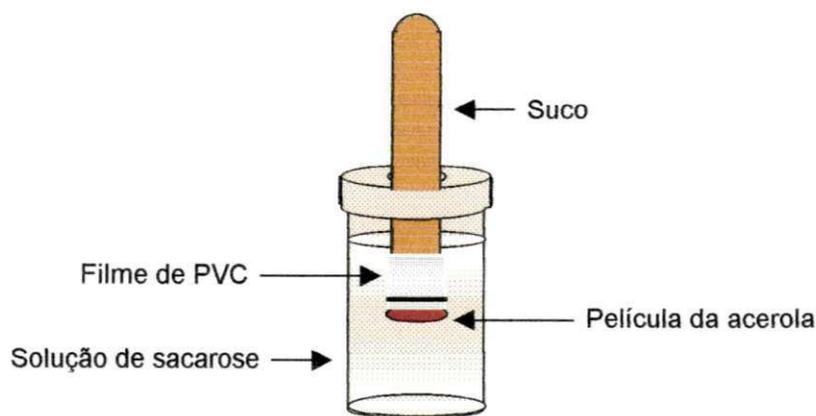


Figura 3.7 – Esquema de preparação das amostras contendo suco/película da acerola/solução de sacarose

As amostras montadas foram encaixadas em um sistema acoplado a um agitador mecânico Fisatom MOD. 713D sob rotação de 20 rpm, Figura 3.8, e aquecidas dentro de uma estufa como mostra a Figura 3.9 com temperatura controlada a 30, 35 e 40 °C.

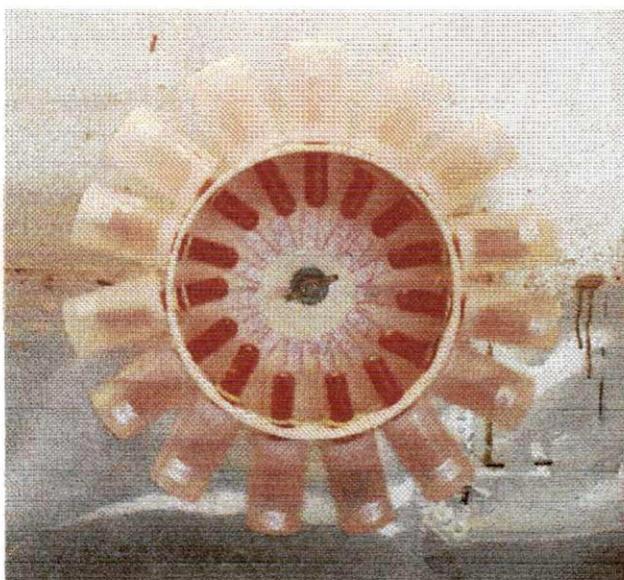


Figura 3.8 - Sistema de agitação de tubos

Após os tempos pré-determinados realizavam-se as leituras do °Brix do suco da acerola e da solução de sacarose através do refratômetro digital, pesava-se, media-se também a espessura da casca da acerola antes e depois do procedimento com o auxílio do paquímetro e determinava-se o conteúdo de umidade da casca e sólidos insolúveis do suco pelo método da estufa. Este procedimento era realizado em triplicata, durante 7 h de desidratação.

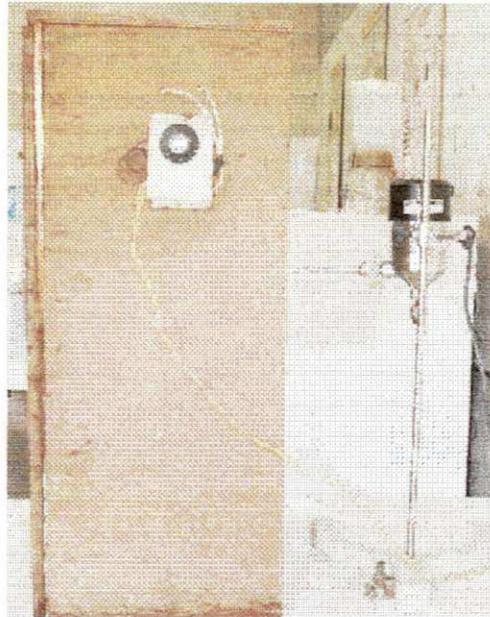


Figura 3.9 - Sistema de agitação e aquecimento de tubos

3.5.4. Determinação de dados de processos

3.5.4.1. Determinação da umidade inicial

A umidade da acerola foi determinada em duplicata para todos os experimentos realizados. As amostras foram pesadas e sujeitas ao método da estufa, que consiste na secagem de pequenas amostras à temperatura de 70 °C, em presença de sílica-gel durante 24 h. Este método é recomendado na literatura, para material biológico sensível, como é o caso das frutas, onde temperaturas maiores levariam a caramelização dos açúcares presentes introduzindo erros na determinação da umidade. Depois deste tempo, as amostras eram pesadas numa

balança Mettler PC 440, com precisão de leituras de 0,001 g, obtendo-se a umidade inicial, que pode ser calculada em base seca ou base úmida mediante as equações abaixo:

$$X(\text{b.u})_i = \frac{m_i - m_f}{m_i} \quad (\text{base úmida}) \quad (3.1)$$

$$X(\text{b.s})_i = \frac{m_i - m_f}{m_f} \quad (\text{base seca}) \quad (3.2)$$

A umidade inicial em base úmida permite calcular a percentagem de sólido seco que é utilizada para calcular a umidade (base seca) da amostra em função do tempo de secagem.

3.5.4.2. Atividade de água (a_w)

A atividade de água foi determinada nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C, nas am ostras "in natura" e tratadas osmoticamente em concentrações de 40 e 70 °Brix durante 24 h. As amostras "in natura" e tratadas foram colocadas em fatias nos porta-amostras de plásticos pesadas e submetidas à secagem em estufa de circulação de ar a 70 °C. Este procedimento era realizado em triplicata para cada amostra. Em determinados intervalos de tempo, retirava uma amostra da estufa para posterior determinação da atividade de água (a_w), por medida direta utilizando um aparelho analisador de atividade de água Thermoconstanter Novasina (TH-200), como mostra a Figura 3.10.

A atividade de água também foi determinada nas acerolas, durante o processo de desidratação osmótica e nas soluções de sacarose com concentrações de 40, 55 e 70 °Brix, nas temperaturas de 30, 35 e 40 °C.

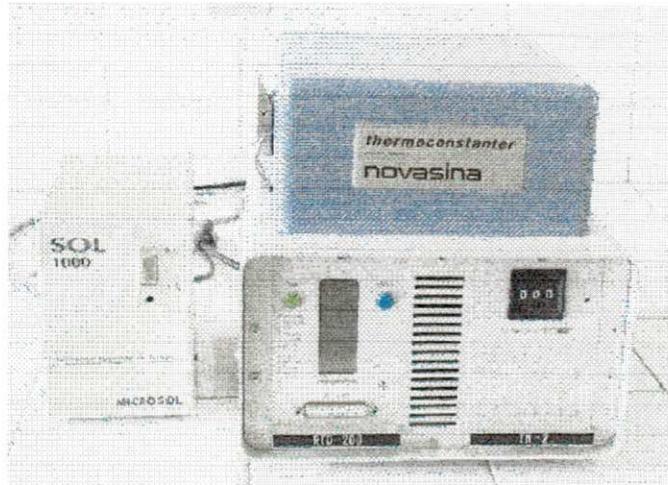


Figura 3.10 – Foto do equipamento para determinação da atividade de água (Thermoconstanter Novasina)

3.5.4.3. Sólidos solúveis durante a desidratação osmótica

Os sólidos solúveis das acerolas e do suco da acerola durante o processo de desidratação osmótica foram determinados em intervalos regulares de tempo, retiravam-se as amostras e colocavam-se gotas da polpa ou suco no prisma do refratômetro de bancada, determinando desta forma o teor de sólidos solúveis que é expresso em Graus Brix e corrigido em função da temperatura, utilizando um refratômetro digital automático Acatec RDA 8600.

3.5.4.4. Sólidos totais durante a desidratação osmótica

Os sólidos totais foram determinados por secagem em estufa com circulação forçada de ar aquecido a 70 °C por 24 h durante a desidratação osmótica. A determinação de sólidos total fundamenta-se na evaporação da água e substâncias voláteis, a uma determinada temperatura e pesagem do extrato não-volatilizado.

3.5.4.5. Vitamina C da acerola (ácido ascórbico)

A vitamina C foi determinada nas amostras “in natura”, osmoticamente desidratadas com e sem agitação e ao final da secagem convectiva, a fim de

observar a perda de vitamina C ao longo dos processos. A norma utilizada para determinação da vitamina C foi realizada, através do método Titulométrico, (método de Tillmans modificado) (Anexo I).

3.6. Determinação dos parâmetros psicrométricos

A partir dos dados obtidos, umidade relativa do ar e temperatura ambiente, determina-se através do programa PLUS (Psychrometric Look-Up Substitute) Psicro de L.D Albright (1989) a razão de umidade, com este valor e a temperatura na entrada da câmara de secagem obtida durante a secagem convectiva, encontra-se o conteúdo de umidade relativa (X_R) dentro do secador através do programa.

3.7. Determinação da umidade de equilíbrio

3.7.1. Secagem convectiva

Para o cálculo da X_{eq} da acerola utilizou-se o Modelo de Henderson - Thompson para Isotermas de equilíbrio higroscópico: cujos parâmetros foram determinados por COUTINHO (1998), nas temperaturas de 32 a 68 °C para a acerola "in natura".

$$X_{eq} = \left(\frac{-\ln(1 - X_R)}{A_1} \right)^{\frac{1}{A_2}} \quad (3.3)$$

Onde A_1 e A_2 são parâmetros que dependem do material e da temperatura (°C). O X_R se refere à umidade relativa decimal, dentro do secador.

Os parâmetros A_1 e A_2 foram obtidos pelas equações abaixo:

$$A_1 = 11,272158 - 0,132314 T \quad (3.4)$$

$$A_2 = 1,6865763 - 0,0207169T \quad (3.5)$$

3.7.2. Desidratação osmótica

Sabe-se que nas condições de equilíbrio osmótico a a_w da acerola é igual à a_w da solução de sacarose, para uma solução infinita. Neste caso, determinou-se o conteúdo de umidade de equilíbrio (X_{eq}) da acerola, nas concentrações de 40, 55 e 70 °Brix, através das isotermas ajustadas ao modelo de GAB (Guggenheim – Anderson – de Boer) Equação (2.6), utilizando os parâmetros do ajuste C e K para cada tratamento e a atividade de água (a_w) determinada experimentalmente para cada solução de sacarose nas temperaturas de 30 e 40 °C.

$$X_{eq} = \frac{Xm.C.K.a_w}{(1 - K.a_w).(1 - K.a_w + C.K.a_w)} \quad (2.6)$$

Com a umidade de equilíbrio (X_{eq}) e a massa de sólido seco da acerola para cada tratamento (m_{SS}), determina-se a massa da acerola no equilíbrio (m_{∞}). A diferença da massa inicial (m_i) com a massa no equilíbrio obtém-se assim a quantidade de água perdida em gramas no infinito (M_{∞}) durante o processo de desidratação osmótica.

$$X_{eq} = \frac{m_{\infty} - m_{SS}}{m_{SS}} \quad (3.6)$$

$$M_{\infty} = m_i - m_{\infty} \quad (3.7)$$

3.8. Determinação das dimensões do sólido

Para o estudo do encolhimento, os raios das acerolas "in natura", após a desidratação osmótica e a secagem convectiva foram determinados com o auxílio do paquímetro no sentido longitudinal, como mostra a Figura 3.11. Os resultados foram ajustados de acordo com a Equação (2.24).

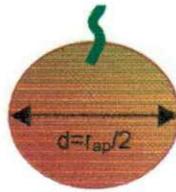


Figura 3.11 – Medição do raio aparente da acerola

3.9. Análise sensorial do suco da acerola - aceitação ou opinião do consumidor

O produto final, não apresentou uma boa aparência por isso as acerolas secas foram trituradas resultado em um pó, afim de utiliza-lo com a finalidade de fazer o suco.

A metodologia aplicada foi o teste de aceitação - uso da escala hedônica - por melhor se adequar às condições disponíveis. O teste afetivo utilizado para a análise do suco da acerola submetida à secagem osmo-convectiva foi realizado com 100 pessoas não-treinadas como solicitado pela bibliografia. Os testes de aceitação puderam indicar as perspectivas do produto no mercado ou se ele necessita de algum aperfeiçoamento (CHAVES & SPROESSE, 1999).

Na escala hedônica utilizada para essa análise sensorial, os provadores expressaram sua aceitação pelo suco de acerola, seguindo uma escala previamente estabelecida que variou com base nos atributos “não gosta” à “gosta”. Essa escala foi utilizada com o objetivo de se obterem informações sobre a provável aceitação do suco pelo público solicitado.

Apresentou-se aos provadores o suco da acerola desidratado. Para cada provador pediu-se que marcasse na ficha, a resposta que melhor refletisse seu julgamento em relação ao sabor, cor, aroma e aparência do suco. O procedimento adotado era:

a) O Suco da acerola osmoticamente desidratado em solução de sacarose de 40 °Brix por 72 h à temperatura ambiente, seguida da secagem convectiva na temperatura do ar de 70 °C e velocidade do ar de 1,3 m/s.

b) Copos de café descartáveis

c) Fichas para os degustadores em (Anexo II).

3.10. Ajuste do modelo matemático

3.10.1. Secagem convectiva

Com o objetivo de modelar a cinética de secagem convectiva foi proposto numa primeira abordagem o modelo difusional apresentado na revisão bibliográfica, Equação (2.18). Tendo em vista a forma geométrica da acerola foi utilizada a equação de difusão aplicada para esfera. Esta equação é válida tanto para tempos curtos quanto para tempos longos.

$$X^* = \left(\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \right) = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(\frac{-D n^2 \pi^2 t}{r^2} \right) \quad (2.18)$$

Ao determinar a X_{eq} , através das Equações (3.3), (3.4) e (3.5), determina-se X^* pela Equação (2.18). A difusividade efetiva foi estimada mediante ajuste dos dados experimentais da série (Equação 2.18), por regressão não-linear, através do software Origin[®], onde o raio foi substituído pelos valores instantâneos do raio em função da umidade $r(X)$ calculado pela Equação (2.24). O valor $(6/\pi^2 = 0,6079)$ corresponde à geometria esférica e foi substituído por um parâmetro ajustável A. O número de termos da série necessário para atingir a convergência foi determinado por tentativas.

3.10.2. Desidratação osmótica

Com o objetivo de modelar a cinética de desidratação osmótica da acerola e determinar a difusividade efetiva (D) foi utilizado o modelo difusional de Fick, considerando a geometria esférica, cuja solução analítica foi apresentada por CRANK (1975). Esta equação é válida tanto para tempos curtos como para tempos longos, e é da forma:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-Dn^2\pi^2t}{r^2}\right) \quad (2.18a)$$

A difusividade efetiva foi estimada mediante ajuste dos dados experimentais da série Equação (2.18a), por regressão não-linear usando o software Origin[®], onde $r(X)$ é o valor instantâneo do raio calculado pela Equação (2.24). O valor $(6/\pi^2 = 0,6079)$ corresponde à geometria esférica e foi substituído por um parâmetro ajustável A . O número de termos da série necessário para atingir a convergência foi determinado por tentativas.

3.10.3. Desidratação osmótica através da película da acerola

Numa primeira abordagem simplificada da situação real foi considerada a película como uma membrana que consiste de duas regiões como mostra na Figura 3.12.

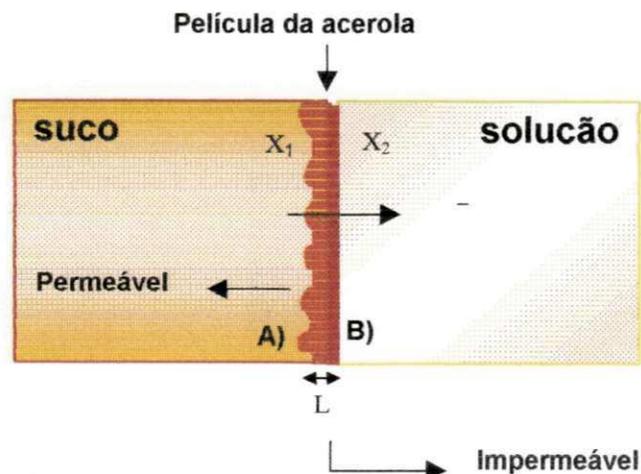


Figura 3.12 – Desidratação através da película da acerola

A região externa (B) que é a película propriamente dita, consiste da parte cerosa, impermeável da casca. A região interna (A) está constituída pela polpa aderida ao filme, que é mais permeável e sujeita a variações da espessura durante o processo. Desprezando as variações de concentração de água no suco e na solução, suposição aceitável considerando os volumes utilizados, pode-se aplicar durante o período transiente o modelo difusional simplificado apresentado no item 2.10, Equação 2.23, que implica as seguintes suposições adicionais:

- Considera-se um coeficiente de difusão efetivo do conjunto (A) e (B),
- É desprezada a variação de espessura da película,
- Concentrações de água constantes X_1 e X_2 em ambos os lados da membrana, respectivamente,
- Com o passar do tempo a película atinge o perfil linear de estado estacionário (na realidade "quase estacionário"), onde o conteúdo de umidade da película é a média entre X_1 e X_2 .

A equação 2.23 pode ser escrita:

$$\left(1 - \frac{M_t}{M_\infty}\right) = \left(\frac{\bar{X} - X_1}{1/2(X_1 + X_2) - X_1}\right) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{D\pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (3.8)$$

A difusividade efetiva foi estimada mediante ajuste dos dados experimentais da série (Equação 3.8), por regressão não-linear, através do software Origin[®]. O valor $(8/\pi^2 = 0,8114)$ corresponde à geometria plana e foi substituído por um parâmetro ajustável A. O número de termos da série necessário para atingir convergência foi determinado por tentativas.

O conteúdo de umidade no estado estacionário $X_e = [1/2(X_1 + X_2)]$ foi estimado a partir do gráfico da derivada do conteúdo de umidade em função do conteúdo de umidade mediante extrapolação linear, determinando-se X_e no intercepto com a abscissa como mostra a Figura 3.13.

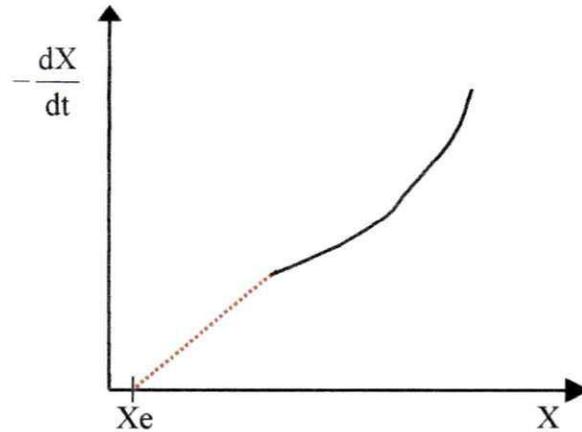


Figura 3.13 - Gráfico da derivada do conteúdo de umidade em função do conteúdo de umidade

3.11. Tratamento matemático

Os parâmetros perda de água (PA), perda de peso (PP) e ganho de sólidos (GS) podem ser calculados segundo as equações (SHI et al., 1997).

$$PP(\%) = \left(\frac{m_i - m_t}{m_i} \right) \quad (3.9)$$

$$PA(\%) = \frac{MA_0 - (m_i - MS_i)}{m_i} \quad (3.10)$$

$$GS(\%) = \frac{(MS_i - MS_0)}{m_i} \quad (3.11)$$

Onde:

MA_0 = peso inicial da água (g);

MS_0 = peso dos sólidos inicialmente presentes (g);

MS_t = peso dos sólidos no tempo t(g);

m_i = peso inicial da amostra (g);

m_t = peso da amostra no tempo t(g).

3.12. Fluxograma do processo

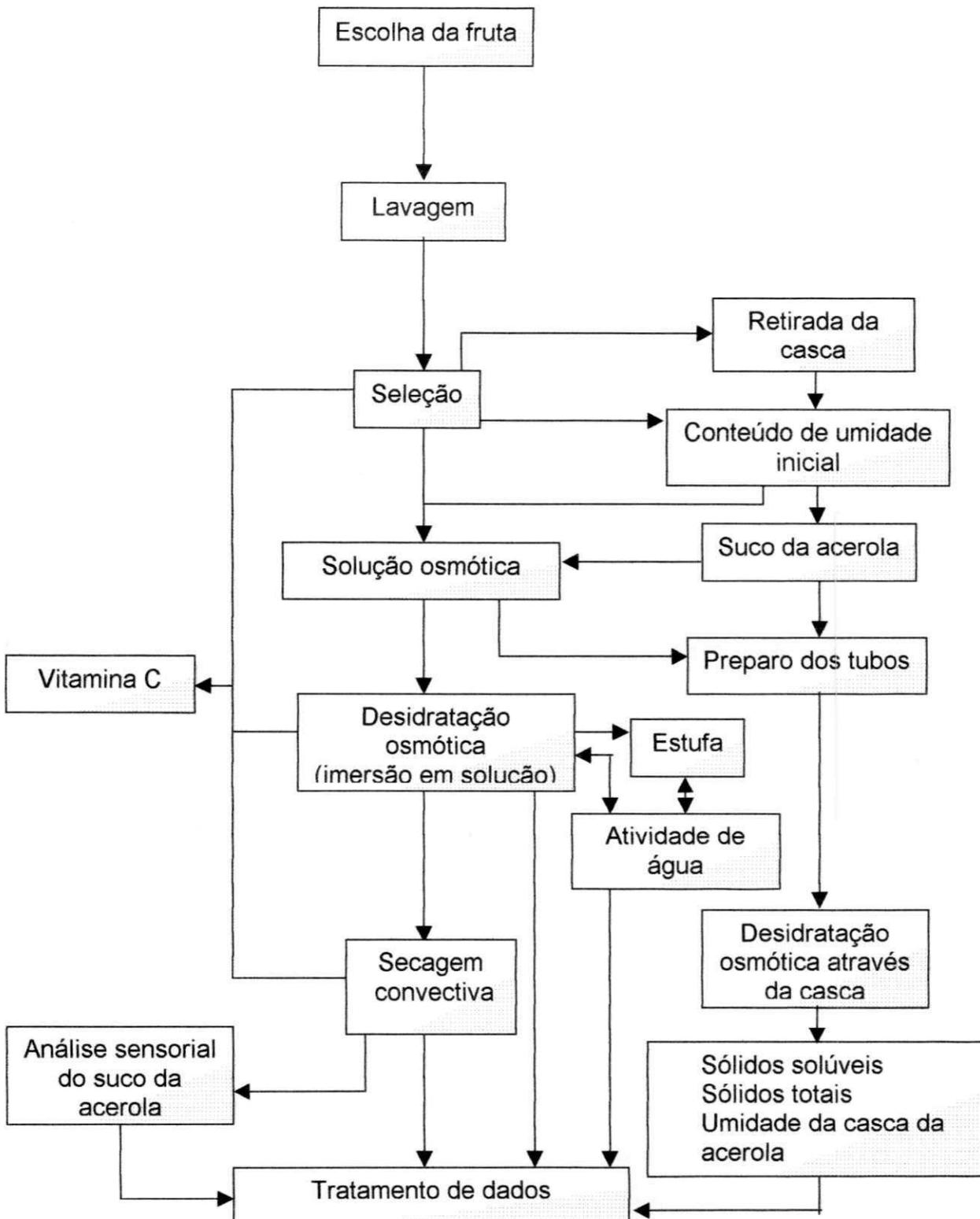


Figura 3.14 - Fluxograma do processo utilizado para realização dos experimentos

Resultados e Discussões

4.1. Caracterização da acerola

A caracterização da acerola "in natura" e processada, foi realizada de acordo com os métodos descritos nos itens de 3.5.4. A caracterização físico-química consta da determinação da umidade, vitamina C, sólidos solúveis, sólidos totais e atividade de água. Foi determinado também o tamanho em função da umidade durante a secagem, bem como a higroscopicidade da acerola "in natura" e processada.

4.1.1. Caracterização físico-química

Os resultados médios encontrados para as acerolas "in natura", após desidratação osmótica e secagem convectiva, utilizada no presente trabalho são apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente.

Tabela 4.1- Análise físico-química da acerola "in natura" em base úmida

Análise	Teores (acerola com caroço)
Umidade (base úmida, %)	87 a 92
Vitamina C (mg/100g) do fruto	1202,05 a 1822,57
Sólidos solúveis (°Brix)	6,3 a 8,1
Sólidos totais (%)	9,1 a 12,0
Atividade de água (a_w)	0,942 a 0,954

Os resultados obtidos nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 mostram uma sequência dos valores obtidos da acerola "in natura" seguida da desidratação osmótica e secagem convectiva nas condições operacionais estudadas.

Tabela 4.2- Análise físico-química da acerola após a desidratação osmótica

Análise	Condições operacionais Da desidratação osmótica	Teores (acerola com caroço)
Umidade (base úmida, %)	-Tempo de imersão:	29 a 91
Vitamina C (mg/100g) do fruto	30 min a 72 h	842,76 a 1278,30
Sólidos solúveis (°Brix)	-Temperatura de imersão:	6,5 a 10,32
Sólidos totais (%)	26 a 40 °C	9,6 a 15,27
Atividade de água (a_w)	- Agitação: 0 a 780 rpm	0,938 a 0,956

Na Tabela 4.2 são apresentados resultados médios obtidos para as propriedades físico-químicas das acerolas após a desidratação osmótica e na Tabela 4.3, após a secagem convectiva. Comparando os valores apresentados nas três tabelas observa-se que o intervalo de umidades diminui de 87-92% "in natura" para após a desidratação osmótica 29-91 e 14-45% no final da secagem convectiva.

Tabela 4.3 - Análise físico-química da acerola após secagem convectiva

Análise	Condições operacionais da secagem convectiva	Teores (acerola com caroço)
Umidade (base úmida, %)	$T_{ar} = 60 \text{ e } 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$	14 a 45
Vitamina C (mg/100g) do fruto	e $V_{ar} = 1,3 \text{ m/s}$	770,10 a 1398,48

Os resultados encontrados para a amostra "in natura" estão dentro da faixa apresentada na literatura. As diferenças observadas para valores de vitamina C podem estar relacionadas aos fatores de cultivo, grau de maturação, tamanho dos frutos, posicionamento da árvore de acerola e condições climática (SOARES et al., 2001).

Quanto à vitamina C, observa-se que para a acerola "in natura" é de 1202,05-1822,57 (mg/100g), houve uma redução da vitamina no intervalo de 842,76-1278,30 (mg/100g) para a acerola após desidratação osmótica, sendo a maior perda relacionada às amostras submetida à temperatura de imersão acima da ambiente, e de 770,10-1398,48 (mg/100g) após a secagem convectiva. Esta última à perda é maior devido às condições do ar de secagem. Já o intervalo de sólidos solúveis aumentou de 6,3-8,1 °Brix "in natura" para 6,5-10,32 °Brix, após a desidratação osmótica, e de sólidos totais de 9,1-12,05% "in natura" para 9,6-15,27%, após a desidratação osmótica. A atividade de água variou de 0,942-0,954 "in natura" para 0,938-0,956 após a desidratação osmótica, sendo este valor compatível com os requerimentos para o desenvolvimento de microrganismos de 0,6 a 0,99.

No Capítulo 7 serão discutidos os efeitos das condições de operação sobre as variações observadas nas características físico-químicas.

4.2. Encolhimento da acerola

Nas Figuras 4.1(a e b) e 4.2, observam-se à variação do diâmetro em função da umidade. Os dados obtidos do diâmetro da acerola para a Figura 4.1(a), foram os iniciais e o finais da secagem convectiva. Para possibilitar a comparação dos diversos experimentos o diâmetro e o conteúdo de umidade foram normalizados com as condições iniciais.

O modelo utilizado para o encolhimento da acerola foi o proposto por ALSINA et al. (1997) que utilizaram os valores dos diâmetros (d) em função do conteúdo de umidade (X) (base seca) durante a secagem convectiva, normalizada com a condição inicial. O modelo é expresso pela Equação (2.24), que corresponde a um encolhimento da área como função linear de umidade normalizada.

$$\frac{d}{d_i} = A + B \left(\frac{X}{X_i} \right) \quad (2.24)$$

Comparando os valores dos coeficientes obtidos por regressão linear em uma única reta da Figura 4.1, com os dados experimentais obtidos por SILVA (1998) ajustado ao modelo proposto por ALSINA et al. (1997), durante a secagem convectiva submetido a diversos pré-tratamentos, observa-se que seguem praticamente a mesma tendência. Em vista disto, foram analisados conjuntamente os dados do presente trabalho com os obtidos por SILVA (1998), obtendo-se a Figura 4.2. Observa-se que apesar dos desvios é possível considerar que o encolhimento segue o mesmo comportamento para as diversas condições de secagem e pré-tratamentos.

Os dados experimentais da Figura 4.2 foram ajustados por regressão linear em uma única curva de encolhimento para todas as temperaturas e tratamentos utilizados, obtendo os valores dos parâmetros $A=0,33484$ e $B=0,61081$, próximos dos valores observados por ALSINA et al. (1997).

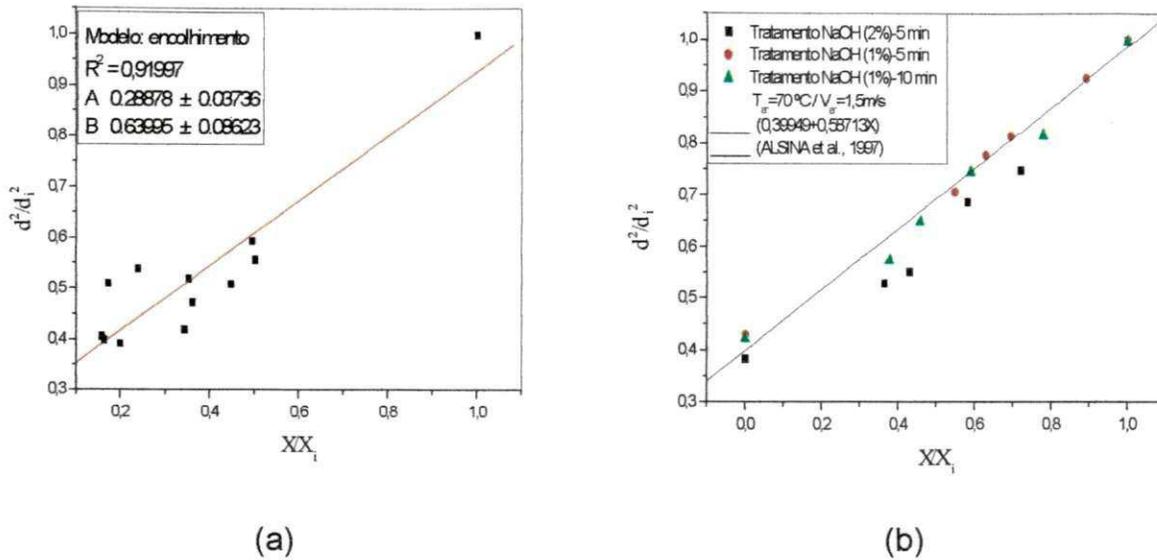


Figura 4.1 – Encolhimento da acerola na secagem convectiva, (a) experimentos referentes à Tabela 3.2 e (b) secagem submetida a diversos pré-tratamentos, (SILVA, 1998)

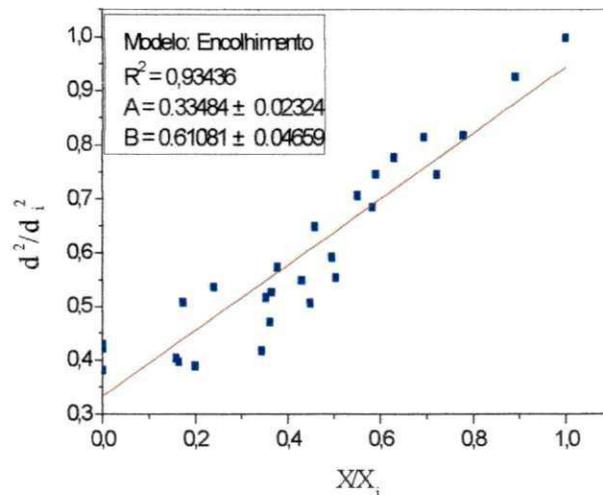


Figura 4.2 – Encolhimento da acerola na secagem convectiva. Experimentos referentes à Tabela 3.2, junto com os dados obtidos por SILVA (1998)

4.3. Isotermas de equilíbrio da acerola

Nas Figuras 4.3 e 4.4 são apresentados os resultados obtidos para as isotermas de equilíbrio da acerola “in natura” e após desidratação osmótica. O efeito da temperatura sobre as isotermas é ilustrado nas Figuras 4.3 (a), 4.4 (a) e 4.4 (b). Diversos autores mostraram que o aumento da temperatura produz uma

diminuição do conteúdo de umidade de equilíbrio. Por exemplo, VAZQUEZ et al. (1999) observaram que para uma determinada atividade de água, o conteúdo de umidade de equilíbrio de uvas diminuiu com aumento da temperatura. Neste trabalho o efeito do aumento da temperatura sobre as isotermas de sorção das acerolas "in natura" foi observado para altas atividades de água entre 0,6 e 0,85, região onde há uma pequena redução do conteúdo de umidade de equilíbrio com o aumento da temperatura, como mostram as Figuras 4.3 (a), 4.4 (a) e (b). No entanto, observa-se que, para atividade de água abaixo de 0,5 e acima de 0,85, as curvas são praticamente coincidentes e sobrepostas em todas as temperaturas.

O aumento da concentração na desidratação osmótica aumenta o ganho de açúcar durante o processo, isso implica dizer que este aumento de sólidos solúveis na fruta corresponde a um maior conteúdo de umidade de equilíbrio, para uma mesma atividade de água como mostra a Figura 4.3 (b), sendo mais notória entre as atividades de água de 0,65 e 0,9. O aumento acentuado do conteúdo de umidade em altas atividades de água é devido ao açúcar, fato relatado por SARAVACOS et al. (1986). No entanto, observa-se também através da Figura 4.3 (b) que as curvas são praticamente coincidentes e sobrepostas nas amostras que envolvem "in natura" e tratamento osmótico para uma mesma temperatura de 30 °C em atividade de água abaixo de 0,5 e acima de 0,9.

Observam-se nas Figuras 4.3 e 4.4 que o modelo de GAB Equação (2.6), pode ser usado adequadamente para representação das isotermas de sorção de acerola, ajustando-se muito bem aos dados experimentais, com coeficiente de correlação alto e cujos parâmetros do modelo estão apresentados na Tabela 4.4. A Tabela mostra os resultados diretos da regressão não-linear do modelo de GAB obtidos através do Origin[®], para a acerola "in natura" e submetidas ao tratamento osmótico.

$$X_{eq} = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (2.6)$$

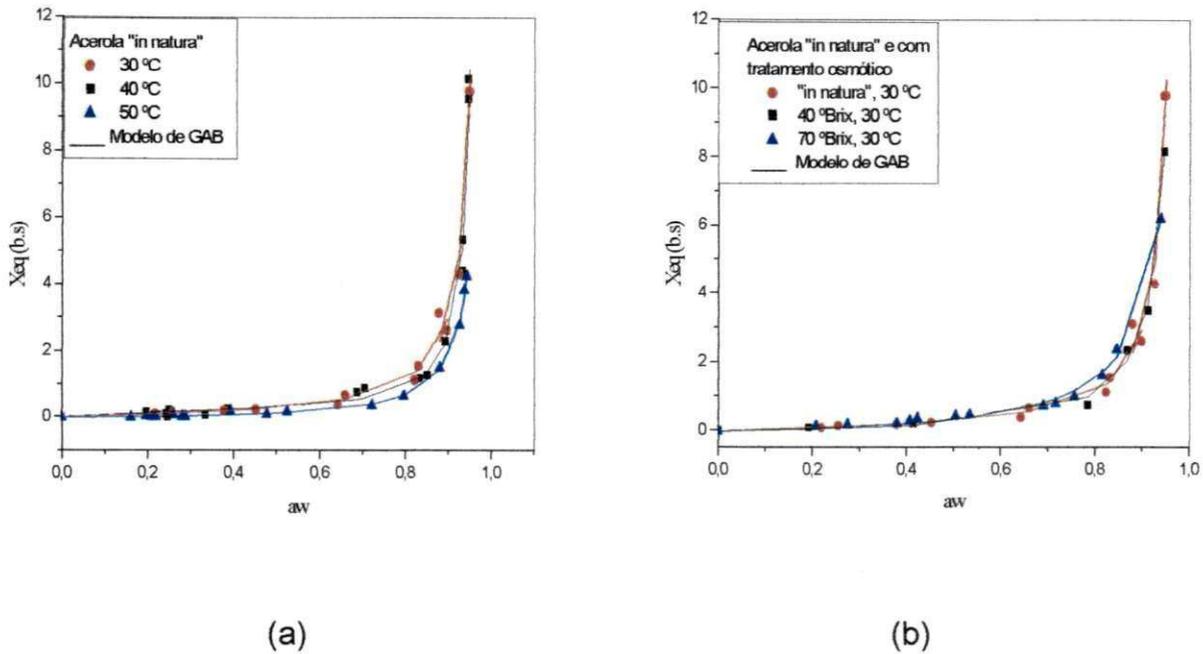


Figura 4.3 – Isotermas de sorção da acerola. (a) "in natura" 30, 40 e 50 °C, (b) desidratação osmótica (40 e 70 °Brix) 30 °C

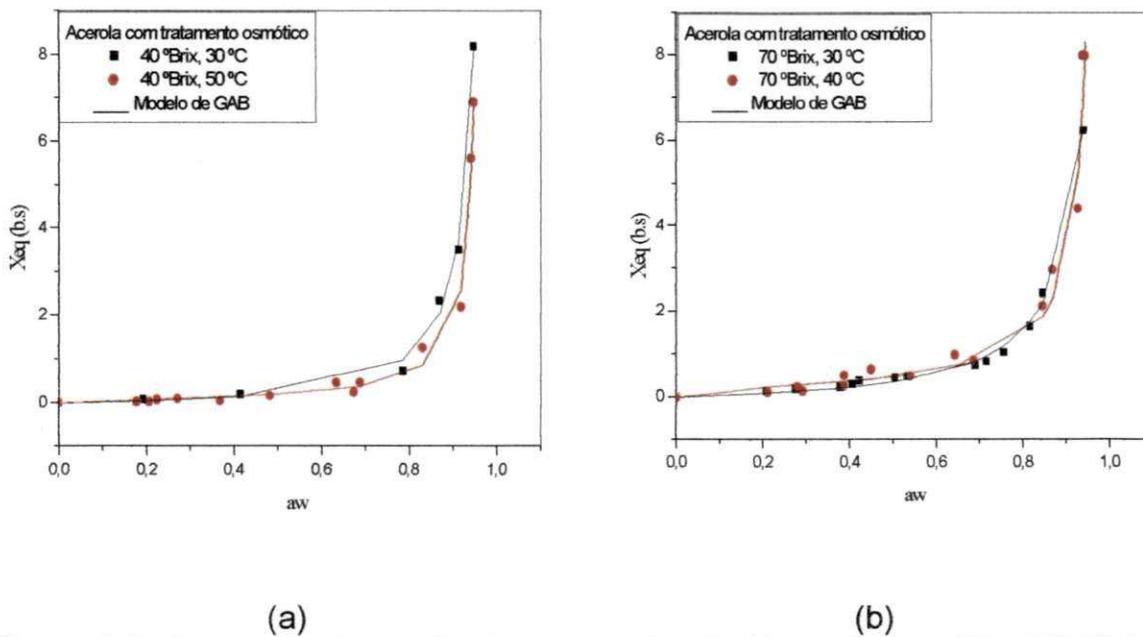


Figura 4.4 – Isotermas de sorção da acerola. (a) desidratação osmótica (40 °Brix) 30 e 40 °C, (b) desidratação osmótica (70 °Brix) 30 e 40 °C

Também pode ser observado na Tabela 4.4, que as constantes C e K do modelo aumentam com a temperatura, na mesma condição do processo osmótico, porém o conteúdo de umidade diminui e o parâmetro K aumenta. Esta

tendência parece geral com exceção da isoterma de 50 °C da amostra "in natura" que apresentou um comportamento oposto: o X_m é ligeiramente maior e os parâmetros C e K são menores que a 40 °C.

Analisando os resultados para as isotermas de 30 °C pode ser observado o efeito do tratamento osmótico sobre os parâmetros de GAB. O conteúdo de umidade de monocamada aumenta e as constantes C e K diminuem. O aumento do °Brix aumenta esta tendência salvo com relação a constante C, cujo valor aumenta quando se comparam as amostras tratadas com 40 e 70° Brix.

PROTHON & AHRNÉ (2004), no tratamento osmótico da maçã, verificaram que a constante C aumenta com a temperatura. MAROULIS et al. (1988) na aplicação da regressão não-linear do modelo de GAB para uva passas, mantendo-se constante o conteúdo de umidade de monocamada para cada temperatura, observaram que a constante C diminui com o aumento da temperatura, aumentando o valor da constante K.

Tabela 4.4 – Parâmetros da equação de GAB e coeficientes de regressão da acerola para diferentes tratamento e temperaturas

Tratamento	Temperatura (°C)	Parâmetros			
		X_m	C	K	R^2
40 °Brix – 24 h	30	0,2859	0,4995	1,0213	0,9963
40 °Brix – 24 h	50	0,1238	4,2063	1,0362	0,9936
70 °Brix – 24 h	30	0,4349	0,6613	0,9975	0,9955
70 °Brix – 24 h	40	0,2530	10,876	1,0272	0,9750
"In natura"	30	0,2311	1,7757	1,0304	0,9859
"In natura"	40	0,1656	5,5305	1,0382	0,9906
"In natura"	50	0,1705	0,6699	1,0208	0,9978

A partir dos valores apresentados na Tabela 4.4 foram calculadas as entalpias de sorção nos intervalos de temperaturas correspondentes as Equações (2.12) e (2.13). Os resultados são mostrados na Tabela 4.5. Observa-se que os ΔH_c 's calculados são negativos e elevados, enquanto que os ΔH_k 's são negativos e baixos, tanto para a acerola "in natura" no intervalo de 30 a 40 °C quanto para

as acerolas após o tratamento osmótico. Contrariamente, as acerolas “in natura”, no intervalo de 40 a 50 °C, apresentam ΔH 's positivos.

Segundo MULET et al. (2002) e VAZQUEZ et al. (1999) na utilização do modelo de GAB encontraram valores positivos de ΔH_C e ΔH_K . Entretanto, MAROULIS et al. (1988) encontraram um valor alto e positivo para ΔH_C e um pequeno valor negativo para ΔH_K , podendo ser positivo, devido à dissolução dos açúcares das frutas.

Estudos posteriores serão necessários, em faixas de temperatura mais amplas, de modo a poderem confirmar estes resultados.

Tabela 4.5 – Constantes que dependem da temperatura ajustada ao modelo de GAB

Tratamento	Temperatura (°C)	Constantes de GAB			
		ΔH_C (J/mol)	C_o	ΔH_K (J/mol)	K_o
40 °Brix – 24 h	(30-50)	-86,683	$4,391 \times 10^{14}$	-0,589	1,290
70 °Brix – 24 h	(30-40)	-220,785	$7,645 \times 10^{37}$	-2,313	2,499
“In natura”	(30-40)	-89,576	$4,923 \times 10^{15}$	-0,594	1,304
“In natura”	(40-50)	177,420	$1,358 \times 10^{-29}$	1,420	1,662

5. Desidratação osmótica

O estudo da desidratação osmótica foi realizado em três etapas. Na primeira foi analisada a desidratação osmótica em tempos longos de processamento, em condições de temperatura ambiente e sem agitação. A segunda etapa foi dedicada ao estudo do efeito das variáveis de processo temperatura, concentração e agitação sobre a cinética. Nesta fase foi fixado um tempo de processamento de 4 h, adequado para o estudo dos efeitos sobre a cinética mediante o planejamento fatorial apresentado no Capítulo 3, Tabela 3.3. Também foi realizado nesta etapa um estudo detalhado da cinética com agitação no tempo de 48 h.

Para uma melhor compreensão do papel da película externa da fruta sobre os mecanismos de transferência, na terceira etapa foi analisada a desidratação através da película. Neste caso o planejamento utilizado foi o da Tabela 3.5. Também foi realizado um estudo da cinética de desidratação através da película da acerola sem agitação durante 24 h.

5.1. Desidratação osmótica da acerola para tempos longos de imersão sem agitação

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados obtidos no final do processamento para 24, 48 e 72 h, em termos de perda de água (PA), ganho de sacarose (GS) e perda de peso (PP). A redução de água e aumento de quantidades de sólidos solúveis na fruta produz uma redução de até 60% do conteúdo de umidade inicial e ganho de sacarose de até 30%, dependendo das condições do tratamento, durante o processo osmótico, como mostra a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores de (PA), (GS) e (PP), obtidos experimentalmente na desidratação osmótica da acerola

Experimento	Concentração (°Brix)	Tempo (h)	PA (%)	GS (%)	PP (%)
1	40	24	13,80	16,77	11,41
2	70	24	13,48	11,18	11,93
3	40	48	24,33	10,37	22,81
4	70	48	58,24	19,15	54,22
5	40	72	39,10	27,80	36,08
6	70	72	62,27	31,19	57,31

Através dos resultados experimentais da desidratação das acerolas, foram graficados as curvas características da umidade normalizada em base úmida nas concentrações de sacarose de 40 e 70 °Brix para tempos de imersão de 24, 48 e 72 h. As curvas de desidratação osmótica das acerolas submetidas a tratamento com sacarose, durante o tempo de imersão de 24 h são mostradas na Figura 5.1. Observa-se que para tempo de imersão de 24 h os resultados não são muito sensíveis à variação do Brix, por esta razão, as curvas de desidratação osmótica apresentam o mesmo comportamento. No entanto, com o aumento da concentração da solução de sacarose de 40 para 70 °Brix, atingindo uma umidade normalizada especificada de 0,87 em base úmida, se observa que houve uma redução de 80 min no tempo da desidratação osmótica.

Na Figura 5.2 é notória a influencia do aumento do °Brix para o tempo de imersão de 48 h. Observa-se que no final da desidratação osmótica da solução de sacarose de 40 e 70 °Brix, houve uma redução do conteúdo de umidade inicial de respectivamente 26 e 60%. O aumento do Brix da solução de sacarose, reduziu em 1791 min o tempo da desidratação osmótica necessário para atingir uma umidade normalizada especificada de 0,74 em base úmida. Essa observação é semelhante à descrita por ALVAREZ et al. (1995) para desidratação osmótica de morangos com umidade inicial de 86%. Segundo os autores, houve uma redução de 10 e 19% da umidade inicial quando imersos em soluções de sacarose de 19 e 51%, respectivamente, para o tempo de imersão de 48 h a 25 °C.

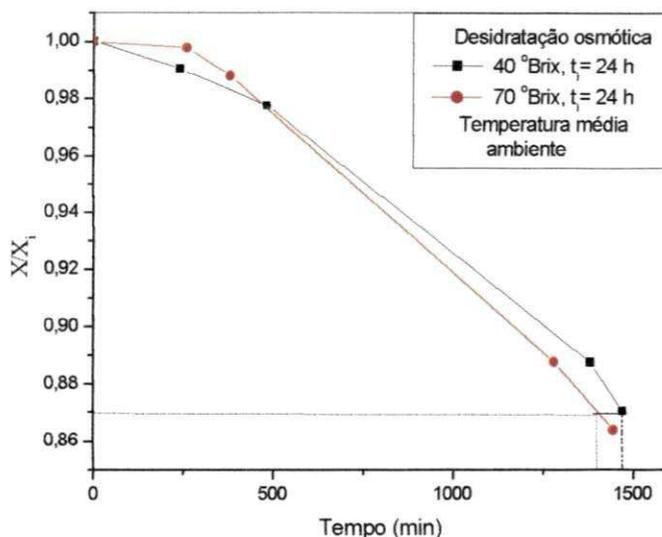


Figura 5.1 - Efeito da concentração de sacarose na redução do conteúdo de umidade da acerola para o tempo de imersão de 24 h sem agitação

Na Figura 5.3 pode-se verificar de modo análogo aos resultados observados na desidratação osmótica com tempo de imersão de 48 h, a influência significativa do aumento do °Brix na desidratação osmótica e na redução do tempo na desidratação osmótica para tempos de imersão de 72 h. Observa-se que no final da desidratação osmótica com soluções de 40 e 70 °Brix, houve uma redução do conteúdo de umidade de respectivamente 42 e 65%. Com o aumento da concentração da solução de 40 para 70 °Brix, houve uma redução de 2034 min no tempo da desidratação osmótica para atingir uma umidade normalizada especificada de 0,587.

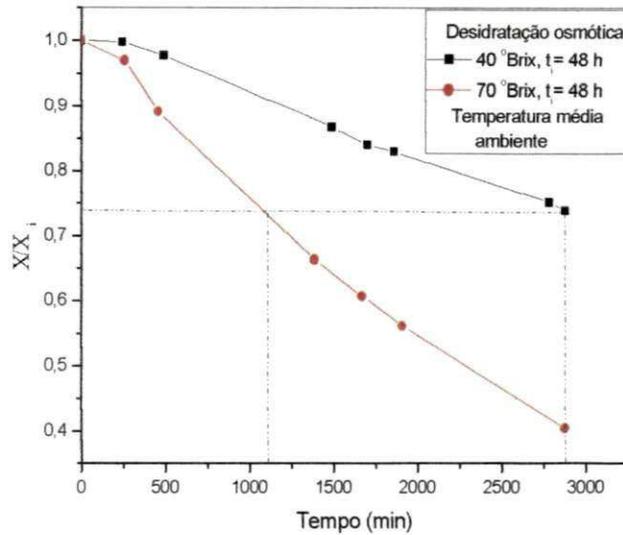


Figura 5.2 - Efeito da concentração de sacarose na redução do conteúdo de umidade da acerola para o tempo de imersão de 48 h sem agitação

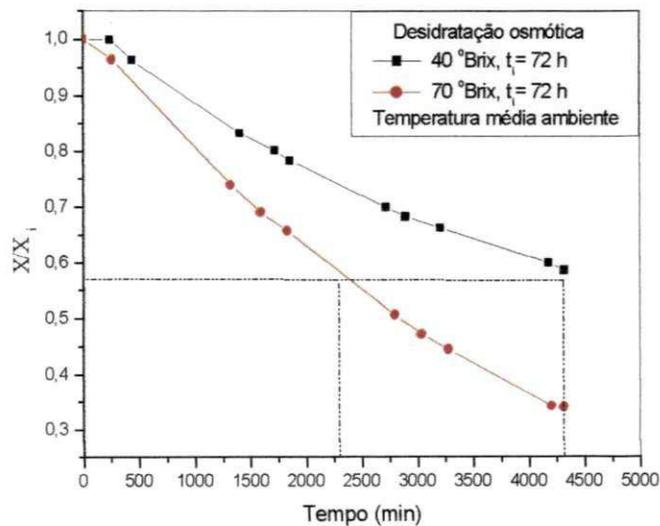


Figura 5.3 - Efeito da concentração de sacarose na redução do conteúdo de umidade da acerola para o tempo de imersão de 72 h sem agitação

Nas Figuras de 5.1 a 5.3, pode-se confirmar a eficácia do tratamento osmótico no tempo de imersão de 24, 48 e 72 h, para a redução do conteúdo de umidade. Na Tabela 5.1, verifica-se que com o aumento do tempo de exposição das acerolas à solução osmótica, tanto para as acerolas desidratadas na solução de 40 °Brix quanto 70 °Brix, há um aumento da perda de água (PA), perda de peso (PP) e ganho de sacarose (GS). Com o aumento da concentração da solução de sacarose de 40 para 70 °Brix para um mesmo tempo de desidratação

há um ganho de sólidos (GS) e aumento da perda de água (PA) e perda de peso (PP) com exceção do tempo de 24 h onde houve pouco efeito do Brix.

5.2. Desidratação osmótica da acerola para tempos de imersão de 4 horas

5.2.1. Efeito da velocidade de agitação

A Figura 5.4 ilustra que as amostras osmoticamente desidratadas em solução de 40 °Brix com agitação de 150 e 780 rpm durante 4 h de imersão, apresentaram melhor resultado de desidratação osmótica quando comparada com as amostras osmoticamente desidratadas sem agitação. Verifica-se que o efeito da agitação elimina a ação bloqueadora da solução de sacarose que se forma na película da acerola, facilitando a transferência de massa. A Figura 5.4 mostra que a desidratação osmótica sem agitação apresenta taxa menores de desidratação. Isso ocorre provavelmente devido à ação bloqueadora da solução de sacarose sobre a película da acerola que age fechando os poros e dificultando a transferência de massa durante o processo. Este fato também foi observado por SILVA (1998).

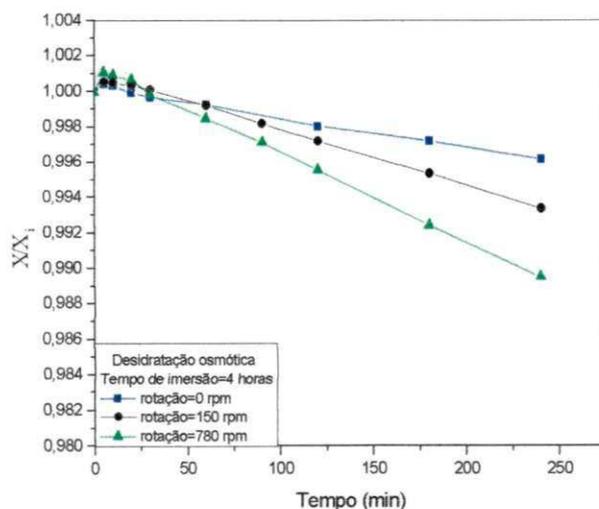


Figura 5.4 – Desidratação osmótica em solução de sacarose 40 °Brix na temperatura ambiente. Efeito da agitação durante a desidratação osmótica sobre a evolução do conteúdo de umidade da acerola em função do tempo

Dessa forma, o tratamento com agitação favorece a perda de água durante a desidratação osmótica, sendo que a rotação de 780 rpm apresentou maior taxa de desidratação. A Tabela 5.2 percebe-se que o aumento da velocidade de rotação de 150 para 780 rpm promove uma redução do tempo de desidratação da ordem de 38 e 54%, respectivamente, para atingir um conteúdo de umidade normalizada e especificada da ordem de 99,6%, comparando com as amostras desidratadas osmoticamente sem agitação. Este fato foi observado por HAWKES & FLINK (1978) que estudaram a influência da agitação sobre o coeficiente de difusão, verificando que os coeficientes foram maiores em sistemas agitados quando comparados com sistemas sem agitação. A influência significativa da velocidade de agitação na redução do tempo deve-se à remoção da camada desidratante ao redor do material que torna mais rápida a saída de água do seu interior.

Tabela 5.2 - Influência da velocidade de agitação em solução de sacarose (40 °Brix) na redução do tempo de desidratação para atingir um conteúdo de umidade normalizada especificada de 99,6% (base úmida)

Velocidade de rotação (rpm)	Tempo da desidratação osmótica (min) Umidade de 99,6%	Redução do tempo (%)
Rotação = 0	240	—
Rotação = 150	149	38
Rotação = 780	109	54

Na Figura 5.5 está representada a massa da acerola durante a desidratação osmótica e a taxa de variação de massa em função do tempo para melhor analisar o processo de desidratação osmótica com o efeito da velocidade de agitação. Conforme se mostram nas Figuras 5.5 (a) e (b), observa-se que para todas as amostras osmoticamente desidratadas, houve um ganho de massa nos primeiros 7 min iniciais. A explicação provável deve estar relacionada ao início do tratamento osmótico, ter sido realizado em intervalos de tempos curtos, não exercendo grande influência sobre a estrutura celular da fruta permitindo que ocorra um ganho de peso por ingresso de sacarose, em proporção maior que a saída de água no interior da fruta. Entretanto, este fato não foi observado por

outros autores, tendo em vista que os estudos de desidratação osmótica com frutas foram realizados em intervalos maiores de tempo, verificando desta forma uma maior perda de água em relação ao ganho de açúcar. Na Figura observa-se que durante os 23 min posterior ocorreu à perda de massa com o tempo e a partir da primeira meia hora até completar o tempo de imersão determinado de 4 h, observa-se que para todas as amostras osmoticamente desidratadas com agitação de 150 e 780 rpm a taxa de desidratação permanece constante.

A partir destes resultados foi escolhida a velocidade de rotação de 780 rpm para os estudos posteriores.

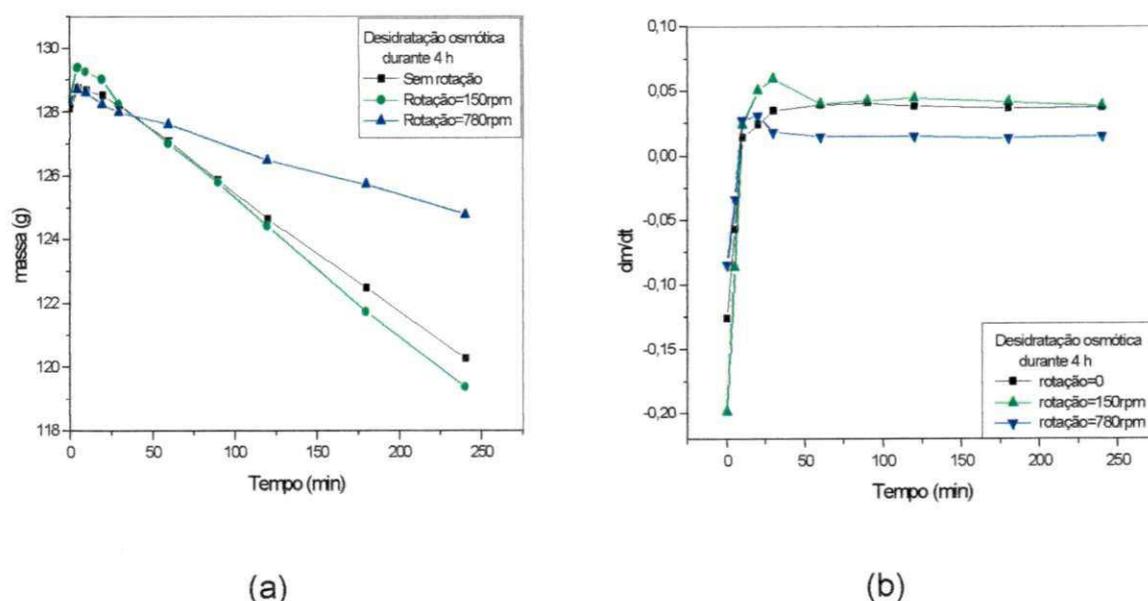


Figura 5.5 – Massa da acerola durante a desidratação osmótica em função do tempo (a) e derivada das curvas de desidratação osmótica da acerola em função do tempo (b)

5.2.2. Efeito da temperatura e concentração sobre a cinética de desidratação osmótica

Na Figura 5.6 se observa o efeito da temperatura e da concentração sobre a cinética da desidratação osmótica da acerola, durante 4 h. Para as concentrações de 40 e 70 °Brix e com agitação de 780 rpm.

Observa-se através da Figura 5.6 que até os 35 min as curvas para as temperaturas estudadas de 30 e 40 °C apresentam o mesmo comportamento com uma desidratação mais lenta, sugerindo uma mudança de mecanismo de transporte após esse tempo. Uma possível explicação é que neste intervalo ocorre a solubilização da camada cerosa presente na película da fruta, diminuindo a permeabilidade e abrindo os orifícios da membrana celular, tornando-a mais permeável para facilitar a transferência de massa. Após o período inicial, a transferência de massa torna-se significativa. Observa-se o efeito positivo de desidratação, tanto para 40 quanto para 70 °Brix. Os resultados confirmaram as observações de SILVA (1998) que estudou o efeito de diversos pré-tratamentos com a finalidade de diminuir a resistência da película da acerola e reduzir o tempo da secagem. Por outro lado, observa-se que as amostras osmoticamente desidratadas com temperatura de imersão de 40 °C apresentaram uma cinética de desidratação mais rápida, após os 35 min.

PONTING et al. (1966) e VIDEV et al. (1990) estudaram o efeito da temperatura na desidratação osmótica de frutas e verificaram que com o aumento da temperatura, a transferência de massa aumenta. Outros pesquisadores (SILVEIRA & ALVES, 2002; SOUZA, 2002) estudaram a desidratação de tomates, também verificaram que à medida que se aumenta a temperatura de imersão, há um aumento da perda do conteúdo de umidade e redução de peso do tomate.

A Tabela 5.3 mostra que, para as amostras desidratadas a 40 °Brix a 40 °C, houve uma redução do tempo de secagem em torno de 111 min para atingir a mesma relação do conteúdo de umidade de 0,87, quando comparada com a temperatura de 30 °C. Para as amostras processadas a 70 °Brix na temperatura de 40 °C, há uma diminuição do tempo de desidratação osmótica, em torno de 88 min para atingir uma relação do conteúdo de umidade de 0,94, quando comparada com a temperatura de 30 °C. Nos experimentos repetidos nas mesmas condições de 55 °Brix e 35 °C, observa-se o tempo necessário para atingir uma relação de umidade de 0,91, percebe-se boa reprodutibilidade para a primeira e segunda amostras, com diminuição do tempo de apenas 7 min e para a terceira amostra, nota-se uma redução de aproximadamente 21% do tempo.

Tabela 5.3 – Influência do °Brix e da temperatura de imersão na redução do tempo de desidratação osmótica em uma relação de umidade especificada de 0,87, 0,91 e 0,94 para 40, 55 e 70 °Brix, respectivamente

Relação de umidade	0,87		0,94		0,91		
Concentração	40 °Brix		70 °Brix		55 °Brix		
Temperatura de imersão	30 °C	40 °C	30 °C	40 °C	35 °C		
Tempo (min)	240	128,54	240	151,36	240	232,31	188,15
Redução do tempo (min)	111,46		88,64		7,70		51,85

Vários autores já relataram que a transferência de massa durante a desidratação osmótica aumenta com a temperatura. Segundo ARGANDOÑA (1999), a temperatura é uma variável importante sobre a cinética de desidratação osmótica, afetando-a diretamente.

SILVEIRA & ALVES (2002) afirmaram que a diminuição do tempo do processo quando se eleva a temperatura pode estar associada à diminuição da viscosidade, o que facilitaria a transferência de massa melhorando os coeficientes convectivos.

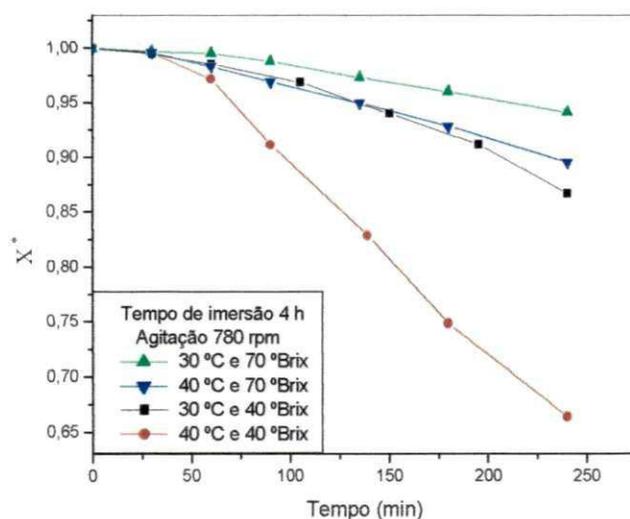


Figura 5.6 - Efeito da temperatura de imersão e da concentração na desidratação osmótica da acerola em solução de sacarose de 40 e 70 °Brix

Na Figura 5.6, observa-se o efeito da concentração de sacarose juntamente com a temperatura do processo. Verifica-se que o aumento da concentração de sacarose de 40 para 70 °Brix, com agitação de 780 rpm não favoreceu a perda de umidade, provavelmente devido à alta viscosidade da solução osmótica e uma provável formação de um filme de sacarose na superfície da acerola que pode ter dificultado a difusão da água para a solução. No entanto, independentemente para cada concentração percebe-se o efeito favorável da temperatura de imersão. Nota-se ainda, que para a concentração menor houve uma maior influência na desidratação com o aumento da temperatura.

Portanto, a melhor condição para a perda de umidade na desidratação osmótica da acerola foi para a condição de 40 °C e 40 °Brix, apresentando uma maior redução do tempo de desidratação osmótica, em torno de 141 min para atingir a mesma relação de umidade de 0,90, quando comparada com a desidratação nas condições de 40 °C e 70 °Brix. Isto contraria alguns pesquisadores dentre eles ARGANDOÑA (1999) que na desidratação osmótica de goiaba, observaram que o aumento da concentração da solução de sacarose e o acréscimo da temperatura influenciaram positivamente sobre a perda de água. Resultados similares foram encontrados por outros pesquisadores KAYMAK-ERTEKIN & SULTANOGLU (2000) e SILVEIRA & ALVES (2002) na desidratação osmótica de maçãs e tomates, respectivamente.

A influência favorável da temperatura e negativa do °Brix, apesar do aumento da força impulsora para a transferência de massa com o aumento da concentração de solução, estariam relacionadas com a variação da viscosidade da solução, que diminui com a temperatura e aumenta consideravelmente com o °Brix, propiciando ou dificultando a saída de água da acerola para o meio externo.

5.2.3. Experimentos repetidos nas mesmas condições (ponto central) – desidratação osmótica

As repetições do ponto central são utilizadas para verificar a reprodutibilidade do método experimental. A Figura 5.7, mostra um comportamento quase coincidente para dois experimentos e a terceira curva

apresentou um desvio. Este desvio estaria relacionado a diferentes lotes de acerolas utilizadas para cada experimento, que podem apresentar diferenças consideradas normais para materiais biológicos.

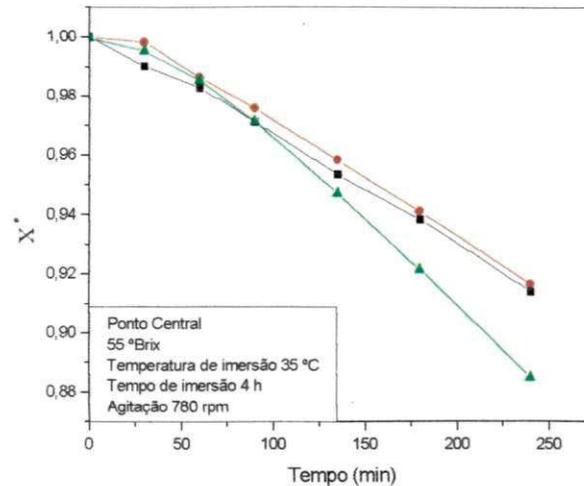


Figura 5.7 - Reprodutibilidade dos ensaios na desidratação osmótica no ponto central. Temperatura de imersão de 35 °C e solução de sacarose de 55 °Brix

5.2.4. Evolução dos sólidos solúveis da acerola

Nas Figuras 5.8 a, b e 5.9 são apresentados os sólidos solúveis (°Brix) da acerola durante as 4 h de desidratação osmótica. Observa-se que as curvas apresentaram sensíveis oscilações para cada intervalo, estas oscilações estão relacionadas a ensaios destrutivos, onde as acerolas eram retiradas em cada intervalo de tempo e realizada a leitura, desta forma as mesmas apresentam características biológicas diferentes tais como: grau de maturidade e sólidos solúveis presentes. Além disso, estas características podem ser modificadas durante o processo de desidratação alterando sua permeabilidade, facilitando a incorporação de açúcar e perda de água.

Resultados semelhantes foram encontrados por SOUZA (2002) com relação às oscilações no ganho de sólidos durante 360 min de desidratação osmótica do tomate com pele.

No entanto, apesar das oscilações presentes, algumas tendências gerais podem ser assinaladas. Verifica-se que em geral o ganho de sólidos solúveis aumenta com o aumento da temperatura e do °Brix da solução como se ilustra nas mesmas figuras e na Tabela 5.4. Também em termos gerais pode ser observado nas Figuras 5.8 e 5.9 que o ganho de sólidos é mais acentuado nos primeiros 30 min. Neste tempo, a desidratação osmótica é lenta, como se pode verificar nas Figuras 5.6 e 5.7. Após aproximadamente 30 min a desidratação se torna mais rápida indicando uma possível mudança do mecanismo de transporte. É possível que o aumento da temperatura e da concentração tenham facilitado o rompimento da membrana celular promovendo a permeabilização da película. Índícios disto puderam ser observados experimentalmente através do amolecimento da fruta, que acontece em torno de 90 min nos experimentos a 40 °C, levando um tempo maior de aproximadamente 135 min quando a temperatura foi de 30 °C.

ARGANDOÑA (1999) e AZOUBEL (2002) durante a desidratação osmótica da goiaba e do caju, respectivamente, observaram que a alta temperatura possibilitou o rompimento da membrana celular, aumentando o ganho de sólidos.

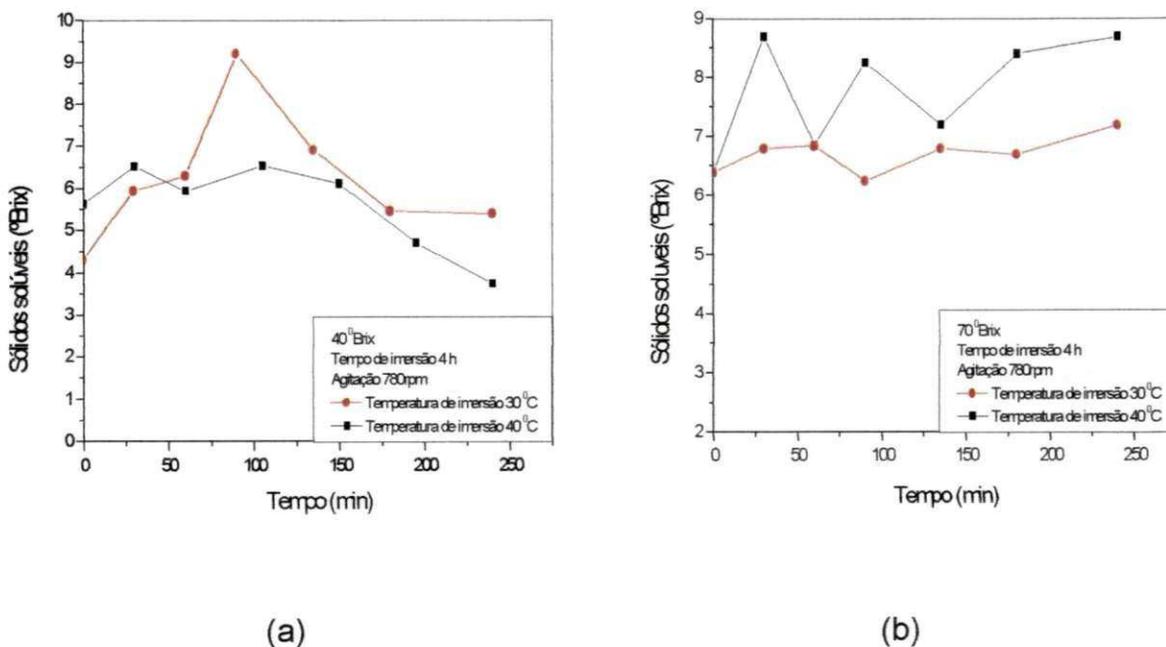


Figura 5.8 - Efeito da temperatura de imersão sobre os sólidos solúveis da acerola durante a desidratação osmótica, (a) 40 °Brix e (b) 70 °Brix

Segundo RAOULT-WACK (1994), a perda de água e o ganho de sólidos estão relacionados à característica biológica da fruta como a membrana celular, o grau de compactação e estrutura natural do tecido, a quantidade de sólidos insolúveis e os espaços intracelulares.

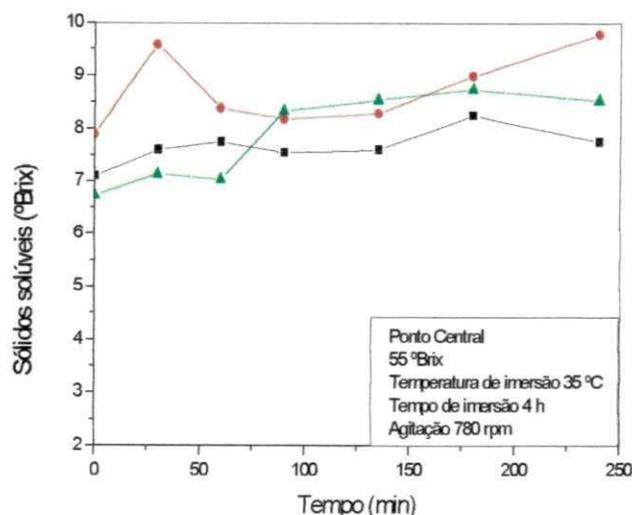


Figura 5.9 - Efeito da temperatura de imersão sobre os sólidos solúveis da acerola durante a desidratação osmótica de 55 °Brix

AZOUBEL (2002) durante o estudo da desidratação osmótica do caju, observou que a concentração não exerceu influência no ganho de sólidos para tempos de processo menores que 180 min.

Tabela 5.4 – Influência da concentração e da temperatura de imersão no ganho de sacarose na acerola, após 4 h de desidratação osmótica

Concentração	40 °Brix		70 °Brix		55 °Brix		
	30	40	30	40	35		
Sólidos solúveis (inicial) °Brix	4,36	5,66	6,50	6,50	6,74	7,08	7,94
Sólidos solúveis após 4 h (final) °Brix	5,42	3,76	7,22	8,74	7,78	8,58	9,82
Ganho relativo de sólidos solúveis (%)	19,55	—	9,97	25,63	13,36	17,48	19,14

5.2.5. Sólidos totais da acerola durante a desidratação osmótica

Os sólidos totais em função do tempo de processo são mostrados nas Figuras 5.10 (a e b). Comparando as Figuras 5.8 (b) e 5.9 de sólidos solúveis com as Figuras 5.10 (a e b) de sólidos totais, observa-se que o comportamento das curvas segue a mesma tendência. Sabendo que a quantidade de sólidos totais é igual à quantidade de sólidos solúveis (ácidos orgânicos, sacarídeos, sais, entre outros) mais sólidos insolúveis, a tendência análoga de sólidos solúveis e sólidos totais resulta óbvia.

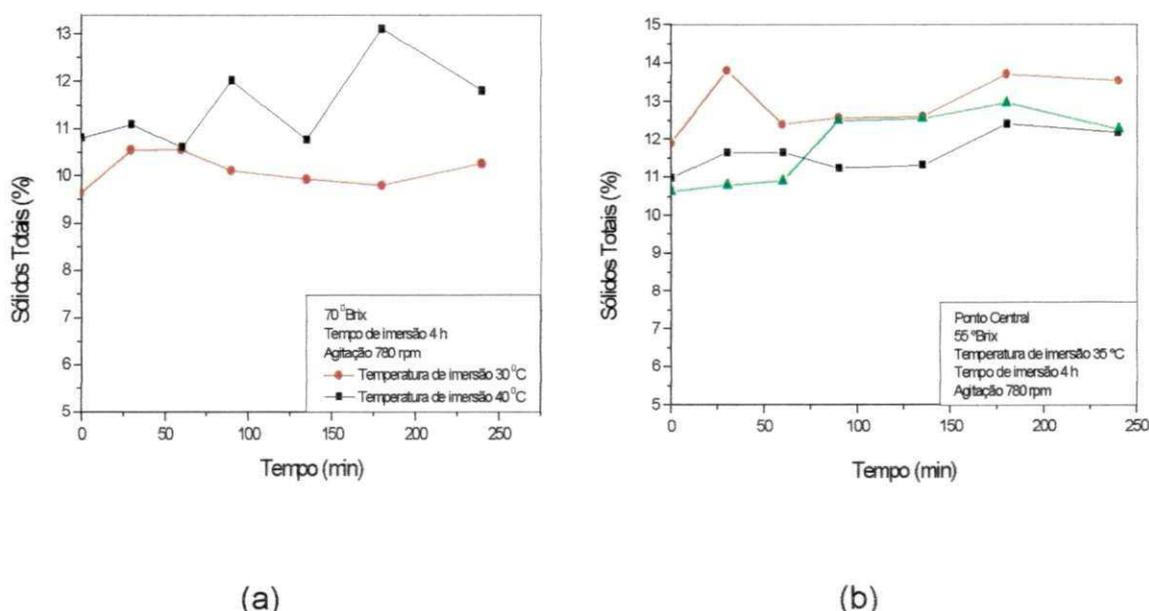


Figura 5.10 – Efeito da temperatura de imersão sobre os sólidos totais da acerola durante a desidratação osmótica de 4 h. (a) 70 °Brix e (b) 55 °Brix

5.2.6. Atividade de água (a_w) da acerola durante a desidratação osmótica

A Tabela 5.5 mostra o comportamento da atividade de água da acerola em função do tempo durante o processo de desidratação osmótica. Verifica-se que a a_w da acerola não diminuiu durante as 4 h de desidratação, apesar de que neste tempo foram observados variações do conteúdo de umidade de 2 a 10% em relação à umidade inicial.

Outros autores ARGANDOÑA (1999) e LIMAVERDE & FINZER (1996) na desidratação osmótica da goiaba e milho verde, respectivamente, também mostraram que a redução da atividade de água na desidratação osmótica é pouco significativa, mesmo com tempos longos de processo. Portanto os resultados encontrados eram esperados, já que se torna difícil à redução da atividade de água em pequeno intervalo de tempo.

Tabela 5.5 - Variação da atividade de água da fruta com o tempo de processo

Tempo (min)	a_w						
	40 °Brix		55 °Brix			70 °Brix	
	30 °C	40 °C	35 °C			30 °C	40 °C
0	0,947	0,942	0,946	0,954	0,949	0,945	0,944
90	0,948	0,943	0,948	0,953	0,948	0,946	0,951
240	0,956	0,949	0,951	0,942	0,952	0,955	0,948

5.3. Cinética da desidratação osmótica com agitação a tempo prolongado

Com o objetivo de estudar com mais detalhe o comportamento dos sólidos solúveis, dos sólidos totais e da atividade de água, durante a desidratação osmótica da acerola, foi realizado um experimento com duração de 48 h na temperatura média ambiente e sob agitação não-contínua de 780 rpm no intervalo de 12 h.

A Figura 5.11 mostra, as curvas da relação de umidade em função do tempo nas concentrações de 40 e 70 °Brix. Observa-se que, para atingir uma relação de umidade de 66%, a diminuição da concentração favorece a transferência de massa, reduzindo o tempo de desidratação em torno de 1087 min. No entanto, para soluções com concentração alta, o aumento da concentração não favorece a desidratação dificultando a difusão de água para o meio externo, apesar do aumento da força impulsora para a transferência de massa. Este efeito está relacionado provavelmente ao aumento da viscosidade com a concentração.

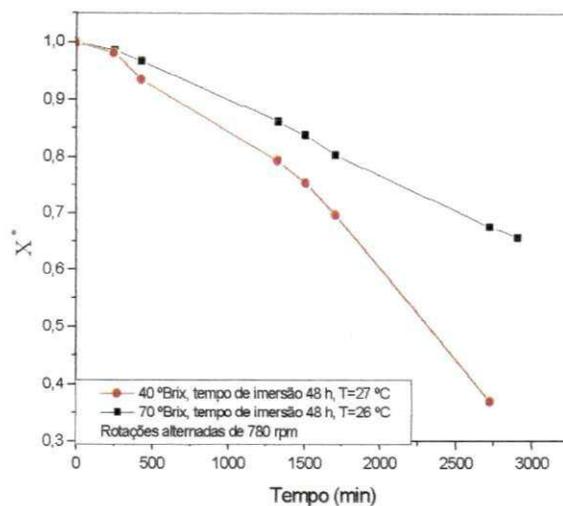


Figura 5.11 - Efeito do tempo de imersão na desidratação osmótica da acerola em solução de sacarose de 40 e 70 °Brix na temperatura média ambiente

5.3.1. Sólidos solúveis e totais da acerola durante a desidratação osmótica de 48 horas

A Figura 5.12 (a) apresenta a quantidade de sólidos solúveis da acerola, em função do tempo. Observa-se uma tendência da acerola ganhar sólidos solúveis, mantendo-se crescente com o tempo. Este resultado foi verificado anteriormente para tempo de imersão de apenas 4 h, com o efeito da temperatura de imersão e agitação. Na Tabela 5.6, nota-se que com o aumento da concentração de 40 para 70 °Brix, após 48 h houve um aumento de ganho de sólidos solúveis de 25,81 para 52,10%.

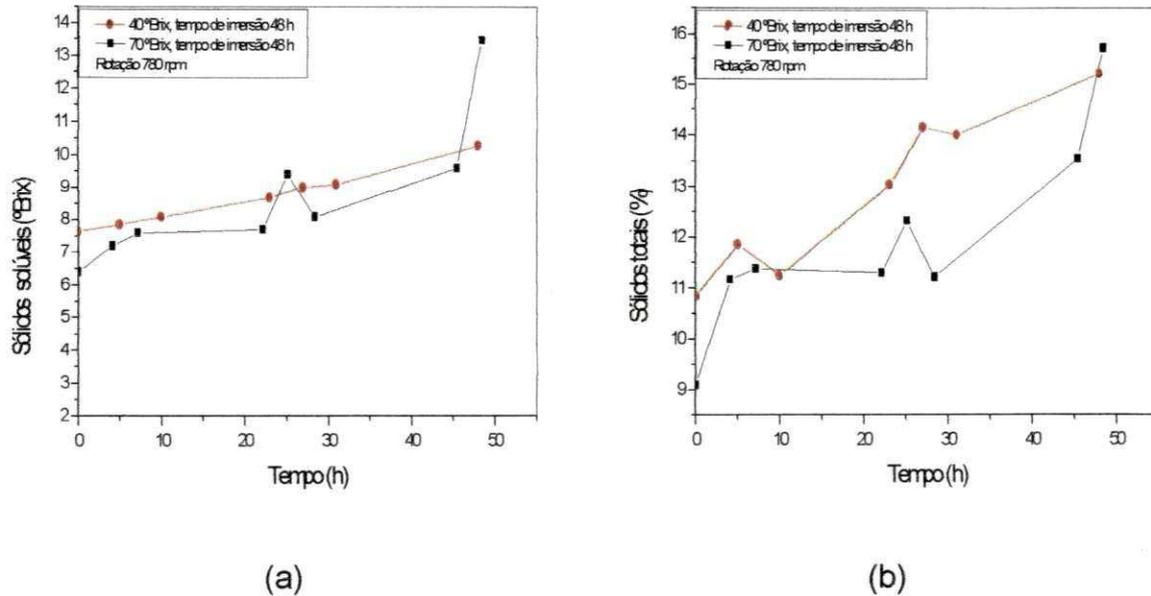


Figura 5.12 - Efeito do tempo de imersão da acerola osmoticamente desidratada em solução de sacarose (a) sólidos solúveis e (b) sólidos totais

A Figura 5.12 (b) ilustra a percentagem de sólidos totais em função do tempo, durante 48 h de desidratação osmótica nas concentrações de 40 e 70 °Brix. Nota-se que os sólidos totais, assim como os sólidos solúveis, aumentam com o tempo e com a concentração da solução, obtendo desta forma para 40 e 70 °Brix ganho de sólidos totais de 28,81 e 41,93%, respectivamente, (no final do processo como mostra a Tabela 5.6). Este aumento está relacionado com o ganho de sacarose que é proveniente da solução desidratante.

Tabela 5.6 – Efeito dos sólidos solúveis e sólidos totais, após 48 h de desidratação osmótica da acerola

Concentração da solução	Sólidos solúveis (°Brix)		Sólidos totais (%)	
	40 °Brix	70 °Brix	40 °Brix	70 °Brix
Temperatura média ambiente de imersão (°C)	27	26	27	26
Sólidos solúveis (inicial) (°Brix)	7,68	6,50	10,87	9,14
Sólidos solúveis após 48 h (final) (°Brix)	10,32	13,57	15,27	15,74
Ganho relativo de sólidos solúveis (%)	25,58	52,10	28,81	41,93

5.3.2. Atividade de água da acerola durante a desidratação osmótica de 48 horas

A Tabela 5.7 apresenta o comportamento da atividade de água durante 48 h de desidratação osmótica, utilizando uma solução de sacarose com 40 e 70 °Brix e temperatura média de imersão de 27 e 26 °C, respectivamente.

Pode-se observar através da Tabela 5.7 que em 48 h de desidratação osmótica houve pouca redução da atividade de água da fruta. O menor valor medido, que foi 0,938, encontra-se na faixa do valor ótimo para o crescimento de microrganismos, que está entre 0,92 e 0,99, o que indica a necessidade de uma secagem posterior para inibir a deterioração da fruta por ação desses microrganismos.

Tabela 5.7 - Efeito do tempo de imersão sobre a atividade de água de acerolas desidratadas osmoticamente a temperatura ambiente

40 °Brix		70 °Brix	
TEMPO (min)	a_w (30 °C)	TEMPO (min)	a_w (30 °C)
0	0,946	0	0,948
300	0,947	250	0,946
600	0,948	1330	0,939
1380	0,946	1510	0,942
1620	0,944	1720	0,953
1860	0,945	2740	0,942
2880	0,938	2920	0,944

Como foi mencionado anteriormente, outros autores encontraram valores muito próximos. ARGANDOÑA (1999), estudando a cinética da desidratação osmótica de goiabas, obteve 0,832 como menor valor de atividade de água, quando trabalhou com a temperatura de imersão de 40 °C e com a concentração da solução desidratante de 70 %, em 60 h de processo. LIMAVERDE & FINZER (1996) na desidratação de milho verde em solução de sacarose de 50 °Brix submetido à agitação na temperatura ambiente obteve uma atividade de água de 0,9847 durante 26,42 h de desidratação osmótica.

5.4. Modelagem da desidratação osmótica

5.4.1. Umidade de equilíbrio da acerola na desidratação osmótica

Tendo em vista a alta resistência da película da acerola não foi possível determinar experimentalmente a umidade de equilíbrio da fruta osmoticamente desidratada, pois seria necessário um tempo maior que 72 h, como mostra a (Figura 5.3), correndo o risco de fermentar as amostras.

Neste caso, no equilíbrio a atividade de água (a_w) da solução de sacarose é igual à atividade de água (a_w) no interior da acerola osmoticamente desidratada, com base no que foi descrito anteriormente durante o processo de desidratação osmótica de 4 e 48 h, a atividade de água (a_w) e o °Brix da solução de sacarose permaneceram praticamente constantes com o tempo, devido o fluxo de água da acerola para a solução ser insignificante em relação ao volume da solução. Desta forma, para o cálculo da umidade de equilíbrio através da equação de GAB, foi utilizado o valor inicial da atividade de água (a_w) para cada concentração da solução de sacarose, desprezando sua variação durante o processo.

A atividade de água (a_w) da solução foi calculada através da equação de FAVETTO & CHIRIFE (1985), citado em WELTI & VERGARA (1997), com a finalidade de comparar com os valores experimentais.

$$a_w = 1 - K \cdot M \quad (5.1)$$

onde: $K = 0,02476$ (Constante do soluto)

M = molalidade da solução de sacarose

Na Tabela 5.8 mostram as atividades de água para as soluções com concentrações de 40, 55 e 70 °Brix determinada experimentalmente e também calculada.

Tabela 5.8 – Valores experimentais e calculados da atividade de água (a_w) das soluções de sacarose

Temperatura	Brix				
	40°		55°	70°	
	30 °C	40 °C	35 °C	30 °C	40 °C
a_w (Determinado)	0,934	0,932	0,904	0,845	0,830
M (mol/g)	1,949		3,574	6,822	
a_w (Calculado)	0,951		0,9115	0,831	

Comparando os valores das atividades de água da Tabela 5.8, nota-se uma pequena diferença, devido à a_w calculada pela Equação (5.1) não levar em conta o efeito da temperatura. No entanto, o desvio entre o valor calculado e o experimental é inferior a 2%, o que pode ser considerado aceitável.

5.4.2. Modelo difusional para a cinética de desidratação osmótica

Com o objetivo de modelar a cinética de desidratação osmótica da acerola e calcular o coeficiente de difusividade efetiva (D) foi utilizado o modelo difusional de Fick Equação (2.18a), considerando a geometria esférica. Mediante o método de tentativas, foi encontrado que nove termos da série eram suficientes para atingir a convergência.

De acordo com a Figura 5.6, considerando que a desidratação começa após um período de solubilização da parte cerosa da fruta, para os efeitos do modelo foi considerado o tempo zero 35 min a partir do início do processo.

Na Tabela 5.9 mostram os valores da quantidade de água difundida no infinito (M_∞), o parâmetro A , a difusão efetiva (D), bem como os respectivos coeficientes de correlação (R^2). Observa-se, através da Tabela 5.9, que o valor médio obtido para o parâmetro A é 0,66, nas tentativas com diversos números de termos da série na Equação (2.18a) verificou-se que o valor de A aproxima-se de $6/\pi^2$ na medida que se aumentava o número de termos, apresentando uma diferença entre o valor teórico e experimental em torno de 8,63%. Resultados semelhantes foram encontrados por BARONI & HUBINGER (1996) na desidratação osmótica da cebola, considerando a geometria uma placa plana. Os autores encontraram o valor médio para o parâmetro A de 0,938 com diferenças entre o valor teórico e experimental da ordem de 13,6%. Desta forma o desvio encontrado no presente trabalho é aceitável, considerando-se as aproximações do modelo.

Tabela 5.9 – Valores de M_{∞} , A e D para o modelo difusional com nove termos incluindo o efeito do encolhimento na desidratação osmótica da acerola

Nº	Solução osmótica °Brix	Temperatura de imersão (°C)	Tempo de imersão (min)	M_{∞} (g)	A	$(D \pm \text{erro}) \times 10^5$ (cm ² /min)	R^2
1	40	30	240	33,601	0,649	2,0±0,2	0,989
2	40	40	240	16,711	0,654	8,0±0,8	0,986
3	70	30	240	93,934	0,649	0,48±0,01	0,998
4	70	40	240	90,332	0,651	0,77±0,04	0,991
5	55	35	240	70,069	0,648	1,0±0,06	0,995
6	55	35	240	57,729	0,650	0,67±0,03	0,995
7	55	35	240	62,557	0,649	0,75±0,02	0,997
8	40	27	2880	34,048	0,674	0,66±0,09	0,929
9	70	26	2904	92,799	0,673	0,40 ±0,05	0,957

As Figuras 5.13 e 5.14, mostram o ajuste dos dados experimentais pelo modelo difusional de Fick com nove termos da série incluindo o encolhimento, onde os parâmetros M_{∞} , A , D e R^2 estão apresentados na Tabela 5.9. Observa-se que o modelo obteve um bom ajuste, com o coeficiente de correlação variando de 0,929 a 0,998.

Nas Figuras 5.14(b), para 48 h de tratamento, pode-se observar desvios importantes entre o modelo proposto e os dados experimentais. A falta de ajuste pode ser atribuída, entre outras causas, ao efeito da variação do °Brix da fruta, pouco importante para tempos curtos, mas significativo para tempos prolongados. A variação do °Brix, que pode ser indicativa de transferência de sacarose para o interior da fruta, além da concentração por desidratação, pode afetar o valor da atividade de equilíbrio, bem como tornar menos realísticas as hipóteses de difusividade constante. Por outro lado, neste experimento a agitação era interrompida a noite o que evidentemente deve ter introduzido uma resistência de filme externo considerável durante esse período.

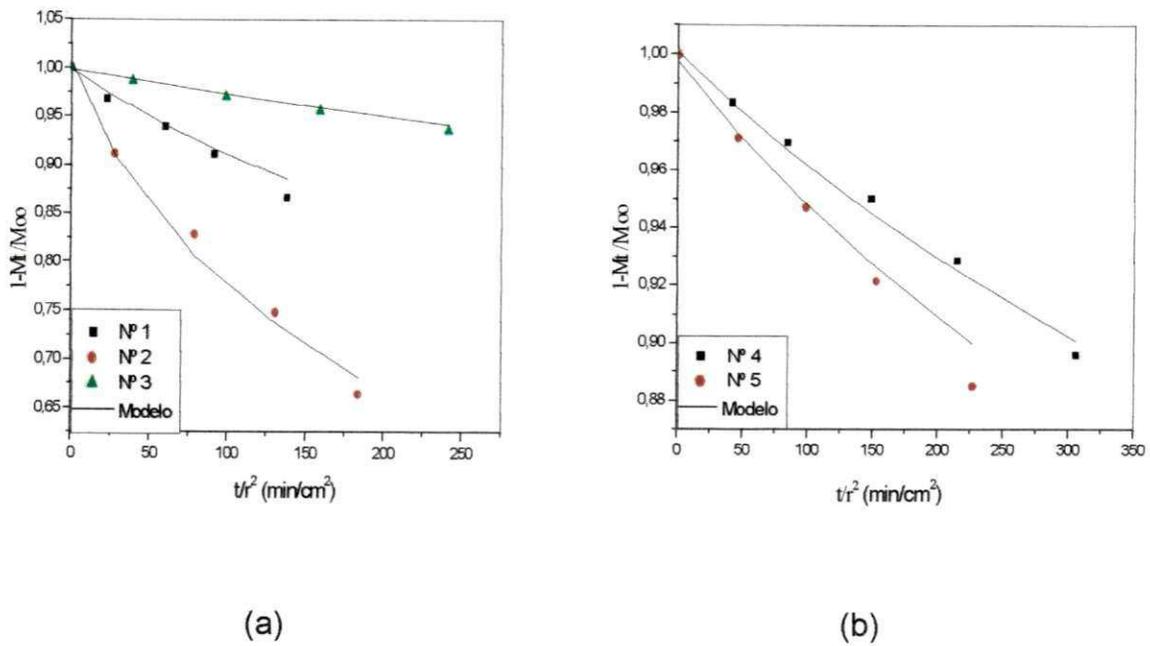


Figura 5.13 - Ajuste do modelo difusional para acerola desidratada osmoticamente com o tempo de processamento de 4 h - Experimentos 1, 2 e 3 (a) e Experimentos 4 e 5 (b)

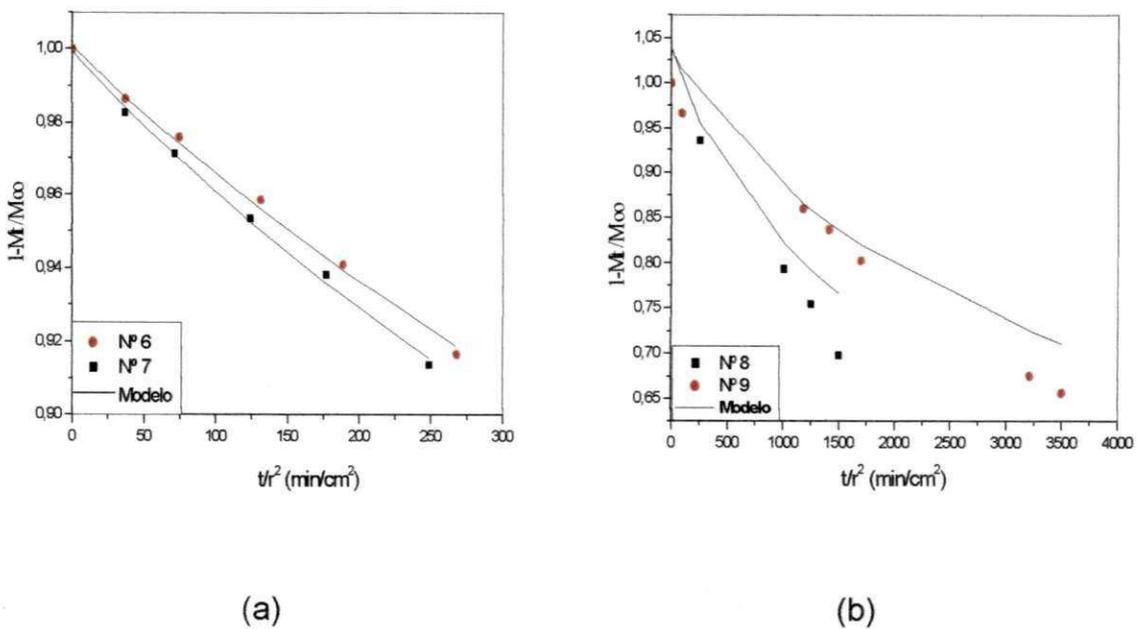


Figura 5.14 - Ajuste do modelo difusional para acerola desidratada osmoticamente com o tempo de processamento – Experimentos de 4 h - 6 e 7 (a) Experimentos de 48 h - 8 e 9 (b)

5.4.3. Análise dos efeitos da concentração e temperatura sobre o coeficiente de difusão na etapa osmótica

Na Tabela 5.10, mostra-se os resultados dos efeitos das variáveis °Brix, temperatura (°C) e a interação aplicada à resposta coeficiente de difusão, obtido pelo modelo de Fick.

Tabela 5.10 - Efeitos das variáveis do coeficiente de difusão efetiva para acerola desidratada osmoticamente

Variável	Efeito x 10 ⁵ (cm ² /min)	Desvio padrão	p-valor
Média	1,9528	0,5755	0,0426
(1) Concentração de sacarose	-4,3450	1,5227	0,0638
(2) Temperatura de imersão	3,1450	1,5227	0,1308
(1) e (2)	-2,8550	1,5227	0,1574

A verificação da significância da regressão foi feita ao nível de 90% de confiança. Com coeficiente de regressão significativo R² da ordem de 0,84 e teste F razão 1.

A equação linear codificada, obtida da regressão dos dados experimentais, utilizando-se do software Statistica® para descrever o coeficiente de difusão da acerola desidratada osmoticamente é:

$$D \times 10^5 \text{ (cm}^2\text{/min)} = 1,9528 - 2,187 C + 1,572 T_i - 1,427 C.T_i \quad (5.2)$$

Onde:

T_i = temperatura de imersão (Codificado)

C = Concentração da solução (Codificado)

Observa-se na Tabela 5.10, que a variável mais significativa foi à concentração da solução de sacarose (°Brix), seguida da temperatura de imersão (°C) e por fim a interação (1) concentração (°Brix) - (2) temperatura de imersão. A concentração da solução (°Brix) apresentou efeito negativo, indicando que um aumento da variável provoca uma diminuição no coeficiente de difusão. A Tabela 5.9 confirma a análise estatística onde se verifica claramente que o aumento da

concentração de 40 para 70 °Brix, para uma mesma temperatura, ocasionou uma diminuição na difusividade efetiva. Esta diminuição se deve provavelmente ao aumento da viscosidade da solução com a concentração. Portanto, soluções mais concentradas dificultam a difusão efetiva da água para o meio externo, apesar do que o aumento da força impulsora para a transferência de massa, compensar este efeito, como se verifica no item 5.1. NSONZI & RAMASWAMY (1998b) verificaram o mesmo comportamento na desidratação osmótica de morangos, onde mostraram que a difusividade da água diminui quando se compara soluções com 70 °Brix.

A temperatura de imersão (2) apresenta efeito positivo, isto quer dizer que, um aumento desta variável provoca aumento no coeficiente de difusão. Na Tabela 5.9, verifica-se que, nas concentrações de 40 e de 70 °Brix, o aumento da temperatura de 30 para 40 °C, proporciona uma maior transferência de massa, aumentando assim a difusividade efetiva. Com efeito, para altas temperaturas, a viscosidade da solução osmótica tende a diminuir aumentando o contato entre a solução e a fruta, facilitando a velocidade de desidratação. Resultados similares foram encontrados por SILVEIRA & ALVES (2002), na desidratação osmótica do tomate, onde verificaram que quando se eleva a temperatura do processo, diminui a viscosidade da solução, reduzindo assim o tempo de desidratação. Nota-se que o aumento da difusão está relacionado com as modificações na membrana celular devido à alta temperatura, que permite a livre passagem das moléculas de água da fruta para a solução desidratante e também com a maior agitação molecular, como prevista pelas teorias moleculares da difusão.

A interação dos efeitos da concentração e da temperatura de imersão apresentam efeito negativo indicando que o aumento conjunto destas variáveis provoca uma diminuição no coeficiente de difusão, devido ao efeito mais forte da concentração. Na Tabela 5.9, verifica-se claramente que o aumento da concentração e da temperatura diminui a difusividade efetiva.

Nas repetições do ponto central, observa-se que os coeficientes de difusão são praticamente coincidentes para os experimentos 6 e 7. Para o experimento 5

o coeficiente de difusão é maior. No entanto estas diferenças podem ser consideradas normais para materiais biológicos.

5.5. Desidratação osmótica através da película da acerola

Para uma melhor avaliação do efeito da película como principal barreira à transferência de massa, são apresentados a seguir resultados obtidos da desidratação osmótica utilizando a célula descrita nos itens 3.5.3 e 3.10.3. A célula foi desenhada com a intenção de reproduzir as condições durante o processamento da fruta inteira. No entanto, espera-se que a agitação torne desprezíveis as resistências tanto na região externa da película da acerola, o lado da solução de sacarose, quanto na região interna da película o lado “suco” de modo a isolar o efeito da resistência à transferência de massa pela película. Na segunda parte são apresentados resultados sem agitação e por tempos prolongados para poder comparar com situações análogas na fruta inteira.

5.5.1. Cinética de desidratação através da película em um sistema agitado durante 7 horas de processamento

No sistema com agitação foram fixadas 7 h de processamento para verificar com mais detalhes o processo, nas temperaturas de 30 a 40 °C e com agitação de 20 rpm. Foi acompanhada a evolução dos sólidos solúveis e sólidos totais do suco e da solução de sacarose, bem como a variação da umidade da película da acerola com o tempo.

5.5.1.1. Efeito da temperatura e concentração inicial da solução

A Figura 5.15 mostra o acompanhamento da concentração da solução de sacarose normalizada com a condição inicial, durante 7 h de desidratação osmótica. Este processo consiste basicamente na remoção da água de uma solução diluída contida dentro de uma membrana, envolvendo essa membrana com uma solução mais concentrada (TRAVAGLINI et al., 1997). No estudo da transferência através da película, nota-se em geral que a concentração da

solução de sacarose diminui em pequena proporção durante o processo de desidratação osmótica. Desta forma, o aumento das variáveis como a temperatura e concentração são pouco significativas na perda de água através da película. AZOUBEL (2002) na desidratação osmótica do caju observou que a temperatura é o parâmetro que exerce maior influência na perda de água. Observa-se no final do processo, um ganho de água mais em pequena proporção, proveniente do suco da acerola para a solução de sacarose, na temperatura de 40 °C e concentração de 40 °Brix, comparando com a concentração de 70 °Brix. Este comportamento pode estar associado à formação de um filme na película da acerola devido à alta concentração impedindo a transferência de massa.

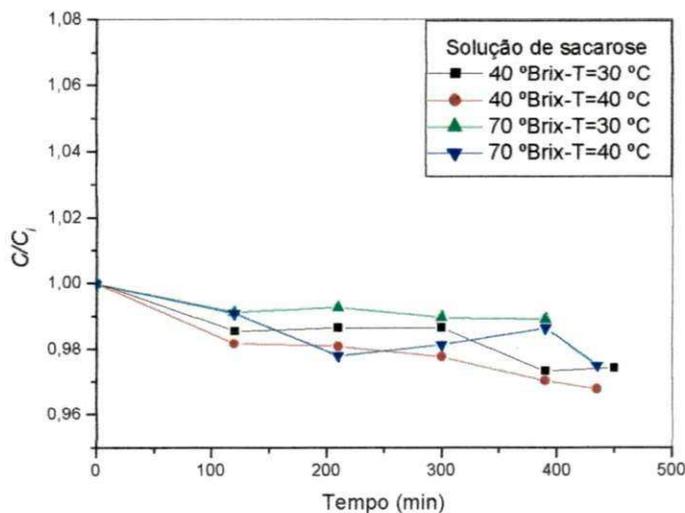


Figura 5.15 – Concentração da solução de sacarose durante o processo da desidratação osmótica através da película da acerola - Efeito da temperatura e concentração

A película da acerola é diferente para cada intervalo de tempo, isto quer dizer que a perda do suco para a solução osmótica depende da característica da película, permitindo desta forma que o fluxo do suco da acerola (solução mais diluída) difunda do interior da amostra para a solução de sacarose (solução mais concentrada), diminuindo desta forma a concentração da solução de sacarose durante o processo, como mostra a Figura 5.15.

5.5.1.2. Efeito da temperatura e concentração na incorporação de sólidos solúveis ao suco da acerola

A Figura 5.16 mostra o acompanhamento da incorporação de sólidos ao suco através da película da acerola durante sete h de desidratação osmótica. Verifica-se que o aumento da temperatura de 30 para 40 °C independente da concentração aumenta a incorporação de sólidos, devido as possíveis modificações causadas à película da acerola, que parece provocar danos à estrutura desta película, resultando em uma maior incorporação de sólidos da ordem de 10 e 13% nas soluções de sacarose de 70 e 40 °Brix, respectivamente para os tempos de processo de 200 e 300 min. Logo após este tempo, tem-se uma redução da incorporação de sólidos, que deve estar relacionado à perda de alguns sólidos naturais da fruta.

BARONI & HUBINGER (1996) observaram que a temperatura de 40 °C provoca danos à estrutura das células, como amolecimento do complexo celulósico presente na parede vegetal, o que aumenta a sua permeabilidade ao soluto. Fato semelhante foi observado por AZOUBEL (2002) na desidratação de fatias do pedúnculo do caju.

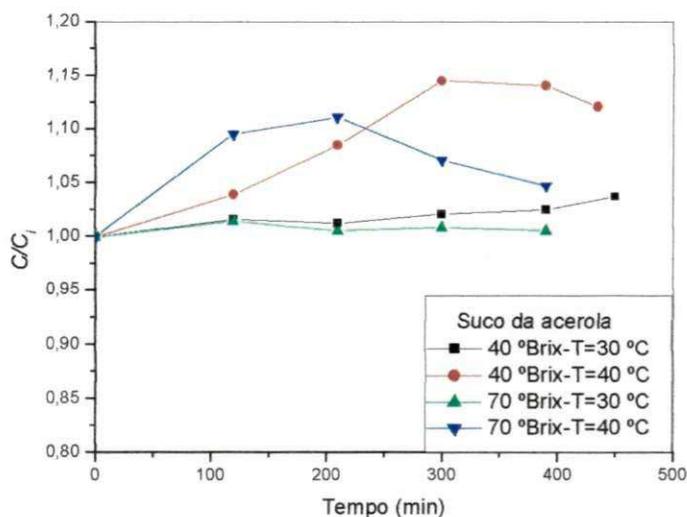


Figura 5.16 – Concentração do suco da acerola durante o processo de desidratação osmótica através da película da acerola - Efeito da temperatura e concentração

5.5.1.3. Efeito da temperatura e concentração nos sólidos totais do suco da acerola

As Figuras 5.17 mostram os sólidos totais do suco da acerola durante o processo de desidratação osmótica. Observa-se o mesmo comportamento dos sólidos solúveis na Figura 5.16, onde o aumento da temperatura, independente da concentração, e o aumento da concentração para uma mesma temperatura, influenciam na incorporação de sólidos totais ao suco. Nota-se que para a temperatura de 40 °C e concentração de 70 °Brix, houve uma queda nos sólidos totais para os tempos de 300 e 400 min, esta queda pode estar relacionada à perda de sólidos naturais da fruta, devido alguma fissura na película da acerola.

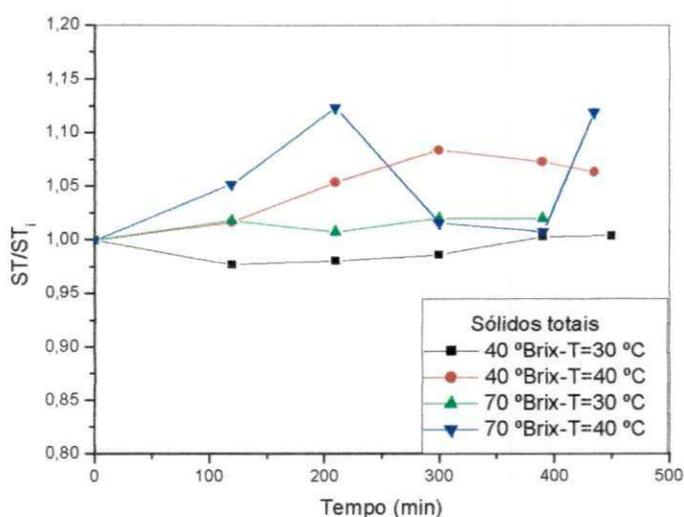


Figura 5.17 – Sólidos totais do suco da acerola durante o processo de desidratação osmótica através da película da acerola - Efeito da temperatura e concentração

5.5.1.4. Efeito da temperatura e concentração na perda do conteúdo de umidade da película da acerola durante o processo de desidratação

Observa-se que o conteúdo de umidade da película da acerola diminui com o tempo, como mostram as Figuras 5.18. Nota-se também que o aumento da temperatura de 30 para 40 °C, para uma mesma concentração, aumenta a velocidade de desidratação osmótica. Este aumento provavelmente influencia a

composição química e as propriedades da película, aumentando desta forma, a taxa de desidratação da mesma, que pode estar relacionado a uma rápida diminuição do conteúdo de umidade da película com o tempo. Segundo RAMASWAMY & NSONZI (1998c) o tempo de desidratação é curto para amostra osmoticamente tratada em alta temperatura.

Na Figura 5.18, observa-se também que o aumento da concentração de 40 para 70 °Brix para a temperatura de 30 °C, diminui o conteúdo de umidade da película da acerola, possibilitando uma maior desidratação. No geral nota-se que a diminuição do conteúdo de umidade é mais notória nas amostras desidratada a temperatura de 40 °C e concentração de 40 °Brix. Os autores KAYMAK-ERTEKIN & SULTANOGLU (2000) verificaram que a velocidade de desidratação osmótica da maçã aumenta com a concentração e temperatura da solução osmótica.

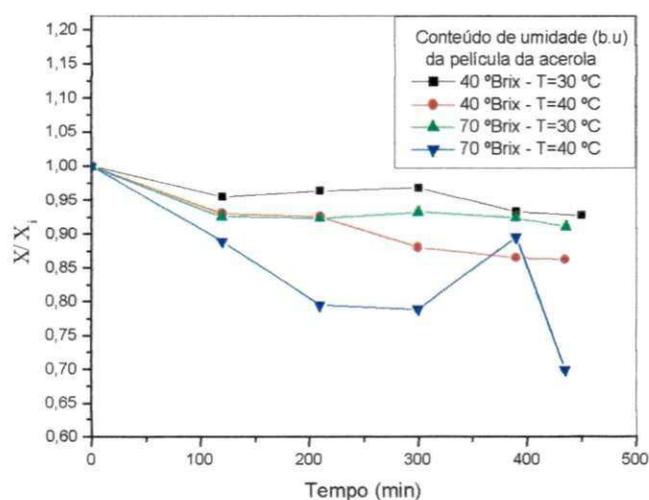


Figura 5.18 – Conteúdo de umidade da película da acerola durante o processo de desidratação osmótica – Efeito da temperatura e concentração

5.5.1.5. Experimentos repetidos nas mesmas condições (ponto central) – desidratação através da película da acerola

As Figuras 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22 mostram-se a reprodutibilidade do ponto central, quanto ao °Brix da solução de sacarose, sólidos solúveis do suco da acerola, sólidos totais e conteúdo de umidade da película da acerola durante o processo de desidratação osmótica. Observam-se pequenas oscilações em cada intervalo de tempo que estão relacionadas às diferenças de espessuras entre as

membranas do tecido vegetal da película da acerola. No entanto, apesar das diferenças existentes entre as películas da acerola em cada intervalo de tempo, apresentam boa reprodutibilidade que é considerada normal para materiais biológicos.

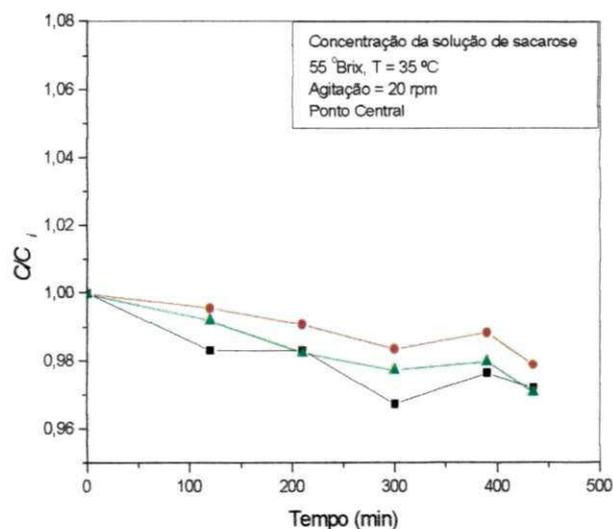


Figura 5.19 – Concentração da solução de sacarose durante o processo da desidratação osmótica através da película da acerola - Efeito da temperatura e concentração nas repetições do ponto central

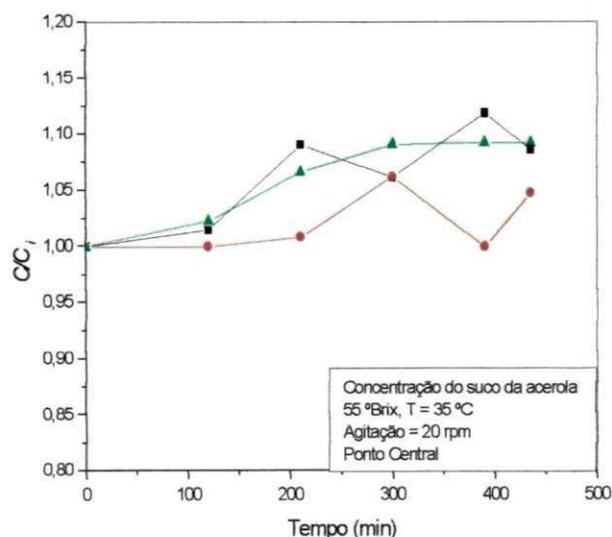


Figura 5.20 – Concentração do suco da acerola durante o processo de desidratação osmótica através da película da acerola - Efeito da temperatura e concentração nas repetições do ponto central

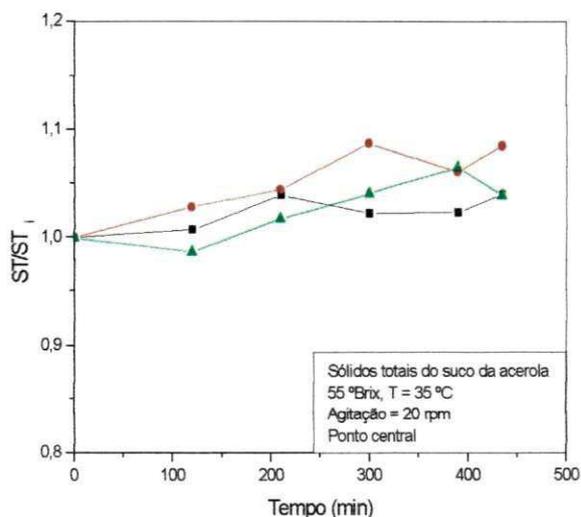


Figura 5.21 – Sólidos totais do suco da acerola durante o processo de desidratação osmótica - Efeito da temperatura e concentração nas repetições do ponto central

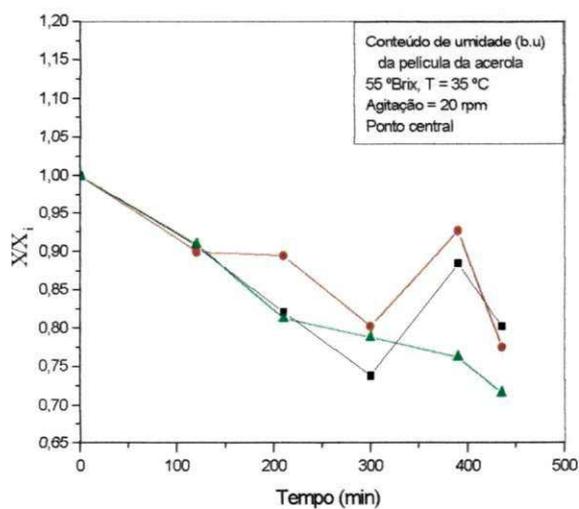


Figura 5.22 – Conteúdo de umidade da película da acerola durante o processo de desidratação osmótica - Efeito da temperatura e concentração

5.5.2. Cinética de desidratação através da película sem agitação durante 24 horas

5.5.2.1. Efeito da temperatura

A Figura 5.23 mostra-se o acompanhamento do °Brix da solução de sacarose durante o processo de desidratação através da película da acerola sem o efeito da agitação. Verifica-se que sem a agitação do sistema, a solução de sacarose apresenta um aumento nos primeiros 200 min. Este aumento pode estar relacionado à perda de açúcares naturais do suco da acerola para a solução osmótica. Entretanto, após um certo intervalo de tempo ao atingir aproximadamente às 20 h o acompanhamento da solução de sacarose praticamente permaneceu constante. Durante o processo verifica-se que a temperatura não apresentou influência no resultado, e a solução osmótica praticamente permaneceu constante, devido à formação de um filme de sacarose na película impedindo a transferência de massa.

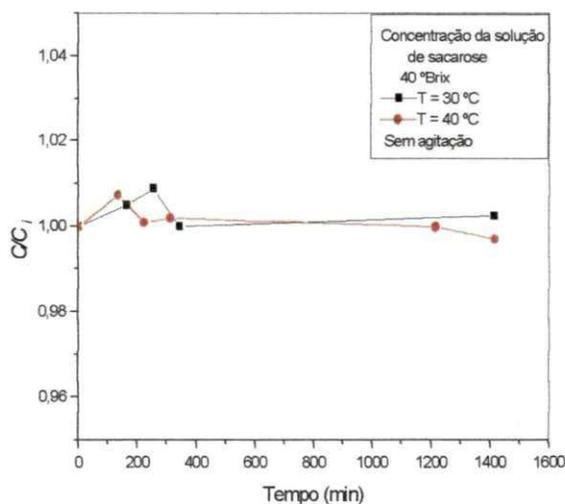


Figura 5.23 – Acompanhamento do °Brix da solução de sacarose, sem o efeito da agitação durante o processo de desidratação osmótica (40 °Brix), através da película da acerola

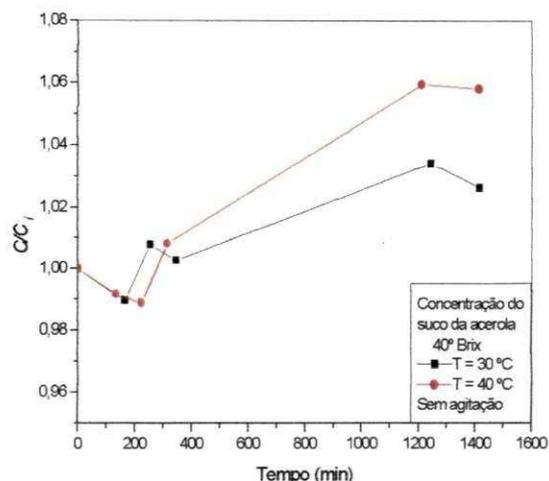


Figura 5.24 – Acompanhamento do °Brix do suco da acerola, sem o efeito da agitação durante o processo de desidratação osmótica (40 °Brix), através da película da acerola sem agitação

Comparando as Figuras 5.23 e 5.24, verifica-se realmente que o suco da acerola perdeu açúcares naturais da própria fruta para a solução de sacarose nos primeiros 200 min e após um certo intervalo de tempo, o suco da acerola ganhou sólidos solúveis. Nota-se que o aumento da temperatura parece exercer uma maior influência no ganho de sólidos solúveis (°Brix) ao suco da acerola.

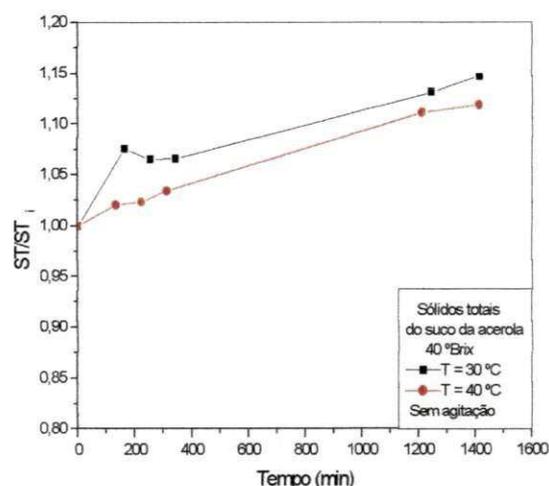


Figura 5.25 – Sólidos totais do suco da acerola, sem o efeito da agitação durante o processo de desidratação osmótica (40 °Brix), através da película da acerola sem agitação

Na Figura 5.25 verifica-se que durante o processo de desidratação osmótica aumenta-se a quantidade de sólidos totais ao suco da acerola. Neste caso, o aumento da temperatura para 40 °C, não influencia no ganho de sólidos totais, obtendo desta forma uma maior quantidade de sólidos totais na temperatura de 30 °C. Por outro lado, comparando as Figuras 5.24 com a Figura 5.25, nota-se o contrário, ou seja, um aumento na quantidade de sólidos solúveis ao suco da acerola para a temperatura de 40 °C, que deveria resultar em uma maior quantidade de sólidos totais.

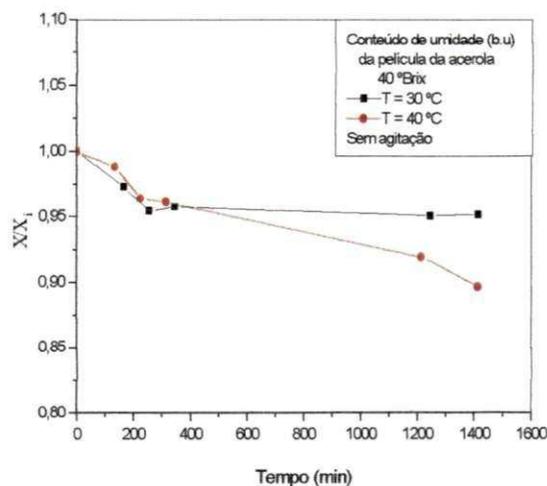


Figura 5.26 – Conteúdo de umidade da película da acerola durante o processo de desidratação osmótica (40 °Brix) sem agitação

O conteúdo de umidade da película da acerola durante o processo de desidratação osmótica diminui com o aumento da temperatura, este fato também foi observado para sistema agitado. Esta influência é mais notória no final do processo, como mostra a Figura 5.26.

Comparando os resultados da desidratação osmótica de um sistema agitado durante 7 h com o sistema não agitado durante 24 h, nota-se que a agitação em pouco tempo favoreceu o processo de transferência de massa.

5.6. Modelagem matemática da película da acerola desidratada osmoticamente

O modelo difusional de Fick considerando a geometria de placa plana infinita com concentrações diferentes em cada face Equação (3.8) foi utilizado para modelar a cinética de desidratação da película da acerola e calcular a difusividade efetiva (D) durante o processo de desidratação osmótica, mediante o método de tentativas foi encontrado que quatro termos da série eram suficientes para atingir a convergência.

As Figuras 5.27 a 5.31 mostram o ajuste do modelo difusional para a desidratação osmótica através da película da acerola. Na Tabela 5.11 são apresentados os valores encontrados para o coeficiente de difusão, o parâmetro ajustável A e o coeficiente de correlação. Apesar de alguma oscilação nos pontos experimentais em cada intervalo de tempo, devido às diferenças em cada película da acerola, nota-se que o modelo apresentou em geral um bom ajuste. Observa-se ainda na Tabela 5.11 que o coeficiente de correlação foi superior a 0,92 salvo no experimento 2 onde foi de 0,85. A suposição de que, com o passar do tempo a película da acerola atinge o regime estacionário, a Equação (3.8) parece ser aceitável ao considerar que o °Brix do suco e da solução permaneceram praticamente constantes com o tempo.

Com relação à condição de equilíbrio na superfície espera-se que a agitação tenha sido suficiente para a minimização do filme externo. Confirmação desta hipótese se encontra através dos valores do parâmetro A , bem próximo do valor teórico de 0,81. Nas tentativas com diversos números de termos da série na Equação (3.8) verificou-se que o valor de A aproxima-se de $8/\pi^2$ na medida que se aumentava o número de termos.

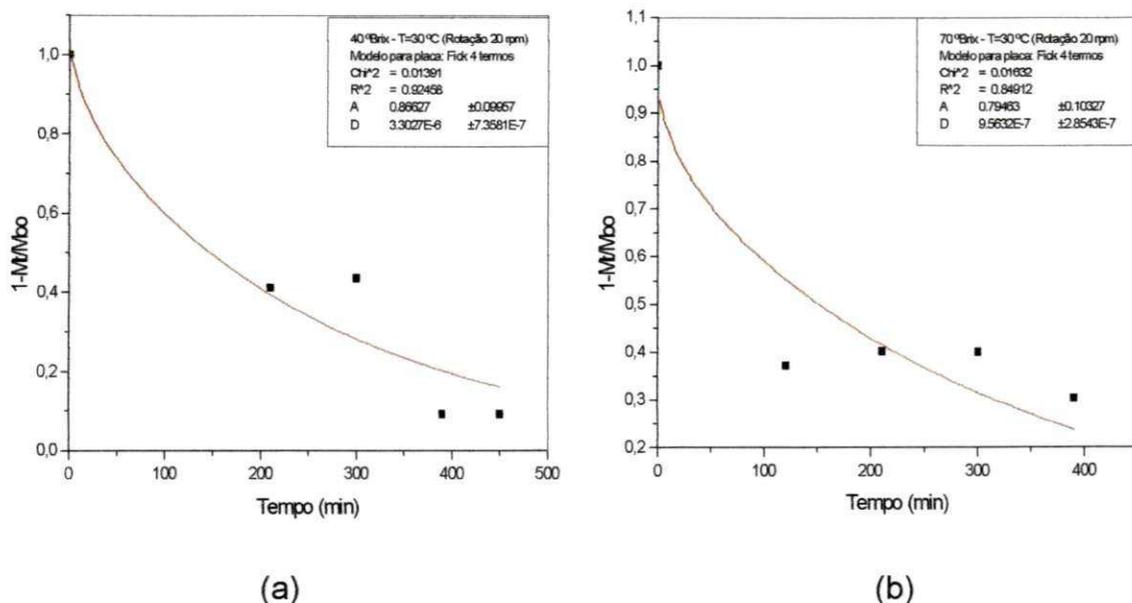


Figura 5.27 – Comparação entre os pontos experimentais e o modelo difusional para a película da acerola desidratada osmoticamente na temperatura de 30 °C: (a) 40 °Brix e (b) 70 °Brix

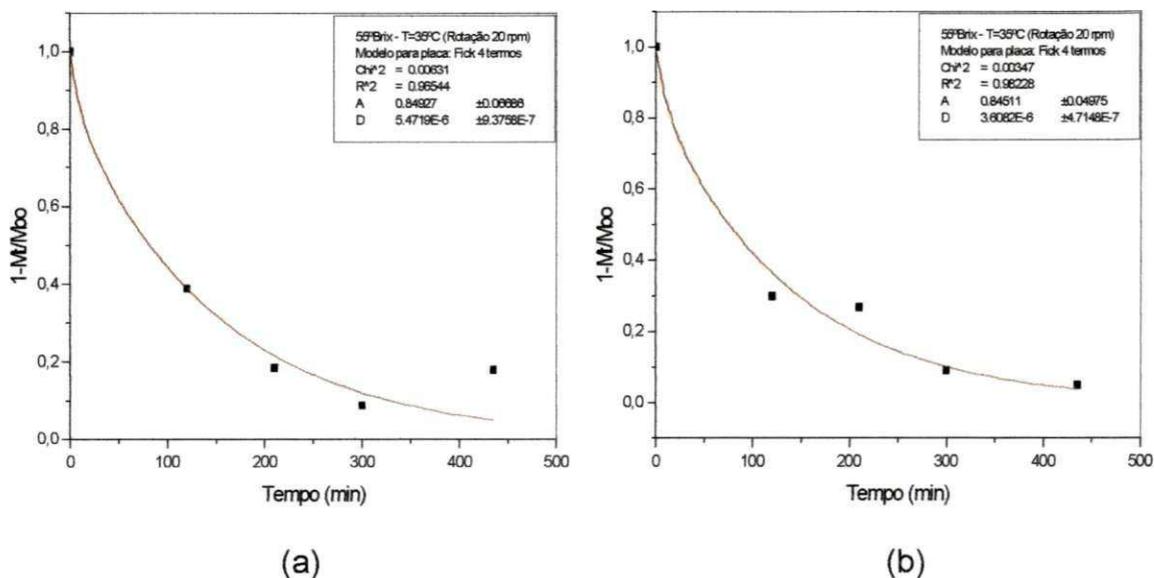
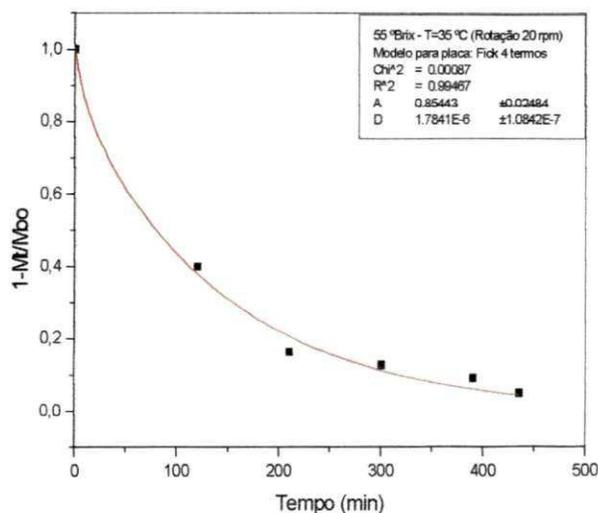
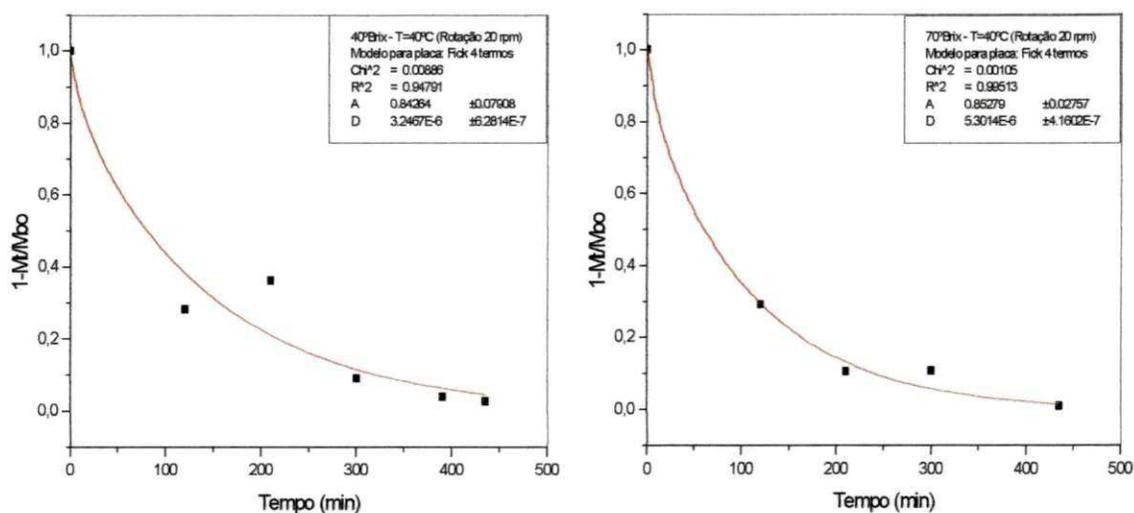


Figura 5.28 – Repetições do ponto central, comparação entre os pontos experimentais e o modelo difusional para a película da acerola desidratada osmoticamente na temperatura de 35 °C: (a), (b) 55 °Brix



(c)

Figura 5.29 – Repetição do ponto central, comparação entre os pontos experimentais e o modelo difusional para a película da acerola desidratada osmoticamente na temperatura de 35 °C: (c) 55 °Brix



(a)

(b)

Figura 5.30 – Comparação entre os pontos experimentais e o modelo difusional para a película da acerola desidratada osmoticamente na temperatura de 40 °C: (a) 40 °Brix e (b) 70 °Brix

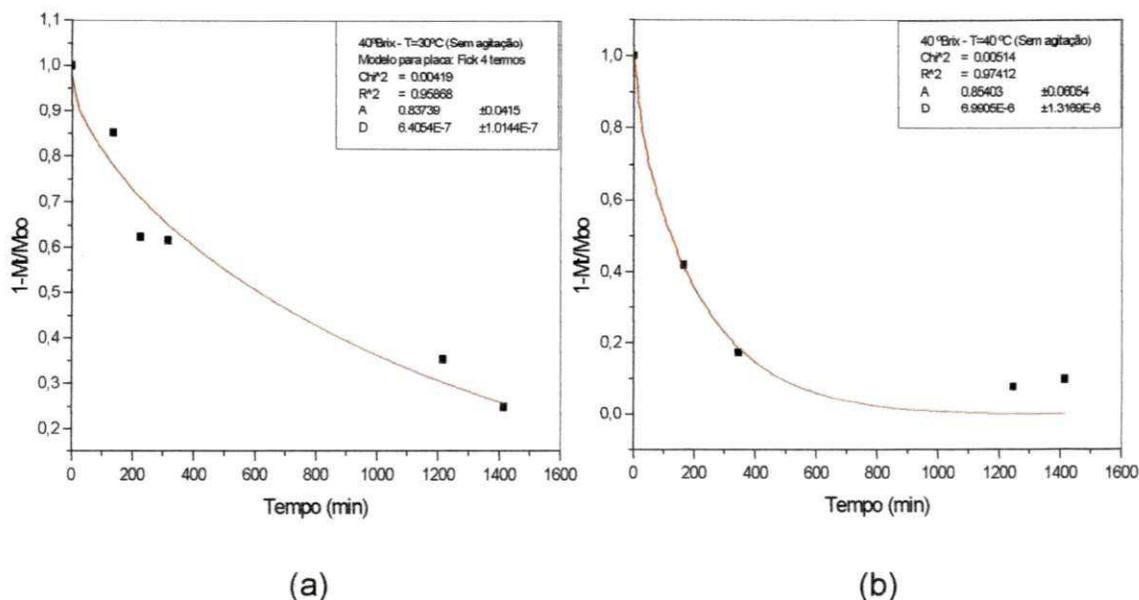


Figura 5.31- Comparação entre os pontos experimentais e o modelo difusional para a película da acerola desidratada osmoticamente durante 24 h em uma concentração de 40 °Brix, na temperatura de (a) 30 °C e (b) 40 °C

Tabela 5.11 – Dados da espessura (L) e valores do parâmetro (A) e o coeficiente de difusão (D) obtidos através do ajuste do modelo difusional para a geometria de placa plana aplicando quatro termos da série para película da acerola desidratada osmoticamente

Nº	Solução osmótica (°Brix)	T (°C)	t (h)	Agitação (rpm)	A	L (cm)	(D± erro) x 10 ⁵ (cm ² /min)	R ²
1	40	30	7	20	0,866	0,046	0,330 ± 0,073	0,924
2	70	30	7	20	0,794	0,027	0,095 ± 0,028	0,850
3	55	35	7	20	0,849	0,045	0,547 ± 0,093	0,965
4	55	35	7	20	0,845	0,035	0,360 ± 0,047	0,982
5	55	35	7	20	0,854	0,025	0,178 ± 0,010	0,994
6	40	40	7	20	0,842	0,034	0,324 ± 0,062	0,947
7	70	40	7	20	0,852	0,038	0,530 ± 0,041	0,947
8	40	30	24	—	0,837	0,044	0,064 ± 0,010	0,995
9	40	40	24	—	0,854	0,063	0,699 ± 0,131	0,958

Analisando os resultados da Tabela 5.11, pode-se verificar que o valor médio obtido para a constante A foi de 0,84, apresentando uma diferença entre o

valor teórico e o experimental em torno de 3,7%. Este desvio é aceitável, considerando-se as aproximações do modelo.

Percebe-se através da Tabela 5.11 que o aumento da temperatura de 30 para 40 °C, à 70 °Brix de solução, favoreceu a transferência de massa, aumentando assim, o coeficiente de difusão. Este resultado já era previsto, considerando o que já foi discutido anteriormente, pois o aumento da temperatura ocasiona uma maior permeabilização da casca da acerola e uma diminuição da viscosidade da solução, fatores estes que contribuem para o aumento da difusão, além do efeito bem conhecido sobre a difusão molecular devido à maior agitação térmica. Contudo, ao analisar o efeito da temperatura sobre o coeficiente de difusão à 40 °Brix, nota-se que houve uma inversão em relação ao esperado. Isto pode ser explicado, provavelmente, pela interferência da variável não controlada (espessura da película), confirmado através do ponto central onde, apesar da concentração e temperatura serem iguais, a diferença no coeficiente de difusão efetiva deve ser atribuída à espessura da película diferentes.

Uma discrepância nos resultados também foi verificada com respeito ao efeito da concentração da solução. Observa-se que o aumento de 40 para 70° Brix, a 40 °C, ocasionou um aumento do coeficiente de difusão, enquanto a uma temperatura de 30 °C houve uma diminuição. Isto também pode ser atribuído à película da acerola, assim como às simplificações do modelo. Apesar das simplificações impostas ao modelo pode-se considerar que houve um bom ajuste, uma vez que o coeficiente de correlação médio foi de 0,95.

As diferenças observadas com relação às espessuras podem estar relacionadas com a constituição da casca, conforme descrito no item 3.10.3 e ilustra na Figura 3.12. A parte interna da casca com polpa aderida ao filme é parcialmente eliminada com a agitação do sistema. Em geral, quanto mais espessa a película da acerola maior será o coeficiente de difusão aparente, constituído pela soma das resistências da parte cerosa da fruta mais a polpa aderida ao filme externo, mais porosa. Quando a película da acerola é mais fina, corresponde praticamente a um filme impermeável com coeficiente de difusão efetivo menor.

5.7. Análise dos efeitos da concentração, temperatura e espessura sobre o coeficiente de difusão através da película da acerola

A influência não esperada da espessura da película, que se trata de uma variável não controlada, levou a uma reformulação da matriz experimental, conforme mostrado no item 3.4.3, Tabela 3.4. O método da superfície de resposta foi aplicado à nova matriz experimental.

A Tabela 5.12 apresenta o resultado dos efeitos das variáveis temperatura, concentração de sacarose e espessura aplicada ao coeficiente de difusão de água através da película da acerola, como resposta.

Tabela 5.12 - Efeitos das variáveis sobre o coeficiente de difusão efetiva, obtidos através da película da acerola

Variável	Efeito x 10 ⁵ cm ² /min	Desvio padrão	p-valor
Média*	0,3234	0,0182	0,0358
(1) Temperatura	- 0,0037	0,0408	0,9424
(2) Concentração de sacarose	0,2037	0,0408	0,1259
(3) Espessura	0,2313	0,0408	0,1112

Observa-se na Tabela 5.12 que a variável estatisticamente mais significativa, que apresentou maior efeito sobre a resposta em estudo foi a espessura da película da acerola, seguida da concentração da solução de sacarose e depois a temperatura. O aumento do nível da espessura de (-1) para (+1) provoca um acréscimo do coeficiente de difusão de $0,231 \times 10^{-5}$ cm²/min. A explicação provável, é que quando a película da acerola foi retirada, ficou retida na mesma parte interna da fruta (a polpa). No entanto, quando a espessura é mais fina, tem-se uma pequena retenção da quantidade da parte interna da fruta, resultando apenas em um filme que parece ser mais resistente à transferência de massa, já que contém a parte cerosa da casca, ver a Figura 3.12. Como o filme externo exerce uma barreira restringindo a passagem de água através dela, as amostras com maior espessura apresentam um coeficiente de difusão aparente

maior devido à contribuição da parte não cerosa, mais permeável à transferência de massa.

Quanto à influência positiva da concentração de sacarose indicaria que o efeito de solubilização das ceras e conseguinte permeabilização do filme se sobrepõe neste caso ao efeito do aumento de viscosidade da solução sobre a difusão molecular.

A verificação da significância da regressão foi feita com coeficiente de confiança de 95%, obtendo um coeficiente de correlação de R^2 de 0,98.

A equação linear codificada, obtida da regressão dos dados experimentais, utilizando-se do software Statistica[®] para descrever o coeficiente de difusão da película da acerola desidratada osmoticamente é:

$$D \times 10^5 \text{ (cm}^2\text{/min)} = 0,3234 - 0,0037T + 0,2037C + 0,2313L \quad (5.3)$$

Onde:

C = concentração da solução (Codificado)

T = temperatura (Codificado)

L = espessura (Codificado)

5.8. Comparação do coeficiente de difusão da fruta com o da película da acerola

Na Tabela 5.13 são apresentados os coeficientes de difusão efetivo da acerola desidratada osmoticamente com o efeito da agitação de 780 rpm durante 4 h, com o coeficiente de difusão efetivo através da película da acerola (solução de sacarose/película da acerola/suco da acerola) em um sistema com agitação de 20 rpm durante a desidratação de 7 h. Verifica-se que o coeficiente de difusão através da película da acerola, apesar das simplificações impostas ao modelo, é menor em relação ao coeficiente de difusão da acerola, isto pode ser justificado devido à resistência que a película da acerola oferece a transferência de massa. KEEY (1992) observou que as cascas de alguns alimentos, são relativamente

resistente, impermeáveis e controlam o movimento do conteúdo de umidade para o meio externo durante o processo de secagem.

Tabela 5.13 – Comparação do coeficiente de difusão efetivo (D) da acerola desidratada osmoticamente com o da película da acerola

Película da acerola (7 h)						Acerola desidratada osmoticamente (4 h)		
N ^o	(°Brix)	T (°C)	$A=8/\pi^2$	(D± erro) x 10 ⁵ (Película) (cm ² /min)	R ²	$A=6/\pi^2$	(D± erro) x 10 ⁵ (Acerola) (cm ² /min)	R ²
1	40	30	0,866	0,330 ± 0,073	0,924	0,649	2,0 ± 0,2	0,989
2	70	30	0,794	0,095 ± 0,028	0,850	0,649	0,48±0,01	0,998
3	55	35	0,849	0,547 ± 0,093	0,965	0,648	1,0±0,06	0,995
4	55	35	0,845	0,360 ± 0,047	0,982	0,650	0,67±0,03	0,995
5	55	35	0,854	0,178 ± 0,010	0,994	0,649	0,75±0,02	0,997
6	40	40	0,842	0,324 ± 0,062	0,947	0,654	8,0 ± 0,8	0,986
7	70	40	0,852	0,530 ± 0,041	0,947	0,651	0,77±0,04	0,991
8*	40	30	0,837	0,064 ± 0,010	0,995	0,674	0,66±0,09	0,929

T (°C) é a temperatura de imersão e a temperatura da estufa

* Tempo 48 h T=27 °C - 780 rpm (fruta "in natura")

* Tempo 24 h T=30 °C – Sem agitação (película)

O experimento 8 da Tabela 5.13 mostra o coeficiente de difusão da acerola para o tempo de imersão de 48 h na temperatura média ambiente de 27 °C e com uma agitação não contínua de 780rpm, comparando com o coeficiente de difusão na película da acerola para o tempo de exposição de 24 h sem agitação. No caso da célula para medida de difusão através da película só foi possível utilizar um tempo de até 24 h porque a ação do peso do suco provoca o desprendimento da película em períodos mais prolongados. De qualquer forma, foi considerado interessante comparar estes valores para confirmar que o coeficiente de difusão na película é menor também para tempos prolongados, sendo a principal barreira para a transferência de massa.

6. Secagem convectiva

Os dados experimentais da cinética de secagem convectiva foram obtidos da acerola “in natura” e desidratada osmoticamente com concentrações diferentes. Os parâmetros utilizados para os tratamentos foram de acordo com a Tabela 3.1 do Capítulo 3, seguido da secagem convectiva na temperatura 60 °C e velocidade do ar de 1,3 m/s e também de acordo com o planejamento experimental apresentado Tabela 3.2, seguidos da secagem convectiva na temperatura 60, 65 e 70 °C e velocidade do ar de 1,3 m/s. A velocidade foi baseada em resultados de (BRASILEIRO, 1999; ALSINA et al. (1997) nos estudos da secagem de acerola “in natura”. De acordo com esses autores, nessa velocidade o controle é difusional interno, com resistência externa desprezível.

6.1. Efeito dos tratamentos osmóticos na secagem convectiva

6.1.1 - Desidratação osmótica de 24, 48 e 72 horas (sem agitação)

Na Figura 6.1 observa-se que para tempo de imersão de 24 h, os resultados não são muito sensíveis à variação do °Brix. Por esta razão as curvas de desidratação osmótica seguida da secagem convectiva apresentam o mesmo comportamento.

Nas Figuras 6.1 e 6.2, pode-se confirmar o afirmado anteriormente no item 5.1, com relação à eficácia do tratamento osmótico no tempo de imersão de 24, 48 e 72 h para redução do conteúdo de umidade. Com o aumento do tempo de imersão, tanto para uma solução de 40 °Brix, quanto 70 °Brix, há uma diminuição do conteúdo de umidade inicial e conseqüentemente, uma redução do tempo da secagem convectiva. Segundo ARGANDONÁ (1999) a desidratação osmótica reduz o tempo da secagem convectiva e o consumo de energia.

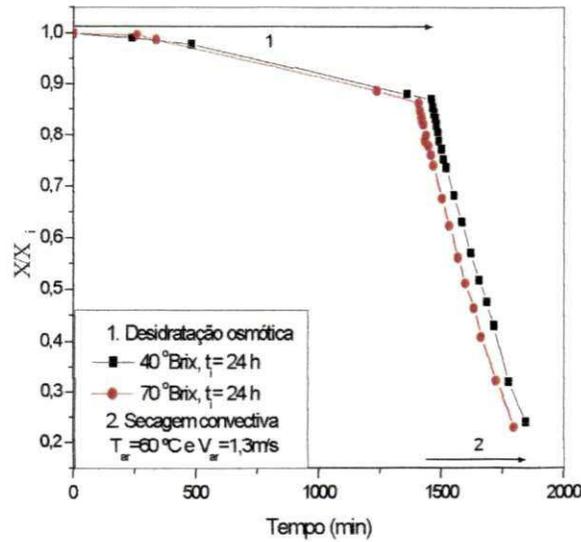
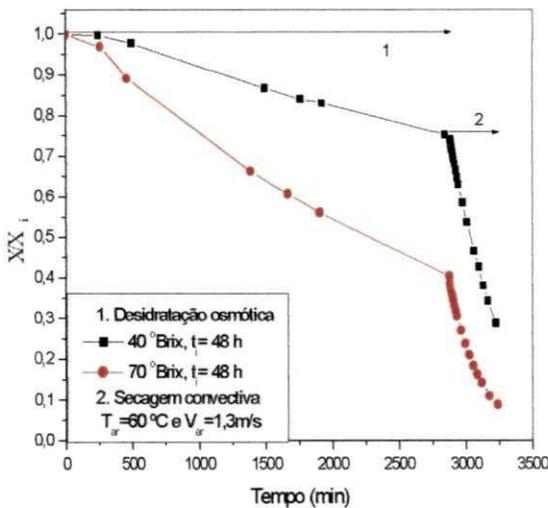
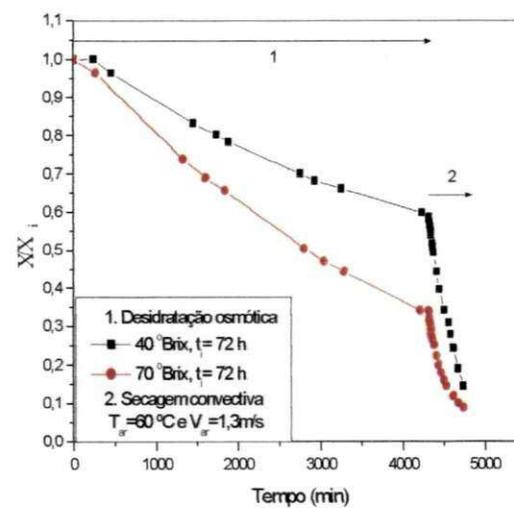


Figura 6.1 - Efeito da concentração de sacarose na redução da umidade da acerola para o tempo de imersão de 24 h. (1) - Desidratação osmótica (2) - Secagem convectiva



(a)



(b)

Figura 6.2 - Efeito da concentração de sacarose na redução da umidade da acerola para o tempo de imersão de (a) 48 h e (b) 72 h. (1) - Desidratação osmótica (2) - Secagem convectiva

Para observar a influência do tratamento osmótico com sacarose na redução do tempo de secagem convectiva, foi escolhida uma umidade final

estabelecida em 0,29 (base seca) e comparado com a amostra "in natura". Na Tabela 6.1, observa-se que, o tempo de secagem convectiva final diminui com o aumento do tempo de imersão e da concentração da solução osmótica. O tratamento com 40 °Brix e tempo de imersão de 72 h reduz, em cerca de 42,7%, o tempo de secagem convectiva, para obter uma umidade normalizada de 0,29 quando comparado ao obtido com amostra sem tratamento. Nota-se que, ao aumentar o °Brix para 70 no mesmo tempo de imersão, há uma redução ainda mais significativa, cerca de 91,8%, do tempo de secagem convectiva comparando ao sem tratamento, para obter a mesma umidade. Logo, os melhores resultados foram para tratamentos com Brix e tempos de imersão maiores, uma vez que houve uma brusca redução de tempo requerido no processo convectivo, iniciando a secagem convectiva com uma redução de 65% da umidade inicial, atingindo a umidade normalizada de 0,29 em torno de 34 min. Esse fato é muito importante para melhoria do produto final e diminuição de custos energéticos. Estes resultados concordam com os de WELTI et al. (1995) para fatias de mangas. Segundo esses autores, o tempo necessário para reduzir a umidade final das mangas osmoticamente desidratadas foi consideravelmente reduzido quando comparado com o processo sem tratamento.

Tabela 6.1 – Tempo da secagem convectiva para atingir uma umidade normalizada especificada de 0,29 (base seca), nas condições de $T_{ar} = 60\text{ °C}$ e $V_{ar} = 1,3\text{ ms/s}$

°Brix	Tempo de imersão (h)	Tempo da secagem (Umidade de 0,29) (min)	Redução do tempo da secagem em relação à amostra "in natura" (min)
"in natura"		419,50	-----
40	24	362,85	56,65
40	48	345,24	74,26
40	72	240,43	179,07
70	24	320,03	99,47
70	48	73,61	345,89
70	72	34,37	385,13

*Desidratação osmótica na temperatura ambiente média

6.1.2. Desidratação osmótica de 4 horas com efeito da agitação

Na Figura 6.3 são apresentadas curvas típicas de cinética de desidratação osmótica (1) e secagem convectiva (2), nas quais se observa de uma maneira geral, que a velocidade de agitação gera uma redução do tempo final da secagem. Observa-se que as amostras osmoticamente desidratadas com solução de 40° Brix com agitação de 150, 420 e 780 rpm durante 4 h de imersão, apresentaram melhor tempo de secagem convectiva quando comparada com as amostras “in natura” e osmoticamente desidratadas sem agitação. No entanto, observa-se que as cinéticas de secagem convectiva das amostras osmoticamente desidratadas com agitação apresentaram o mesmo comportamento, tendo em vista que a redução do tempo de secagem não é tão significativa com o aumento da velocidade de agitação de 150 a 780 rpm. Este fato também foi observado por SILVEIRA & ALVES (2002) na desidratação osmótica de tomate, onde verificaram que a variação da velocidade de agitação não exerce influência significativa na perda de água. A Tabela 6.2 mostra estes dados de forma mais explícita e a Figura 6.3 mostra que o tratamento osmótico sem agitação durante 4 h aumenta o tempo de secagem em relação à secagem sem tratamento osmótico, isso ocorre provavelmente devido à ação bloqueadora da solução de sacarose sobre a película da acerola dificultando a transferência de massa durante a secagem convectiva. Este fato também foi observado por SILVA (1998).

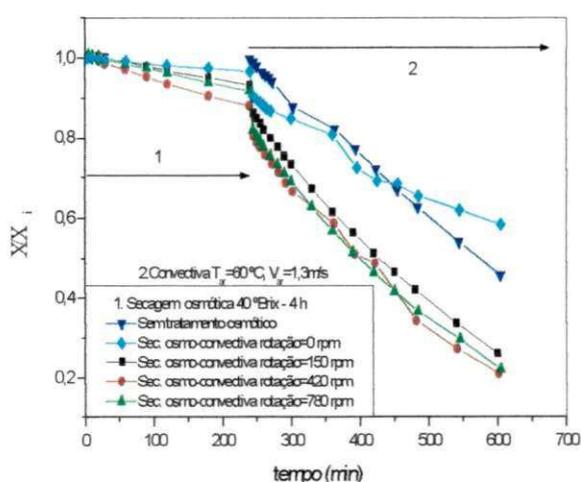


Figura 6.3 – Efeito da velocidade de agitação durante a desidratação osmótica da acerola sobre a evolução do conteúdo de umidade com tempo. (1) - Desidratação osmótica (2) - Secagem convectiva

Na Tabela 6.2, observa-se à influência significativa do tratamento osmótico em solução de sacarose de 40 °Brix com agitação, na redução do tempo de secagem convectiva para um conteúdo de umidade final de 0,59 da X_i quando comparada aos casos sem tratamento osmótico, e com tratamento sem agitação. O tratamento osmótico sem agitação aumenta cerca de 25% do tempo de secagem convectiva para obter 59% da umidade inicial quando comparada à amostra sem tratamento. Nota-se que ao aumentar a velocidade de rotação de 150 para 420 e para 780 rpm houve uma redução do tempo de secagem convectiva da ordem de 63, 67 e 70% da umidade inicial em relação às amostras desidratadas osmoticamente sem agitação, respectivamente.

Tabela 6.2 – Influência da velocidade de agitação na solução de sacarose (40 °Brix) na redução do tempo de secagem convectiva para um conteúdo de umidade normalizada especificada de 0,59 (base seca)

Rotação (rpm)	Tempo de secagem convectiva (min) $X/X_i = 59\%$
Sem Tratamento	272
Rotação = 0	366
Rotação = 150	135
Rotação = 420	121
Rotação = 780	111

Pela Figura 6.4, na etapa 2 (secagem convectiva), pode-se confirmar à eficácia da desidratação osmótica com agitação na redução do tempo de secagem convectiva. Observa-se que a taxa máxima de secagem é obtida aproximadamente aos 245 min, onde inicia a secagem convectiva. Entretanto, este efeito é mais notório para as amostras osmoticamente desidratadas com agitação. Após o período inicial de queda brusca da taxa de secagem, que poderia estar associado à presença de água nas “rugas” formadas nas amostras osmoticamente desidratadas, que ocorreu em torno dos 300 min, inicia-se um período de taxa decrescente mais suave, onde provavelmente, o controle de transferência de água é dado pela difusão através da casca, que constitui a barreira principal. Em alguns dos casos estudados a taxa de secagem torna a

aumentar ligeiramente, o que poderia indicar que à frente de secagem deslocou-se para o interior da fruta.

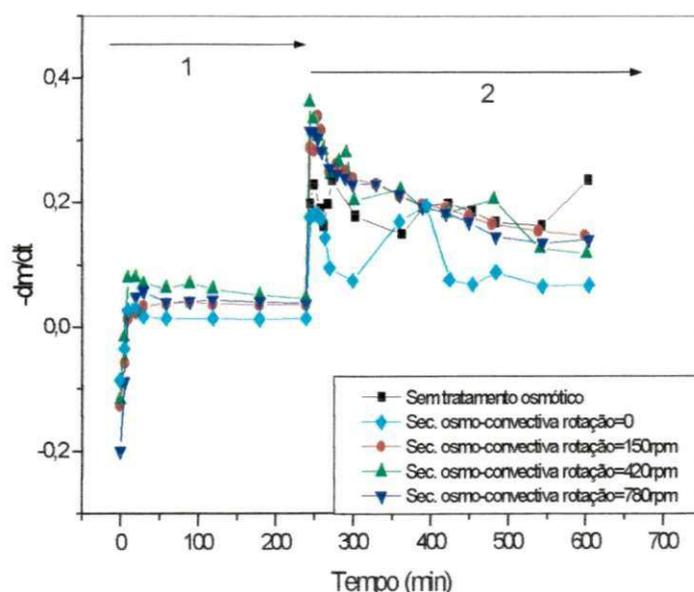


Figura 6.4 – Derivada das curvas de secagem osmo-convectiva da acerola em função do tempo. (1) - Desidratação osmótica (2) - Secagem convectiva

6.1.3. Efeito da temperatura na desidratação osmótica de 30 a 90 minutos sobre a taxa de secagem em função da temperatura de secagem

Nas Figuras 6.5 (a) e (b) observa-se que nos 30 min iniciais da secagem convectiva, as variáveis operacionais osmóticas não influenciam na cinética de secagem, pois as curvas encontram-se praticamente justapostas. A partir da primeira hora de secagem convectiva já é possível definir qual o melhor tratamento para tempo de imersão de 30 e 90 min. No entanto, as amostras que apresentaram maior redução do tempo de secagem convectiva foram às submetidas à temperatura de imersão de 40 °C e temperatura de secagem de 70 °C, tanto para tempo de imersão de 30 e 90 min, pois essas amostras atingiram umidades mais baixas em menor tempo de secagem do que os demais tratamentos.

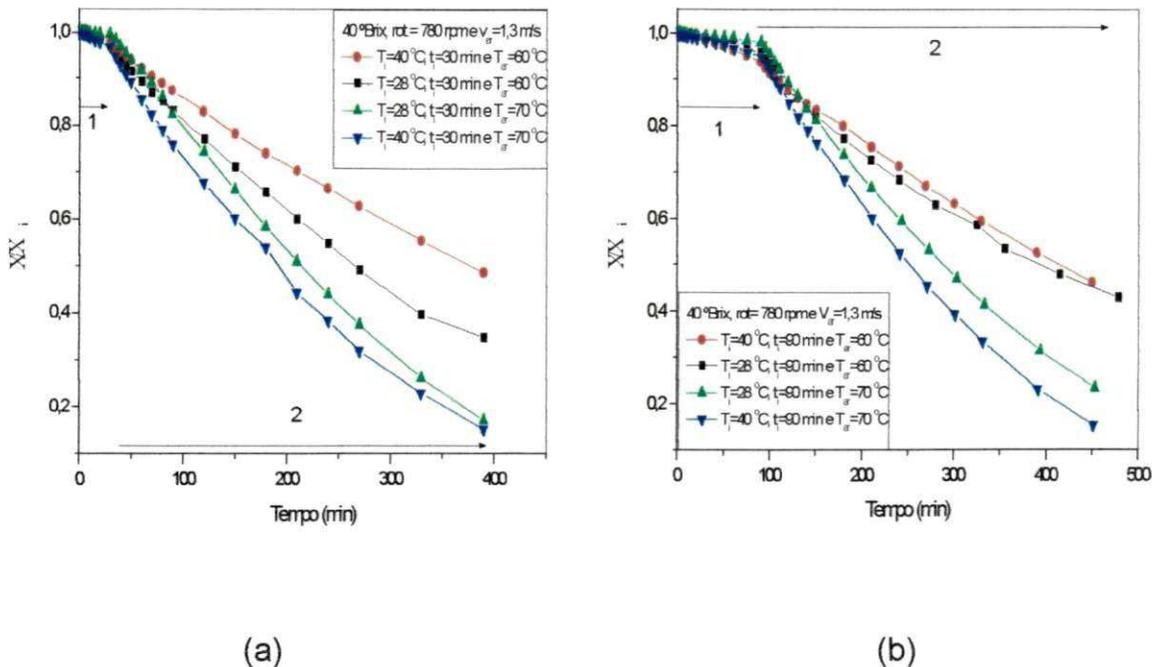


Figura 6.5 - Secagem osmo-convectiva. Efeito das temperaturas nos processos osmóticos na cinética de secagem convectiva, durante a imersão de (a) 30 min e (b) 90 min (1) - Desidratação osmótica (2) - Secagem convectiva

Na Tabela 6.3 são apresentados os parâmetros das amostras submetidas à secagem osmo-convectiva com as amostras “in natura”. Nota-se que os tratamentos osmóticos seguidos da secagem convectiva reduziram o tempo de secagem. Observa-se de modo geral que o efeito do aumento da temperatura de imersão não é tão notório para as amostras submetidas à secagem convectiva à 60 °C e sim para as amostras à 70 °C. No entanto, para atingir 50% da umidade inicial com o aumento da temperatura de imersão de 28 para 40 °C, na temperatura de secagem de 60 °C, houve um aumento do tempo de secagem de 109 min para o tempo de imersão de 30 min e de 34 min para o tempo de imersão de 90 min. Nas amostras secas, a temperatura de ar de secagem de 70 °C, o aumento da temperatura de imersão de 28 para 40 °C, reduziu o tempo de secagem convectiva de aproximadamente 21 min para o tempo de imersão de 30 min e 38 min para o tempo de imersão de 90 min. É interessante ressaltar que as acerolas osmoticamente desidratadas em solução osmótica na temperatura de imersão 28 °C apresentaram uma conservação melhor em relação à cor quando comparadas às amostras submetidas à temperatura de 40 °C.

Tabela 6.3 – Influência das temperaturas de imersão e de secagem, na redução do tempo da secagem convectiva para uma umidade considerada de 0,50 com tempo de imersão de 30 e 90 min, comparada com o sem tratamento

Temperatura de Imersão (T_i) (°C)	Temperatura de secagem (T_{ar}) (°C)	Tempo de secagem convectiva para atingir X/X_i 0,50 (min)	
		$t_i = 30$ min	$t_i = 90$ min
Sem tratamento	60	328	
40	60	347	317
28	60	237	296
*Sem tratamento	70	198	
28	70	185	197
40	70	164	160

*SILVA (1998) – $V_{ar}=1,5$ m/s

Observa-se ainda na Tabela 6.3, que as amostras submetidas a tempo de imersão de 90 min apresentam o mesmo comportamento daquelas submetidas a tempo de imersão de 30 min, ou seja, o efeito do aumento da temperatura de imersão de 28 para 40 °C, só é notório para as amostras submetidas a maiores temperaturas de ar de secagem. Dessa forma, de maneira geral, o aumento do tempo de imersão de 30 para 90 min não influencia significativamente na redução do tempo de secagem convectiva, com exceção do tratamento à temperatura de imersão de 40 °C e temperatura de secagem de 60 °C, que obteve menor tempo de secagem convectiva. Observa-se também que o efeito dos tratamentos reduz o tempo de secagem convectiva comparada com as amostras "in natura", com exceção dos experimentos realizados na temperatura e tempo de imersão 40 °C e 30 min e temperatura do ar de secagem de 60 °C e na temperatura e tempo de imersão 28 °C e 90 min e temperatura do ar de secagem de 70 °C.

Conforme esperado, observa-se que a temperatura influenciou a cinética de secagem, diminuindo o tempo de secagem convectiva. Estes resultados estão de acordo com os diversos autores: BRASILEIRO (1999) trabalhando com acerola "in natura", observou que o aumento da temperatura do ar influenciou a cinética de secagem, diminuindo o tempo de secagem convectiva. ALSINA et al. (1999) trabalhando com a secagem de goiaba em fatias e observaram que quanto mais elevada à temperatura, mais rapidamente se processa a secagem. EL-AOUAR et

al. (2003) trabalharam com cubos de mamão papaya desidratado osmoticamente submetidos à secagem convectiva e observaram que o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem ocasionou uma redução do tempo de secagem. SIMAL et al. (1997) estudando cubos de maçã osmoticamente desidratada, observaram que a temperatura do ar de secagem apresentou uma importante influência na velocidade de secagem.

6.1.3.1. Experimentos repetidos nas mesmas condições (ponto central) - secagem osmo-convectiva

Um dos objetivos das repetições do ponto central são utilizadas para verificar a reprodutibilidade do método experimental. Na Figura 6.6, observa-se que dois dos ensaios apresentaram excelentes reprodutibilidade, com as curvas cinéticas praticamente coincidentes. Já a terceira curva apresentou um desvio, este desvio pode ser explicada pelos diferentes lotes de acerolas utilizados para os experimentos, que podem apresentar diferenças consideradas normais para materiais biológicos. O outro fato relaciona-se a variação da umidade relativa do ar de secagem, sendo condições ambientes que não foi possível controlar.

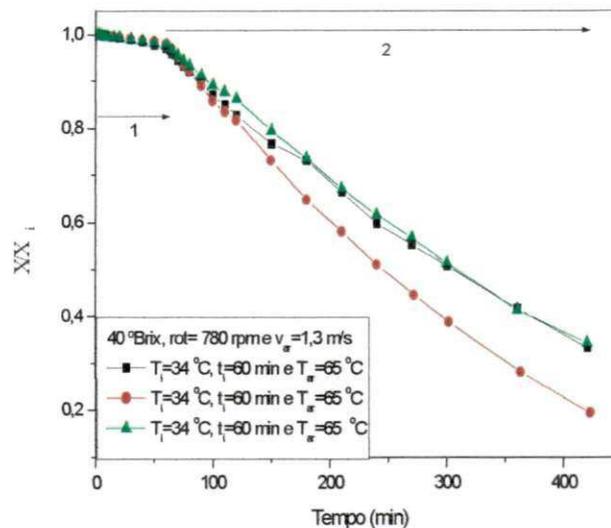


Figura 6.6 - Secagem osmo-convectiva. Reprodutibilidade dos ensaios (1) – Desidratação osmótica (60 min) (2) - Secagem convectiva (6 h)

6.2. Modelagem matemática da secagem convectiva

6.2.1. Acerolas desidratadas osmoticamente para tempo de imersão de 24, 48 e 72 horas (sem agitação)

O modelo difusional de Fick considerando a geometria esférica foi utilizado para modelar a cinética da secagem convectiva, mediante o método de tentativas, foi encontrado que quatro termos da série eram suficientes para atingir a convergência. Na Tabela 6.4 apresentam os valores para o coeficiente de difusão efetivo D e desvios médios, parâmetro A , raio médio aparente da amostra r_{ap} (cm) e R^2 coeficiente de correlação do ajuste.

Tabela 6.4 – Valores de A , r_{ap} , D para o modelo difusional com quatro termos incluindo o efeito do encolhimento na secagem convectiva da acerola desidratada osmoticamente. $T_{ar} = 60\text{ °C}$ e $V_{ar} = 1,3\text{ m/s}$

Nº	(Tratamento+ secagem convectiva) $T_{ar} = 60\text{ °C}$, $V_{ar} = 1,3\text{ m/s}$	A	r_{ap} (cm)	$(D \pm \text{erro})$ $\times 10^4$ (cm^2/min)	R^2
	"In natura"	0,713	0,777	$0,7 \pm 0,041$	0,981
1	40 °Brix-24 h	0,713	0,878	$1,1 \pm 0,035$	0,994
2	70 °Brix-24 h	0,721	0,882	$1,1 \pm 0,034$	0,994
3	40 °Brix-48 h	0,708	0,640	$0,9 \pm 0,014$	0,998
4	70 °Brix-48 h	0,705	0,692	$1,0 \pm 0,0008$	0,999
5	40 °Brix-72 h	0,706	0,554	$0,7 \pm 0,011$	0,998
6	70 °Brix-72 h	0,688	0,844	$1,2 \pm 0,046$	0,994

Observa-se na Tabela 6.4 que a diminuição do coeficiente de difusão acompanha o forte encolhimento produzido na fruta, evidenciado pela diminuição dos raios em função das condições da desidratação osmótica, especialmente, tempo de imersão prolongado. No entanto, nota-se que quanto maior o raio das amostras maior o seu coeficiente de difusão, tanto para as amostras desidratadas a 40 e 70 °Brix. Provavelmente o efeito do encolhimento observado é responsável por esta discrepância.

As Figuras 6.7, 6.8 e 6.9 mostram os ajustes dos dados experimentais da secagem convectiva pelo modelo difusional de Fick com quatro termos da série

incluindo o efeito do encolhimento da amostras com e sem tratamento osmótico. Observa-se que o modelo proposto obteve um bom ajuste.

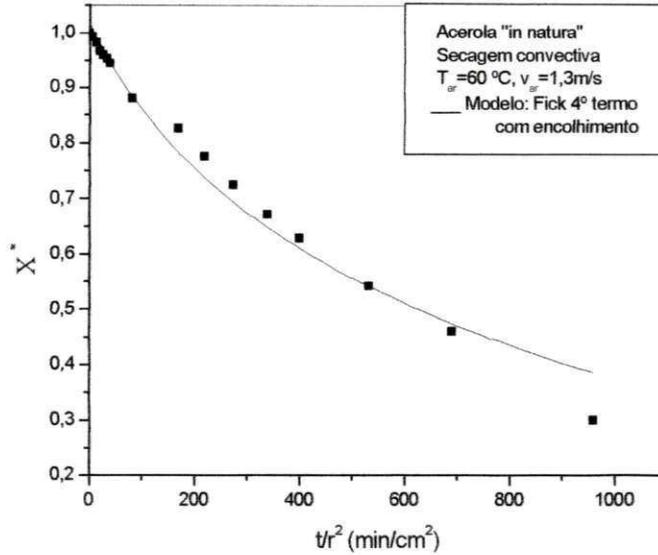


Figura 6.7 – Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola "in natura"

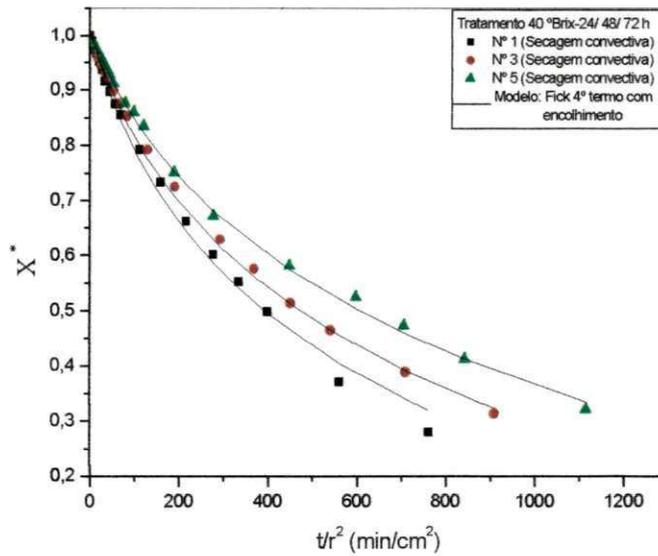


Figura 6.8 - Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente: experimentos N^{os} 1, 3 e 5

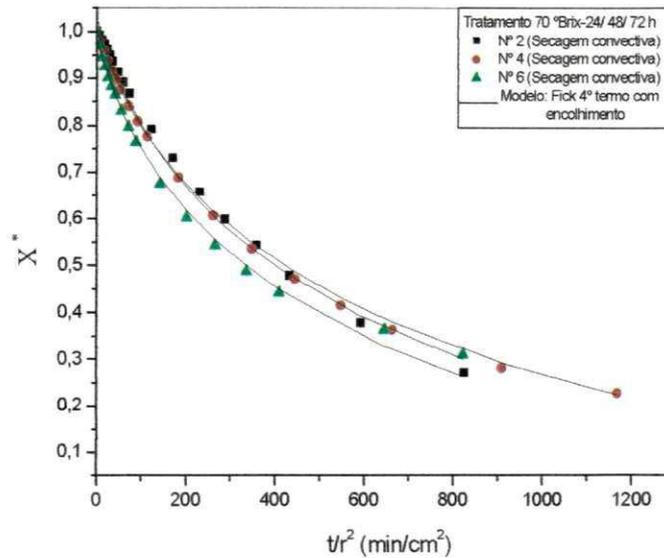


Figura 6.9 - Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente: experimentos N^{os} 2, 4 e 6

6.2.2. Acerolas desidratadas osmoticamente com efeito da agitação durante 4 horas

Na Tabela 6.5, nota-se que o coeficiente de difusão na secagem convectiva aumentou, em geral, nas acerolas tratadas osmoticamente com velocidade de agitação, comparando com a secagem convectiva sem o tratamento osmótico. É importante destacar que a amostra submetida à desidratação osmótica sem agitação tem o coeficiente de difusão (D) menor que o da fruta sem tratamento, este fato comprova as discussões anteriores, referentes à formação de uma camada de sacarose ao redor do material, entre os poros da casca da acerola, diminuindo a passagem da água para o meio externo durante a secagem convectiva, desta forma tornando-se mais lenta a saída de água do interior da fruta.

Tabela 6.5 – Valores de A , r_{ap} , D para o modelo difusional com quatro termos incluindo o efeito do encolhimento na secagem convectiva da acerola desidratada osmoticamente, com efeito da agitação. $T_{ar} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $V_{ar} = 1,3\text{ m/s}$

Nº	(Tratamento 40 °Brix - 4 h + secagem convectiva) $T_{ar} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{ar} = 1,3\text{ m/s}$	A	r_{ap} (cm)	$(D \pm \text{erro}) \times 10^4$ (cm^2/min)	R^2
	“In natura”	0,713	0,777	$0,7 \pm 0,041$	0,981
1	Sem agitação	0,697	0,907	$0,5 \pm 0,019$	0,995
2	Agitação de 150 rpm	0,721	0,809	$1,3 \pm 0,025$	0,998
3	Agitação de 420 rpm	0,708	0,784	$1,0 \pm 0,040$	0,993
4	Agitação de 780 rpm	0,705	0,937	$1,7 \pm 0,026$	0,998

As Figuras 6.10 (a) e (b) mostram os ajustes dos dados experimentais da secagem convectiva pelo modelo difusional de Fick, mediante o método de tentativas, foi encontrado que quatro termos da série eram suficientes para atingir a convergência. Observa-se que o modelo proposto apresenta um bom ajuste.

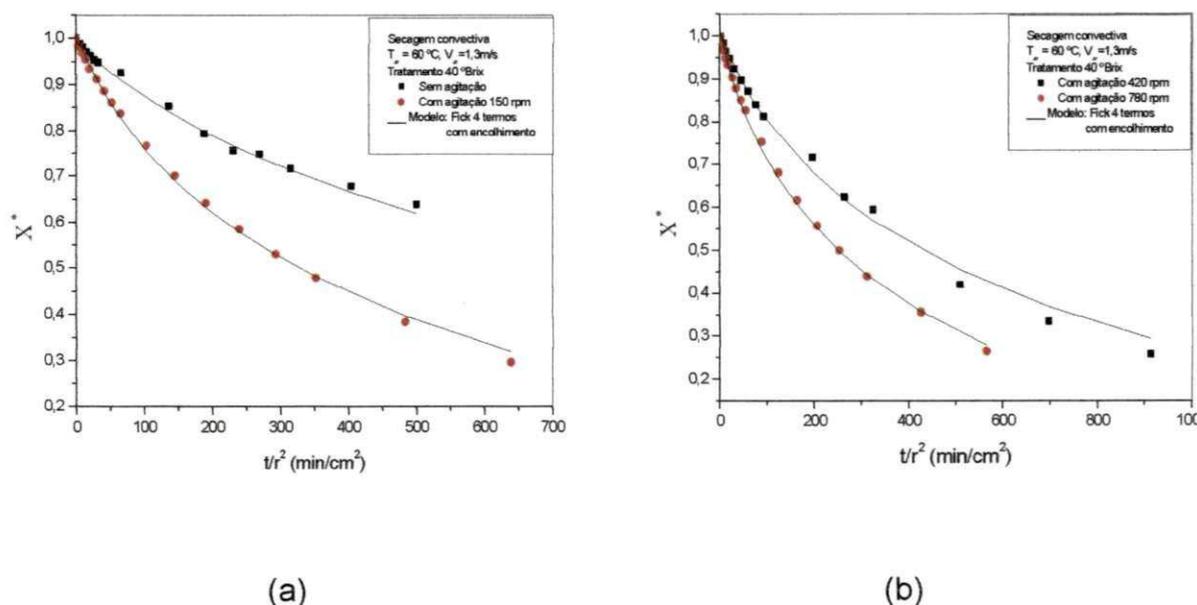


Figura 6.10 – Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente com e sem agitação

6.2.3. Acerolas desidratadas osmoticamente com efeito da agitação durante 30, 60 e 90 minutos

A Tabela 6.6 apresenta os valores para o parâmetro A , coeficiente de difusão efetivo (D) com desvios médios, raio médio aparente da amostra r_{ap} (cm) e R^2 coeficiente de correlação do ajuste.

Tabela 6.6 - Modelagem com os quatro primeiros termos da série incluindo o efeito do encolhimento. ($T_{ar} = 60$ °C e $V_{ar} = 1,3$ m/s)

N ^o	Temperatura de imersão (T_i , °C)	Tempo de imersão (t_i , min)	Temperatura do ar (T_{ar} , °C)	A	($D \pm$ erro) $\times 10^4$ (cm ² /min)	r_{ap} (cm)	R^2
1	28	30	60	0,710	0,9 \pm 0,022	0,855	0,996
2	28	30	70	0,729	1,6 \pm 0,06	0,922	0,993
3	28	90	70	0,717	1,0 \pm 0,023	0,859	0,997
4	28	90	60	0,697	0,8 \pm 0,01	0,878	0,998
5	40	30	70	0,718	1,8 \pm 0,043	0,924	0,997
6	40	30	60	0,709	0,8 \pm 0,013	0,975	0,997
7	40	90	60	0,705	0,6 \pm 0,012	0,875	0,996
8	40	90	70	0,724	1,4 \pm 0,039	0,824	0,996
9	34	60	65	0,712	1,2 \pm 0,029	0,874	0,996
10	34	60	65	0,719	1,2 \pm 0,034	0,747	0,996
11	34	60	65	0,718	1,1 \pm 0,035	0,847	0,993

As Figuras 6.11 a 6.14 mostram os ajustes dos dados experimentais da secagem convectiva pelo modelo difusional de Fick com quatro termos da série incluindo o efeito do encolhimento. Nota-se que o modelo difusional proposto obteve um bom ajuste.

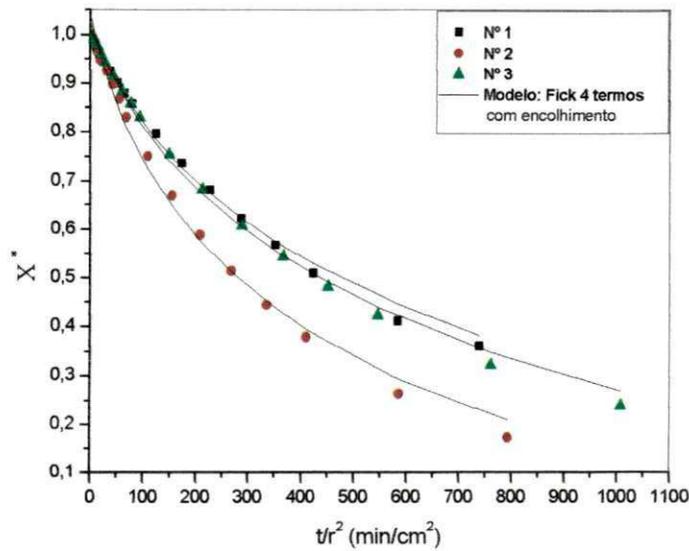


Figura 6.11 – Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente: experimentos N^{os} 1, 2 e 3

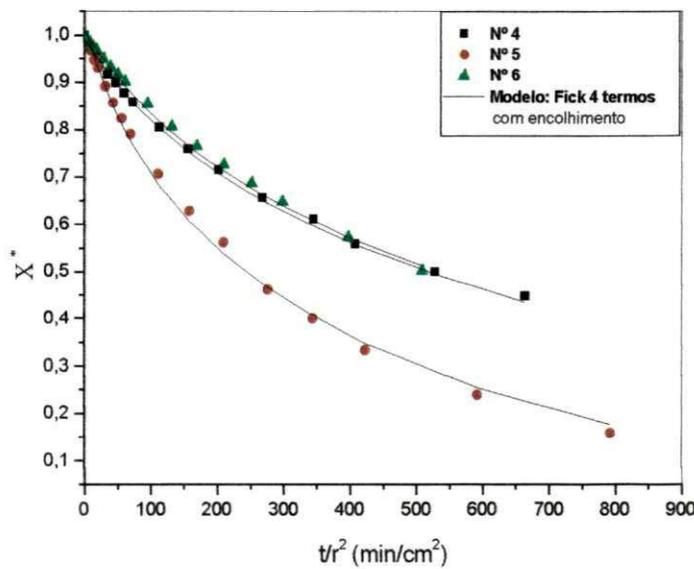


Figura 6.12 – Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente: experimentos N^{os} 4, 5 e 6

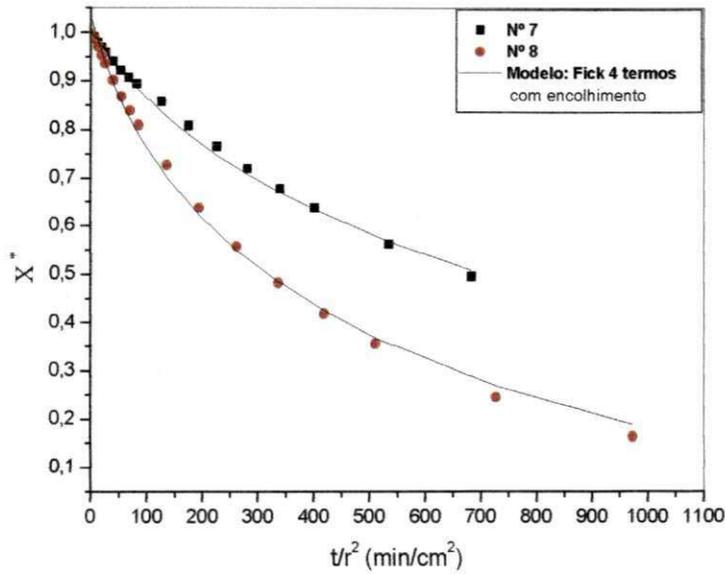


Figura 6.13 – Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente: experimentos N^{os} 7 e 8

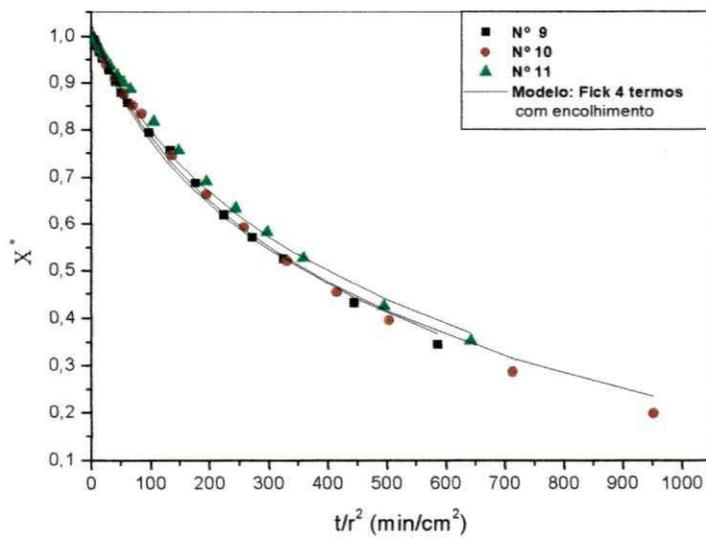


Figura 6.14 – Comparação entre os dados experimentais e o modelo difusional da secagem convectiva da acerola tratada osmoticamente: experimentos N^{os} 9, 10 e 11

6.2.3.1. Análise da influência da temperatura e tempo de imersão sobre o coeficiente de difusão na etapa convectiva

Na Tabela 6.7 mostra-se o resultado dos efeitos das variáveis: temperatura de imersão, tempo de imersão, temperatura do ar e as interações de 2^o ordem (3) e uma de 3^o ordem aplicadas a resposta o coeficiente de difusão, obtido pelo modelo de Fick.

Tabela 6.7 - Efeitos das variáveis no coeficiente de difusão efetiva da acerola osmo-convectiva

Variável	Efeito x 10 ⁴ (cm ² /min)	Desvio padrão	p-valor
Média*	1,1272	0,0235	0,0000
(1) Temperatura de imersão	0,0750	0,0551	0,2453
(2) Tempo de imersão*	- 0,3250	0,0551	0,0041
(3) Temperatura do ar*	0,6750	0,0551	0,0002
(1) e (2)	0,0251	0,0551	0,6737
(1) e (3)*	0,2250	0,0551	0,0150
(2) e (3)*	- 0,1750	0,0551	0,0337
(1), (2) e (3)	0,0750	0,0466	0,2064

Observa-se pela Tabela 6.7 que a variável que mais influenciou foi à temperatura do ar de secagem, seguida do tempo de imersão depois as interações: (1) Temperatura de imersão - (3) Temperatura do ar e (2) Tempo de imersão - (3) Temperatura do ar.

A temperatura do ar de secagem (3) apresenta efeito positivo, isto significa que, um aumento desta variável provoca um aumento no coeficiente de difusão. Na Tabela 6.6 verifica-se claramente que o aumento da temperatura do ar de secagem de 60 para 70 °C, nas mesmas condições de temperatura e de tempo de imersão, o coeficiente de difusão aumenta. Como esperado os valores dos coeficientes de difusão aumentam quando a temperatura de secagem convectiva aumenta.

Observa-se na Tabela 6.7, que o tempo de imersão (2) apresentou efeito negativo, indicando que um aumento da variável provoca uma diminuição no coeficiente de difusão. Na Tabela 6.6 verifica-se que o aumento do tempo de imersão para uma mesma temperatura de imersão, tanto para a secagem convectiva de 60 °C quanto à de 70 °C o coeficiente de difusão diminui. Dessa forma, de maneira geral, o aumento do tempo de imersão de 30 para 90 min não influencia significativamente na redução do tempo de secagem. Este efeito pode ser atribuído a que, com o aumento do tempo de exposição, aumenta a presença de sacarose na fruta e especialmente na casca. Com as elevadas temperaturas utilizadas na secagem convectiva próximas do TG dos açúcares, poderia haver uma diminuição do volume livre, disponível para a difusão o que explicaria a diminuição do coeficiente de difusão efetivo. Por outro lado à influência negativa do tempo de imersão pode ser explicado por uma provável diminuição da atividade de água, devido a um maior conteúdo de açúcar na fruta.

As interações que mais influenciaram foram (1) Temperatura de imersão - (3) Temperatura do ar. Estas apresentam efeito positivo, onde o aumento conjunto destas variáveis aumenta o coeficiente de difusão. Verifica-se na Tabela 6.6 que a secagem realizada para um mesmo tempo de imersão o aumento da temperatura de imersão e temperatura do ar de secagem para 70 °C, aumentam o coeficiente de difusão. Nas interações (2) Tempo de imersão - (3) Temperatura do ar tem-se efeito negativo, indicando que um aumento destas variáveis provoca uma diminuição no coeficiente de difusão. Também foi observado um efeito positivo, porém não muito significativo, da temperatura de imersão da desidratação osmótica.

A verificação da significância da regressão foi feita através da análise de variância (ANOVA) ao nível de 95% de confiança e está representada na Tabela 6.8. O modelo ajustado, além de estatisticamente significativo é também preditivo, pois o F calculado é mais de 5 vezes que o F tabelado.

Tabela 6.8 – Análise de variância do coeficiente de difusão efetiva para a acerola osmo-convectiva

Fonte de variação	SQ	g.l.	MQ	F _{Calculado}	F _{Tabelado}	R ²
Regressão	1,29749	6	0,21624	35,565	6,16	0,9816
Resíduo	0,02432	4	0,00608			
Total	1,32181	10				

O modelo linear empírico de regressão dos dados experimentais para descrever o coeficiente de difusão da acerola submetida à secagem osmo-convectiva é:

$$D \times 10^4 \text{ (cm}^2\text{/min)} = 1,127 + 0,0375T_i - 0,163t_i + 0,338T_{ar} + 0,0125 T_i \cdot t_i + 0,113 T_i \cdot T_{ar} - 0,0875 t_i \cdot T_{ar} + 0,038 T_i \cdot t_i \cdot T_{ar} \quad (6.1)$$

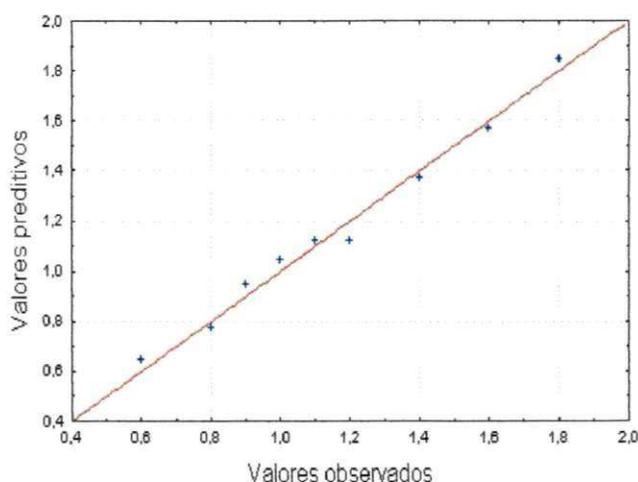
Onde:

T_i = temperatura de imersão (Codificado)

t_i = tempo de imersão (Codificado)

T_{ar} = temperatura do ar (Codificado)

A Figura 6.15 mostra que os dados experimentais não são muito diferentes dos dados preditos pelo modelo, indicando que o modelo empírico linear ajusta muito bem aos dados experimentais em todo o intervalo estudado.

**Figura 6.15** – Respostas previstas pelo modelo linear para o coeficiente de difusão da acerola na etapa convectiva

As superfícies de resposta geradas pelo modelo proposto são apresentadas nas Figuras 6.16, 6.17 e 6.18, considerando as variáveis que exercem maior influência no processo. Nota-se que o coeficiente de difusão da secagem convectiva das acerolas tratadas osmoticamente, aumenta nas seguintes situações: na Figura 6.16 com o aumento da temperatura de imersão e diminuição do tempo de imersão. Figura 6.17 com o tempo de imersão menor e aumento da temperatura do ar. Na Figura 6.18 com o aumento da temperatura de imersão e temperatura do ar de secagem.

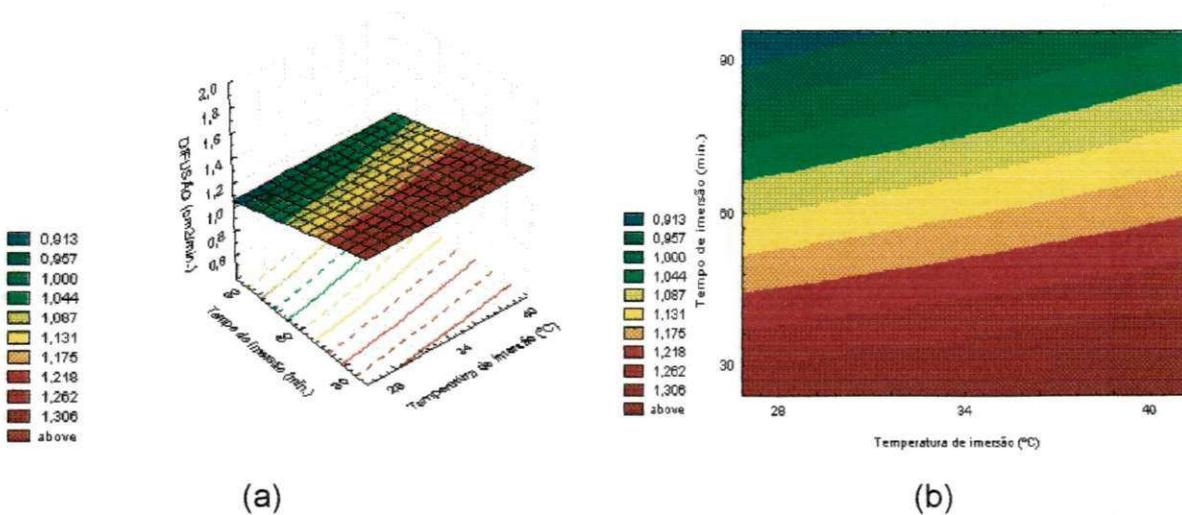


Figura 6.16 – Superfícies de resposta do coeficiente de difusão para a acerola submetida à secagem osmo-convectiva: efeito do tempo de imersão e temperatura de imersão

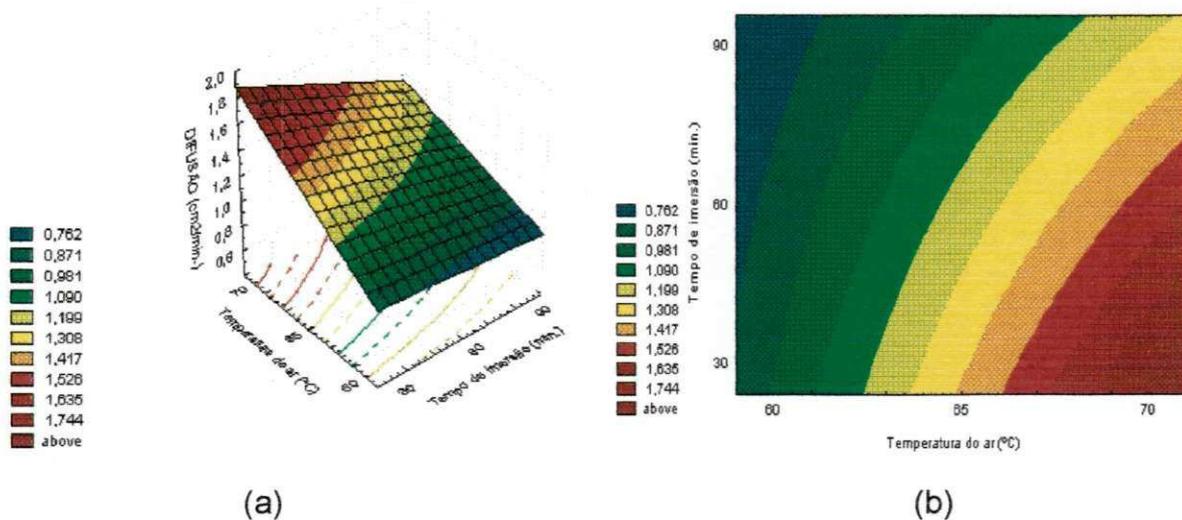


Figura 6.17 – Superfícies de resposta do coeficiente de difusão para a acerola submetida à secagem osmo-convectiva: efeito do tempo de imersão e temperatura do ar

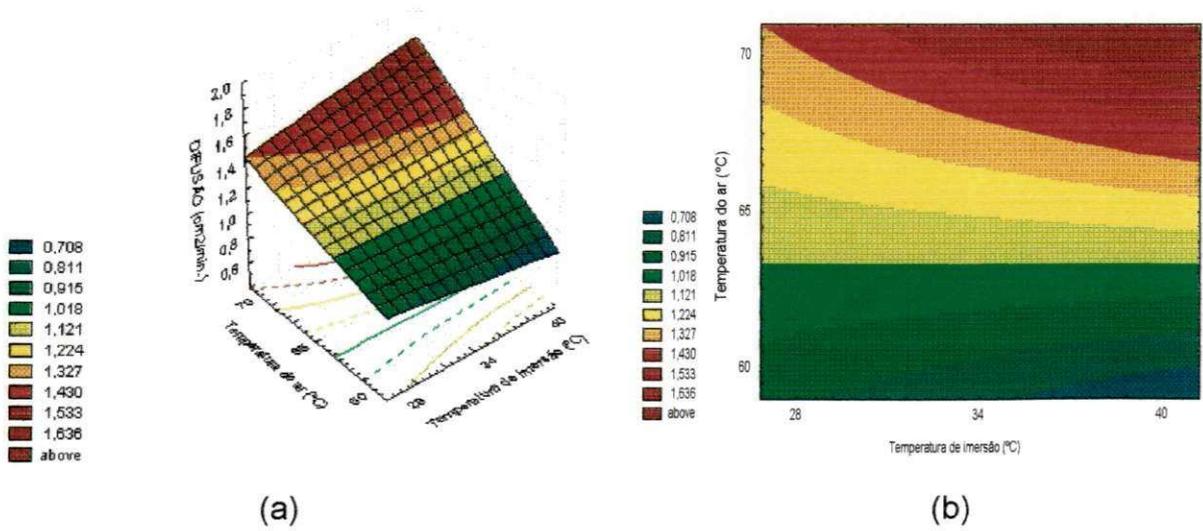


Figura 6.18 – Superfícies de resposta do coeficiente de difusão para a acerola submetida à secagem osmo-convectiva: efeito da temperatura do ar e temperatura de imersão

7. Análise do desempenho do processo

7.1. Vitamina C

A acerola é uma fonte natural rica em vitamina C. Tendo em vista as qualidades da acerola, estudou-se técnicas de minimizar a perda dessa vitamina, durante o processo de desidratação. Dessa forma a desidratação osmótica como processo de pré-desidratação, surge como alternativa para evitar prejuízos ao produto final.

Segundo ARGANDOÑA (1999) várias pesquisas em secagem de alimentos consideram a temperatura do ar de secagem como a variável de maior influência na qualidade do produto final. Assim, as temperaturas de 60 e 70 °C foram selecionadas como condições de processo para os ensaios de secagem.

Nos dados da Tabela 7.1 é verificada a degradação de vitamina C da acerola, em base seca, durante o tratamento osmótico com sacarose seguido da secagem convectiva, comparado com a acerola "in natura". Observa-se que as amostras "in natura" apresentam uma perda de vitamina C maior quando comparada às amostras submetidas à secagem osmo-convectiva. Neste caso, o tratamento osmótico com sacarose mostra-se eficaz na conservação da vitamina C em relação ao sem tratamento, já que reduz de maneira considerável o tempo necessário para a secagem, reduzindo o tempo de permanência no secador convectivo. Isto torna-se importante, sabendo-se que a maior perda de vitamina C ocorre durante a secagem convectiva, devido à alta temperatura do ar. Este resultado segue a mesma tendência dos resultados de EL-AOUAR et al. (2002) na desidratação osmótica de mamão, onde perceberam que as perdas de vitamina C foram mínimas comparando com as amostras "in natura".

Tabela 7.1 – Degradação da vitamina C da acerola – Teor de vitamina (%) (base seca)

CONDIÇÕES Brix 40°	Porcentagem de vitamina C (base seca)				
	"In natura"	Após desidratação osmótica (%)	Perda relativa de vitamina C, osmótica (%)	Após secagem convectiva (%)	Perda relativa de vitamina C, final (%)
"in natura" $T_{ar}=60^{\circ}\text{C}, V_{ar}=1,2$ m/s	13,13	—	—	4,83	63,2
$T_i = 40^{\circ}\text{C}, t_i=30$ min e 780 rpm - $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$	17,06	13,08	23,32	10,76	36,9
$T_i = 40^{\circ}\text{C}, t_i = 30$ min e 780 rpm - $T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}$	16,61	9,70	41,60	6,17	62,85
$T_i = 40^{\circ}\text{C}, t_i = 90$ min e 780 rpm - $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$	16,94	11,68	31,05	—	—
$T_i = 40^{\circ}\text{C}, t_i = 90$ min e 780 rpm - $T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}$	11,55	—	—	5,93	48,65
$T_i = 34^{\circ}\text{C}, t_i = 60$ min e 780 rpm - $T_{ar} = 65^{\circ}\text{C}$	15,59	12,92	17,12	7,46	52,15
$t_i = 4$ h, 150 rpm $T_i = 28^{\circ}\text{C}, T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$	13,97	13,0	6,94	8,06	42,3
$t_i = 4$ h, 420 rpm $T_i = 28^{\circ}\text{C}, T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$	7,35	6,46	12,10	5,14	30,0
$t_i = 4$ h, 780 rpm $T_i = 28^{\circ}\text{C}, T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$	7,77	6,45	16,98	3,65	53,0
Sem agitação $T_i = 28^{\circ}\text{C}, t_i = 48$ h	13,11	12,73	2,90	7,28	43,8

O método para a determinação de vitamina C foi o Método de Tillmans modificado, (Anexo I).

Dessa forma, pode-se concluir que o tratamento osmótico influencia na conservação da vitamina C durante a secagem osmo-convectiva. As amostras osmoticamente desidratadas apresentaram, em sua maioria, melhores resultados do que as amostras sem tratamento. No entanto, observa-se uma variação destas perdas para as demais desidratações osmótica seguida da secagem convectiva, quando comparada com a "in natura". Estas diferenças estão relacionadas à decorrência da grande sensibilidade do ácido ascórbico aos fatores de cultivo, grau de maturação, tamanho dos frutos, posicionamento da árvore de acerola entre outros, justificam-se as diferenças dos teores de vitamina C, (SOARES et al., 2001).

O aumento da temperatura de imersão não é satisfatório para a conservação da vitamina C, havendo perdas significativas desta vitamina na desidratação osmótica. Estes resultados podem ser comparados com o tratamento osmótico realizado a temperatura ambiente, onde se observa que as perdas relativas de vitamina C na fase osmótica, na temperatura ambiente de 28 °C, variaram de 2,9 a 16,98%, enquanto na desidratação osmótica realizada a temperatura superior à ambiente, estas perdas variaram de 17,12 a 41,6%. Como se observa o aumento da temperatura de imersão é a variável de maior influência na qualidade do produto final.

Observa-se também que o efeito do aumento da velocidade de agitação não é favorável na conservação da vitamina C, devido o mesmo eliminar a formação do filme de sacarose na superfície da fruta, ajudando também na perda da vitamina. Comparando com a amostra sem o efeito da agitação, mesmo em um tempo de exposição prolongado de 48 h, a perda percentual foi apenas de 2,9%.

Dessa forma, após o processo de desidratação osmótica o aumento da temperatura de imersão, efeitos da agitação seguidos da secagem convectiva influenciaram na perda de vitamina C de modo que as perdas totais, envolvendo tanto a etapa osmótica como a convectiva, foram aproximadamente da mesma ordem, variando entre 30 e 63%. No entanto, ainda apresenta melhores resultados quando comparado ao processo "in natura", com exceção das amostras tratadas com temperatura de imersão 40 °C, tempo de imersão 30 min, agitação 780 rpm e temperatura do ar de secagem de 70 °C, onde as perdas percentuais foram da mesma ordem da "in natura".

7.2. Análise sensorial

A análise sensorial da acerola seca, após a secagem osmo-convectiva, não foi realizada em virtude da fruta seca não apresentar uma aparência e sabor aceitáveis. Foi realizando apenas a análise do suco da acerola obtido da fruta seca.

Utilizou-se o Teste de Aceitação, para a análise sensorial do suco de acerola osmoticamente desidratada em solução de sacarose de 40 °Brix e tempo de imersão 72 h à temperatura ambiente. O teste, que tem por objetivo analisar a aceitação do suco por parte dos julgadores, foi avaliado em sua maioria dentro da comunidade universitária da UFCG – Campus I - Campina Grande. O número de participantes foi 100 pessoas, com faixa etária entre 19 a 40 anos. A cada participante foi dada uma ficha de perguntas e solicitado que cada provador marcasse a resposta que melhor refletisse seu julgamento em relação à aceitação do produto quanto ao sabor, aroma, cor e aparência do suco. Os resultados estão apresentados a seguir nas figuras.



Figura 7.1 – Teste de aceitação quanto ao sabor do suco de acerola osmoticamente desidratado. (Solução de sacarose de 40 °Brix – tempo de imersão 72 h)



Figura 7.2 – Teste de aceitação quanto ao aroma do suco de acerola osmoticamente desidratado. (Solução de sacarose de 40 °Brix – tempo de imersão 72 h)

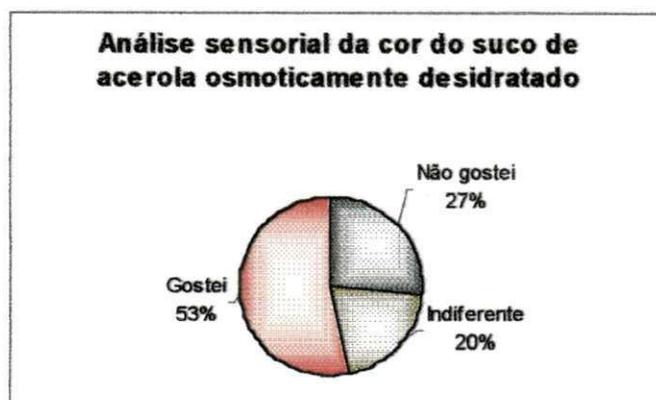


Figura 7.3 – Teste de aceitação quanto à cor do suco de acerola osmoticamente desidratado. (Solução de sacarose de 40 °Brix – tempo de imersão 72 h)



Figura 7.4 – Teste de aceitação quanto à aparência do suco de acerola osmoticamente desidratado. (Solução de sacarose de 40 °Brix – tempo de imersão 72 h)

Observa-se pela Figura 7.1 um percentual muito satisfatório, que os provadores solicitados mostraram-se satisfeitos quanto ao sabor do suco. Cerca de 84% comprovaram a aceitação do produto, tendo em vista que essa aceitação refere-se à expectativa de uso efetivo do produto, ou seja, à disposição do consumidor de comprar e/ou consumir o suco de acerola desidratado. SOUZA (2002) mostrou um índice de aceitabilidade de 50% nos testes sensoriais de tomate desidratado osmo-convectivamente, a autora atribuiu a baixa aceitação à alta concentração de sal e a presença de NaOH residual, utilizado para remoção da pele e que pode ter interferido no sabor.

Pela Figura 7.2, observa-se que mais de 50% dos provadores aceitaram o aroma do suco, como muito bom. Cerca de 30% das pessoas não considerou o aroma um fator de muita influência e foram indiferentes ao mesmo. As demais, não gostaram do aroma do suco, no entanto representam, mediante os dados coletados, a menor parcela dos entrevistados.

Segundo NOSNZI & RAMASWAMY (1998b) o desafio principal da indústria de alimentos é o de fornecer produtos que além de ser seguro tenham uma cor atrativa, pois antes de tomar a decisão de ingerir um alimento toma-se em conta seu aspecto visual e especialmente a cor. Pela Figura 7.3, observa-se que, semelhantemente ao aroma, mais de 50% dos provadores gostaram muito da cor do suco. Pode-se afirmar que a melhoria da cor do suco osmoticamente desidratada está intimamente relacionada à sacarose, pois a mesma age na superfície da amostra desidratada servindo de obstáculo ao contato de oxigênio, resultando na redução do escurecimento enzimático. SOUZA (2002), para as amostras com o tomate, mostrou um índice de aceitabilidade do atributo cor superior a 70%. Isto aconteceu devido à utilização da sacarose na composição da solução osmótica, que confere ao produto uma coloração intensa e brilhante. Portanto, cerca de 30% das pessoas não se agradaram da cor do suco de acerola. Este comportamento já era esperado, pois os consumidores, em sua maioria, são acostumados com a cor avermelhada que o suco de acerola "in natura" apresenta. Todavia, o suco desidratado possui uma cor mais escura numa faixa do vermelho-marron. As demais foram indiferentes.

Pela Figura 7.4, observa-se que cerca de 66% dos provadores gostaram da aparência do suco. Os consumidores restantes dividiram suas opiniões, 17% foram indiferentes e 17% não gostaram. No entanto, estes valores representam resultados satisfatórios.

Através dos resultados obtidos quanto ao sabor, aroma, cor e aparência do suco osmoticamente desidratado, pode-se concluir que o suco apresenta uma boa qualidade sensorial, tendo em vista a aceitabilidade da amostra por parte da comunidade universitária.

Considerações Finais

8.1. Resumo dos resultados obtidos

8.1.1. Desidratação osmótica

- O tratamento com sacarose nas concentrações de 40 e 70 °Brix acelera o processo de desidratação. O aumento do tempo de imersão de 24 para 48 e 72 h é eficaz na redução do conteúdo da umidade inicial da ordem de 13, 24 e 39% para a concentração de 40 °Brix e de 13, 58 e 62% para a concentração de 70 °Brix, respectivamente.
- As acerolas osmoticamente desidratadas durante 4 h de imersão em concentração de 40 °Brix e agitação de 150 e 780 rpm apresentaram menor tempo de desidratação osmótica quando comparada com as amostras osmoticamente desidratadas sem agitação, para atingir uma umidade normalizada especificada de 96% (base seca).
- A cinética de desidratação osmótica da acerola para o tempo de imersão de 4 h foi positivamente influenciada pela temperatura de imersão de 40 °C na solução de sacarose de 40 °Brix, no que se refere à perda de água.
- O aumento da temperatura e da concentração durante 4 h de desidratação possibilitou o rompimento da estrutura da membrana celular constatado experimentalmente pelo amolecimento da fruta, ocasionando um aumento em pequena proporção do soluto para a fruta. Para o tempo de imersão de 48 h o aumento da concentração de 40 para 70°Brix na temperatura ambiente, aumenta os solúveis de 25,81 para 52,10%, respectivamente.
- A atividade de água da acerola durante o processo de desidratação osmótica não diminuiu durante as 4 e 48 h, permaneceu praticamente constante durante o processo de desidratação osmótica.
- Com o aumento da concentração de 40 para 70 °Brix e da temperatura de 30 para 40 °C, percebe-se que na desidratação osmótica a difusividade da

acerola diminui, levando conseqüentemente a uma menor perda de água. Portanto, soluções mais concentradas dificultam a difusão efetiva da água para o meio externo, apesar do aumento da força impulsora para a transferência de massa.

- O modelo difusional para a esfera com nove termos da série incluindo o efeito do encolhimento, apresentou um bom ajuste aos dados experimentais da acerola na desidratação osmótica durante 4 h, com o coeficiente de correlação de 0,99. No tratamento de 48 h observa-se desvio importante entre o modelo proposto e os dados experimentais com o coeficiente de correlação entre 0,93 e 0,95.
- Os valores de difusividade efetiva da acerola osmoticamente desidratada durante 4 h, apresentaram valores variando de 0,48 a $8,0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{min}$ e para a acerola desidratada osmoticamente durante 48 h 0,40 e $0,60 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{min}$.
- A partir da análise estatística do planejamento experimental ao nível de 90% de confiança com coeficiente de regressão de 0,84 para a resposta do coeficiente de difusão, verificou-se que a variável mais significativa foi à concentração da solução de sacarose, seguida da temperatura de imersão ($^{\circ}\text{C}$) e por fim a interação concentração - temperatura de imersão.

8.1.2. Desidratação através da película da acerola

- A concentração da solução de sacarose em geral diminui em pequena proporção durante o processo de desidratação osmótica através da película. Dessa forma, o aumento da temperatura e concentração é pouco significativa na desidratação osmótica através da película.
- O aumento da temperatura de 30 para 40 $^{\circ}\text{C}$ independente da concentração, aumenta a incorporação de sólidos, devido as possíveis modificações causadas a película da acerola, resultando em uma maior

incorporação de sólidos, da ordem de 10 e 13%, nas soluções de sacarose de 70 e 40° Brix, respectivamente, e logo após uma diminuição da incorporação de sólidos, que deve estar relacionado à perda de alguns sólidos naturais da fruta.

- Os sólidos totais praticamente apresentam o mesmo comportamento dos sólidos solúveis, onde o aumento da temperatura, independente da concentração, e o aumento da concentração, para uma mesma temperatura influenciam na incorporação de sólidos totais ao suco.
- O conteúdo de umidade da película da acerola diminui com o aumento da concentração de 40 para 70 °Brix e temperatura do processo de 30 °C para 40 °C.
- O modelo difusional simplificado com quatro termos para a geometria de placa plana infinita, utilizado para modelar a cinética de desidratação da película da acerola, apresentou um bom ajuste aos dados experimentais com coeficiente de correlação de 0,93 a 0,99.
- Quanto mais espessa a película da acerola maior será o coeficiente de difusão aparente, constituído pela soma das resistências da parte cerosa da fruta mais a polpa aderida ao filme externo. Entretanto, quando a película da acerola é mais fina, corresponde praticamente a um filme impermeável com coeficiente de difusão efetivo menor.
- A partir da análise estatística do planejamento experimental ao nível de 90% de confiança com coeficiente de regressão de 0,98 para a resposta do coeficiente de difusão, observa-se que a variável mais significativa foi à espessura da película da acerola.
- Apesar das simplificações impostas ao modelo difusional para placa plana, o coeficiente de difusão efetiva, através da película da acerola é menor em

relação ao coeficiente de difusão da acerola, isto confirmaria que a película da acerola representa a maior à transferência de massa.

8.1.3. Secagem convectiva

- O aumento do tempo de imersão de 24, 48 e 72 h, tanto para uma solução de 40 °Brix, quanto 70 °Brix, provoca uma diminuição do conteúdo de umidade inicial e conseqüentemente, uma redução do tempo da secagem convectiva. O melhor resultado foi para tratamentos com Brix e tempos de imersão maiores, uma vez que houve uma brusca redução de tempo requerido no processo convectivo, iniciando a secagem convectiva com uma redução de 57,31% da umidade inicial.
- A secagem convectiva das amostras osmoticamente desidratada com agitação apresentou menor tempo de secagem convectiva quando comparada com as amostras "in natura" e osmoticamente desidratadas sem agitação, porém a redução do tempo de secagem convectiva não é tão significativa com o aumento da velocidade de agitação.
- O aumento do tempo de imersão de 30 para 90 min não influenciou significativamente na redução do tempo de secagem convectiva. No entanto, com o aumento da temperatura de imersão de 28 para 40 °C a redução do tempo de secagem convectiva é mais notório para as amostras submetidas à secagem convectiva de 70 °C.
- O modelo difusional para a esfera com quatro termos da série incluindo o efeito do encolhimento, apresentou um bom ajuste aos dados experimentais da acerola tratada submetida à secagem convectiva, com o coeficiente de correlação de 0,99.
- Os valores de difusividade efetiva da secagem convectiva para acerola desidratada osmoticamente em tempos de 24, 48 e 72 h, apresentaram valores variando de 0,7 a $1,2 \times 10^{-4}$ cm²/min. Para as amostras submetidas à

desidratação osmótica de 4 h com agitação esta variação foi de 0,5 a $1,7 \times 10^{-4}$ cm^2/min , e para as amostras submetidas à desidratação osmótica de 30 e 90 min, com efeito da temperatura e agitação obteve-se 0,6 a $1,8 \times 10^{-4}$ cm^2/min .

- A partir da análise estatística do planejamento experimental o modelo empírico obtido foi considerado preditivo ao nível de 95% de confiança para a resposta do coeficiente de difusão efetiva, por apresentarem coeficiente de regressão significativa superior a 0,90. A variável que mais influenciou foi à temperatura do ar de secagem, seguida do tempo de imersão e depois as interações: Temperatura de imersão - Temperatura do ar e Tempo de imersão - Temperatura do ar.

8.1.4. Qualidade do produto final

- Com relação à análise sensorial, o suco de acerola osmoticamente desidratado, mostrou aceitabilidade por parte dos provadores, nos requisitos sabor, aroma, cor e aparência.
- As perdas relativas de vitamina C na fase osmótica, na temperatura ambiente de 28°C, variaram de 2,9% a 16,98%, enquanto na desidratação osmótica realizada a temperatura superior à ambiente estas perdas variaram de 17,12% a 41,6%, Então o aumento da temperatura de imersão é a variável de maior influência na qualidade do produto final.
- A secagem convectiva da acerola "in natura" apresentou uma perda de vitamina C maior, quando comparada com as amostras submetidas a secagem osmo-convectiva. As amostras osmoticamente desidratadas apresentaram, em sua maioria, melhores resultados do que a amostra sem tratamento.

8.2. Conclusão

Com base nos resultados apresentados e discutidos, pode-se concluir que o tratamento osmótico com solução de sacarose para acerola é eficaz na redução do conteúdo de umidade. Assim, com a utilização deste procedimento de desidratação osmótica pode-se iniciar a secagem convectiva com menor conteúdo de umidade, além da permeabilização da casca, reduzindo desta forma o tempo da secagem e, conseqüentemente, os custos energéticos, resultando em um produto final com menor perda de Vitamina C quando comparada com a acerola "in natura" submetida à secagem convectiva. A análise sensorial do suco da acerola processada apresentou boa aceitabilidade por parte dos provadores, referente ao sabor, aroma, cor e aparência.

8.3. Perspectivas para pesquisas futuras

Para dar continuidade ao trabalho aqui apresentado são sugeridos os seguintes estudos:

8.3.1. Estudos Fundamentais

- Aplicação de modelo mais realísticos para a cinética de desidratação osmótica e da secagem convectiva, considerando coeficiente de difusão variável e verificando as hipóteses acerca das condições de contorno.
- Estudar a cinética do ponto de vista de difusão multi-componente levando em conta a difusão simultânea de água, sacarose e outros solutos.
- Analisar os efeitos das variáveis através de modelos físicos para comparar com as previsões dos modelos estatísticos aqui apresentados.
- Ampliar os estudos de equilíbrio para outras faixas de temperatura de modo a realizar estudos termodinâmicos mais abrangentes.

- Analisar no microscópio a película da acerola antes e depois do tratamento osmótico para verificar os efeitos sobre a estrutura.

8.3.2. Estudos tecnológicos

- Desenvolver um sistema contínuo para a desidratação osmo-convectiva.
- Simular e otimizar o processo.
- Realizar o "Scaling-up" do processo.

8.3.3. Estudos sobre a qualidade e aplicações do produto

- Estudar tempo de vida de prateleira
- Desenvolver produtos que utilizem a acerola desidratada por processo osmo-convectivo na sua formulação, incluindo a análise sensorial dos mesmos.

Referências Bibliográficas

- AGUIAR, S.F.; GASPARETO, O.C.P.; MAGALHÃES, M.M.A.; OLIVEIRA, G.L. Estudo da desidratação osmótica da banana nanica. In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Natal: COBEQ, 2002, CD Rom.
- ALBRIGHT, L.D. Plus Psicro. Psychrometric Look-Up Substitute, 1989.
- ALSINA, O.L.S.; SILVA, O.S.; BRASILEIRO, I.M.N. Drying kinetics of West Indian Cherry conference. Proceeding of the Inter-American Drying Conference (IADC), Itu, v.1, p.434-440, 1997.
- ALSINA, O.L.S.; SILVA, V.A.; MOURA, C.S. Efeito de pré-tratamentos químicos na taxa de secagem de acerola em monocamada. In: XVI Congresso Brasileiro de Ciências e Tecnologia de Alimentos. Anais..., 3, Rio de Janeiro: 1998. p.1768-1771.
- ALSINA, O.L.S.; ALMEIDA, M.M.; SILVA, Y.C.; SÁ, R.M. Estudo do efeito das variáveis de operações na secagem de fatias de goiaba: Aplicação de um modelo difusional. In: II Congresso de Engenharia de Processos do Mercosul. Anais... Florianópolis: ENPROMER'99, 1999.
- ALVAREZ, C.A.; AGUERRE, R.; GÓMEZ, R.; VIDALES, S.; ALZAMORA, S.M.; GERSCHENSON, L.N. Air dehydration of strawberries: effects of blanching and osmotic pretreatments on the kinetics of moisture transport. Journal of Food Engineering, v.25, n.12, p.167-178, 1995.
- ARGAIZ, A.; WELTI, J.; PALOU, E.; LÓPEZ-MALO, A. Calidad de frutas conservadas por métodos combinados en función del número de reusos del jarabe. Libro de Actos Del. In: VI Congresso Argentino de Ciencias Y Tecnología de Alimentos, 1994, p.431-433.
- ARGANDOÑA, E.J.S. Desidratação de goiaba por imersão e secagem. Campinas: UNICAMP, 1999. 102p. Dissertação Mestrado

AZEREDO, H.M.C.; JARDINE, J.G. Desidratação osmótica de abacaxi aplicada à tecnologia de métodos combinados. *Ciências e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.20, n.1, p.78-82, 2000.

AZOUBEL, P.M.; MURR, F.E.X. Modelagem matemática da desidratação osmótica de tomate cereja (*Lycopersicon esculentum var. cerasiforme*). *Ciências e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.20, n.2, p.228-232, 2000.

AZOUBEL, P.M. Influência de pré-tratamentos na obtenção de produtos secos do caju (*Anacardium occidentale L.*). Campinas: UNICAMP, 2002. 135p. Tese Doutorado

AZUARA, E.; CORTÉS, R.; GARCIA, H.S.; BERISTAIN, C.I. Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. *International Journal of Food Science and Technology*, n.27, p.409-418, 1992.

BARCELOS, M.S.; ALMEIDA, P.I.F. Análise experimental e modelagem do fenômeno de encolhimento durante a secagem. In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Natal: COBEQ, 2002, CD Rom.

BARONI, A.F.; HUBINGER, M.D. Cinética a desidratação osmótica de cebola. In: XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Anais... Uberlândia: XXIV ENEMP, 1996, v.1, p.375-380.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. Planejamento e otimização de experimentos. 2.ed. São Paulo: Editora da Unicamp. 1995, 299p.

BIAGI, J.D.; VALENTINI, S.R.T.; QUEIROZ, D.M. Secagem de produtos Agrícolas. Introdução à Engenharia Agrícola. Editora da Unicamp. Campinas: UNICAMP, 1992. cap.3, p.245-284.

BRASILEIRO, I.M.N. Cinética de secagem de acerola "in natura" em monocamada. Campina Grande: UFPB, 1999. 73p. Dissertação Mestrado

- CHAVES, J.B.P.; SPROESSE, R.L. Prática de laboratório de análise sensorial de alimentos e bebidas, v.12, Viçosa: UFV, Cadernos Didáticos, v.66, p.54-57, 1999.
- COUTINHO, S.A. Efeito do pré-tratamento sobre a secagem de frutas em camada fina. Projeto: pesquisa tecnológica de aproveitamento de frutas. Estudos comparativos de técnicas de secagem para beneficiamento de frutas. Campina Grande: PIBIC/CNPq UFPB, 1998. Relatório Iniciação Científica
- COULSON, J.M.; RICHARDSON, J.F. Tecnologia química – Operações unitárias. 2.ed. Lisboa: Fundação Caloust Gulbernkian, 1974, 657p.
- CRANK, J.A. The mathematics of diffusion. 2.ed. Oxford: University Press. 1975, 414p. Apud TOBINAGA, S.; PINTO, L.A.A. Secagem de materiais fibrosos: músculos de peixes. Tópicos Especiais em Secagem, v.1, p.211-251, 1992.
- CRANK, J.A. The mathematics of diffusion. 2.ed. Oxford: University Press. 1975, 414p.
- EIROA, M.N.U. Microbiologia de frutas e hortaliças desidratadas. In: Instituto de Tecnologia de Alimentos - Manual técnico, Campinas: ITAL, 1997, p. 6.1-6.26.
- EL-AOUAR, A.A.; AZOUBEL, P.M.; MURR, F.E.X. Estudo e modelagem da cinética de desidratação osmótica de mamão Formosa (*Carica Papaya*). In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Natal: COBEQ, 2002, CD Rom.
- EL-AOUAR, A.A.; AZOUBEL, P.M.; MURR, F.E.X. Estudo e modelagem da cinética de desidratação osmótica do mamão formosa (*Carica papaya L.*). In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Natal: COBEQ, 2002, CD Rom.

- EL-AOUAR, A.A.; AZOUBEL, P.M.; MURR, F.E.X. Drying Kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (*Carica papaya* L.). *Journal Food Technology*, v.59, p.85-91, 2003.
- FREIRE, J.T. Aspectos tecnológicos dos processos de recobrimento de partículas. *Tópicos Especiais em Secagem*, v.1, n.7, p.255-282, 1992.
- GOULARTE, V.D.S.; ANTUNES, E.C.; ANTUNES, P.L. Qualidade de maçã fuji osmoticamente concentrada e desidratada. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.20, n.2, 2000.
- GOUVEIA, J.P.G.; MOURA, R.S.F.; ALMEIDA, F.A.C.; OLIVEIRA, A.M.V.; SILVA, M.M. Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, n.3, p. 471-474, 2002.
- GOUVEIA, J.P.G. Avaliação da cinética de secagem de gengibre (*zingiber officinale*, Roscoe) em um secador de leito fixo. Campinas: UNICAMP, 1999. 159p. Tese Doutorado
- HAWKES, J.; FLINK, J.M. Osmotic concentration of fruit slices prior to freeze dehydration. *Journal of Food Processing and Preservation*, v.2, p.265-284, 1978.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatístico. Paraíba: IBGE, Censo Agropecuário. 19905-1996.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatístico. Anuário Estatístico do Brasil, p. 3-56, 1997.
- KAYMAK-ERTEKIN, F.; SULTANOGLU, M. Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal Food Engineering*, v.46, p.243-250, 2000.

- KEEY, R.B. Drying of loose and particulate materials. New Zealand, 1992. 504p.
- KEEY, R.B. Tópicos em transferência de calor e massa. Avanços em cinética de secagem, 1997.
- LAZARIDES, N.H.; NICKOLAIDIS A.; KATSANIDIS, E. Sorption changes induced by osmotic pre concentration of apple slices in different osmotic media. *Journal Food Science*, v.2, n.60, p.348, 1995.
- LENART, A.; FLINK, J.M. Osmotic concentration of potato. I. Criteria for the end point of the osmotic process. *Journal Food Technology*, v.19, p.45-63, 1984.
- LENART, A.; LEWICKI, P.P. Osmotic dehydration of apples at high temperature. In: DRYING' 89. Ed. A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation, p. 501-508, 1990.
- LENART, A. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. *Drying Technology*, v.14, n.2, p.391-413, 1996.
- LEVI, A.; GAGEL, S.; JUVEN, B.J. Intermediate moisture tropical fruits products for developing countries I Technological data on papaya. *Journal Food Technology*, v.18, n.16, p.667-685, 1983.
- LEWIS, W.K. The rate of drying of solids materials. In: The Symposium on Drying. *The Journal of I. & Engineering Chemical*, v.13, n.5, p.427-432, 1921.
- LIMAVERDE, J.R.; FINZER, J.R.D. Influência da pressão osmótica na desidratação de milho verde. In: XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Uberlândia: XXIV ENEMP, 1996, v.1, p.243-246.
- LOZANO, J.E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science*, v.48, p.1497-1502, 1983.

- MAROULIS, Z.B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D.; SARAVACOS, G.D. Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. *Journal Food Engineering*, v.7, p.63-78, 1988.
- MORAIS, V.L.M. Estudo do desempenho de um leito de jorro convencional para secagem de polpa de acerola. Campina Grande: UFPB, 1996. 128p. Dissertação Mestrado
- MOREIRA, R.; SERENO, A.M. Evaluation of mass transfer coefficient and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions. *Journal Food Engineering*, v.57, p.25-31, 2003.
- MOY, J.H.; LAU, N.B.H.; DOLLAR, A.M. Effects of sucrose and acids on osmotic dehydration of tropical fruits. *Journal of Food Processing and Preservation*, v.2, p.131-135, 1978.
- MULET, A.; GARCÍA-PASCUAL, P.; SANJUÁN, N.; GARCIA-REVERTER, J. Equilibrium isotherms and isosteric of morel (*Morchella esculenta*). *Journal Food Engineering*, v. 53, p.75-81, 2002.
- NETTO, L.M. ACEROLA – A cereja tropical. São Paulo: Livraria Nobel S.A. 1986. 94p.
- NOVY QUADRI, M.G.; QUAST, E.; QUADRI, M.B.S. Secagem de cebola em bandejas utilizando desidratação osmótica como pré-tratamento. In: XXIV Congresso Brasileiro de sistemas particulados. Uberlândia: XXIV ENEMP, 1996, v.1, p.313-317.
- NSONZI, F.; RAMASWAMY, H.S. Quality Evaluation of osmo-convective dried blueberries. *Drying Technology*, v.16, n.(3-5), p.705-723, 1998a.

NSONZI, F.; RAMASWAMY, H.S. Osmo-dehydration kinetics of blueberries. *Drying Technology*, v.16, n.(3-5), p.725-741, 1998b.

OKADA, M.; VITALI, A.A.; TEIXEIRA NETO, R.O.; CARVALHO, R.; JARDIM, D.C.P. Fundamentos sobre a secagem de sólidos. Desidratação de frutas e hortaliças In: Instituto de Tecnologia de Alimentos - Manual técnico, Campinas: ITAL, 1997, p.1-1 - 1-29.

PARK, K.J. Fundamentos de secagem. Notas de aula. Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas: UNICAMP, 1988.

PARK, K.J.; YADO, M.K.M.; BROD, F.P.R. Isotermas de dessecção para a pêra bartlett (*Pyrus sp.*). Engenharia Rural, Piracicaba: ESALQ/USP, 2000.

PARK, K.J.; BIN, A.; BROD, F.P.R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra bartlett (*Pyrus sp.*) Com e sem desidratação osmótica. *Ciências e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.21, n.1, p.73-77, 2001.

PENA, R.S.; RIBEIRO, C.C.; GRANDI, J.G. Aplicação de modelos matemáticos bi e tri-paramétricos na predição de isotermas de adsorção de umidade do guaraná (*Paullinia cupana*) em pó. *Ciências e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.20, n.1, p.08-11, 2000.

PEREIRA, J.A. Desidratação da acerola submetida à pré-secagem osmótica. Projeto: Pesquisa tecnológica de aproveitamento de frutas. Estudos comparativos de técnicas de secagem para beneficiamento de frutas. Campina Grande: PIBIC/CNPq/FAPESQ-PB/UFPB, 2000. Relatório Iniciação Científica

- PEREIRA, J.A. Desidratação de frutas tropicais submetidas à pré-secagem osmótica. Projeto: Pesquisa tecnológica de aproveitamento de frutas. Estudos comparativos de Técnicas de secagem para beneficiamento de frutas. Campina Grande: PIBIC/CNPq/UFPB, 2001. Relatório Iniciação Científica
- PONTING, J.D.; WATTERS, G.G.; FORREY, R.R.; JACKSON, R.; STANLEY, W.L. Osmotic dehydration of fruits. *Food Technology*, v.20, n.10, p.1365-1368, 1966.
- PONTING, J.D. Osmotic dehydration of fruits: recent modifications and applications. *Process Biochemistry*, v. 8, p.18-20, 1973.
- POSSINGRHAM, J.V.; CHAMBERS, T.C. Studies of the fine structure of the wax layer of sultana grapes. *Australian Journal Biological Science*, 16, p. 818-825, 1963.
- PROTHON, F.; AHRNÉ, L.M. Application of the Guggenheim, Anderson and De Boer model to correlate water activity and moisture content during osmotic dehydration of apples. *Journal Food Engineering*, v.61, p. 467-470, 2004.
- RAHMAN, M.S.; PERERA, C.D.; THEBAUD, C. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Research International*, v.30, n.7, p. 485-491, 1997.
- RAMASWAMY, H.S.; NSONZI, F. Convective-air drying kinetics of osmotically pre-treated blueberries. *Drying Technology*, v.16, n.3-5, p.743-759, 1998c.
- RAOULT-WACK, A.L. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Trends in Food Science and Technology*, v. 5, n. 8, p. 255-260, 1994.

- RAOULT-WACK, A.L.; LENART, A.; GUILBERT, S.; RCENT, S. Advances in dewatering through immersion in concentrated solutions. In: DRYING OF SOLIDS, ed. A. S. Mujumdar. International Science Publishers, p.211-251, 1992.
- RIVA, M.; PERI, C. Etude du Sèchage des Raisins. 1 – Effect de traitements de modification de la surface sur la cinétique du sechage. Sciences des Aliments, v. 3, p. 527-550, 1983.
- SANTIN, A.P. Estudo da secagem e da inativação de leveduras. Campina Grande: UFSC, 1996. 135p. Dissertação Mestrado
- SARAVACOS, G.D.; TSIOURVAS, D.A.; TSAMI, E. Effect of temperature on the water adsorption isotherms of sultana raisins. Journal Food Sciences, v.51, p. 381, 1986.
- SERENO, A.M.; MOREIRA, R.; MARTINEZ, E. Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. Journal of Food Engineering, v.47, n.1, p.43-49, 2001.
- SHERWOOD, T.K. Application of the theoretical diffusion equations to the drying of solids. Transation Am. Inst. Chemical Engineering, v.27, p.310-333, 1931.
- SHI, J.X.; Le MAGUER, M.; WANG, S.L.; LIPTAY, A. Application of osmotic treatment in tomato processing – effect of skin treatments on mass transfer in osmotic dehydration of tomatoes. Food Research International, v.30, n.9, p. 669-674, 1997.
- SHI, X.Q.; FITO, P.; CHIRALT, A. Influence of vacuum treatment on mass transfer during osmotic dehydration of fruits. Food Research International, v.28, n 5, p.445-454, 1995.

X

- SILVA, J.B. Secagem de sólidos em camada fina via análise concentrada: modelagem e simulação. Campina Grande: UFPB, 2002. 50p. Dissertação Mestrado
- SILVA, V.A. Efeito de Pré-Tratamentos químicos na taxa de secagem de acerola em monocamada. Campina Grande: UFPB, 1998. 92p. Dissertação Mestrado
- SILVEIRA, A.M.; ALVES, S.M. Tomates secos via processo combinado convecção-desidratação osmótica. In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Natal: COBEQ, 2002, CD Rom.
- SILVEIRA, E.T.F.; RAHMAN, M.S.; BUCKLE, K.A. Osmotic dehydration of pineapple: kinetics and product quality. *Food Research International*, v.29, n.3 e 4, p.227-233, 1996.
- SIMAL, S.; DEYÁ, E.; FRAU, M.; ROSSELLÓ, C. Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes. *Journal of Food Engineering*, v.33, p.139-150, 1997.
- SOARES, E.C.; OLIVEIRA, G.S.F.; MAIA, G.A.; MONTEIRO, J.C.S.; SILVA Jr.A.; FILHO, M.S.S. Desidratação da polpa de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) pelo processo "Foam-Mat". *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.21, n.2, 2001.
- SOUZA, J.S. Estudo da desidratação de tomates em pedaços com pré-tratamento osmótico. Natal: UFRN, 2002. 85p. Dissertação Mestrado
- SRZEDNICKI, G.S.; JOENG, Y.H.; DRISCOLL, R.H. Studies on drying of Australian sweet cherries. *Drying'96*, p. 831-838, 1996.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying Principles, applications and design*. Gordon and Breach Science Publishers, 1986, 448p.

- SUZUKI, K.; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T.; OSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root, vegetables. *Journal of Food Science*, v. 41, n.5, p.1189-1194, 1976.
- TELIS, V.R.N.; GARBAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption thermodynamic properties applied. *Thermochimica Acta*, 343, p.49-56, 2000.
- TELIS-ROMERO, J.; GABAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS, V.R.N. Drying of persimmons: Mathematical model for diffusivity as a simultaneous function of moisture content and shrinkage. *Proceedings of the Second Inter-American Drying Conference, México*, p.243-251, 2001.
- TORREGGIANI, D.; FORNI, E.; RIZZOLO, A. Osmotic dehydration of fruit, part II, influence of the osmotic time on the stability of processed cherries. *Journal Food Processing Preservation*, v.12, n. 27, 1998.
- TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International*, v.26, n.1, p.59-68, 1993.
- TRAVAGLINI, D.A.; AGUIRRE, J.M.; SILVEIRA, E.T. Desidratação de frutas e hortaliças. In: Instituto de Tecnologia de Alimentos - Manual técnico, Campinas: ITAL, 1997, p.3.1-3.40.
- VALDEX-FRAGOSO, A.; WELTI-CHANES, J.; GIROUX, F. Properties of a sucrose solution reused in osmotic dehydration of apples. *Drying Technology*, v.16, n.7, p.1429-1445, 1998.
- VALLE, J.M.; CUADROS, T.R.M.; AGUILERA, J.M. Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces. *Food Research International*, v.31, n.3, p.191-204, 1998.
- VAZQUEZ, G.; CHENLO, F.; MOREIRA, R.; CARBALLO, L. Desorption isotherms of *muscatel* and *aledo* grapes, and the influence of pretreatments on muscatel isotherms. *Journal of Food Engineering*, v.39, p.409-414, 1999.

- VIAL, C.; GUILBERT, S.; CUQ, J.L. Osmotic dehydration of kiwi fruits: influence of process variables on the color and ascorbic acid content. *Sciences des Aliments*, v.11, n.1, p.63-84, 1991.
- VIBERG, U.; FREULER, S.; GEKAS, V.; SJÖHOLM, I. Osmotic pretreatment of strawberries and shrinkage effects. *Journal of Food Engineering*, v.35, p.135-145, 1998.
- VIDEV, K.; TANCHEV, S.; SHARMA, R.C.; JOSHI, V.K. Effect of sugar syrup concentration and temperature on the rate of osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Science and Technology*, v. 27, n.5, p.307-308, 1990.
- WELTI, J.; PALOU, E.; LOPEZ M.A.; BALSEIRA, A. Osmotic concentration drying of mango slices. *Drying Technology*, v.12, p.405-416, 1995.
- WELTI, J. CH.; VERGARA F.B. Actividad de agua – Concepto y aplicación em alimentos com alto contenido de humedad. *Temas en Tecnología de Alimentos*, México, v.1, p.11-37, 1997.
- YANG, C.J.; Le MAGUER. Osmotic dehydration of strawberries in a Batch recirculation system. *Journal Food Quality*, v.15, p.387-397, 1992.

Anexo I

ÁCIDO ASCÓRBICO

1. MÉTODO:

TITULOMÉTRICO (Método de Tillmans modificado)

2. PRINCÍPIO:

Baseia-se na redução de 2,6-diclorofenol-sódio (DCF_I) pelo ácido ascórbico. O DCF_I em meio básico ou neutro é azul, em meio ácido é rosa e sua reduzida é incolor. O ponto final de titulação é detectado pela viragem da solução de incolor para rosa, quando a primeira gota de solução do DCF_I é introduzida no sistema, com todo ácido ascórbico já consumido.

3. MATERIAL:

Equipamentos:

- Balança analítica
- Agitador magnético

Reagentes e Soluções:

- Solução de ácido oxálico 1%
- Solução padrão de ácido ascórbico:

50,0 mg de ácido ascórbico p.a. dissolvidos em solução de ácido oxálico a 1% e diluídos a 100 ml com ácido oxálico em balão volumétrico (recém preparada)

- Solução de 2-6-diclorofenol indofenol sódio a 0,2%

Vidraria e outros materiais:

- Pipeta volumétrica de 10 ml
- Bureta de 25ml cor âmbar
- Erlenmeyer de 250 ml
- Balão volumétrico de 100 ml e 1000 ml (cor âmbar)
- Barra magnética

4. PROCEDIMENTO:

a. Padrão:

Pipetar 10 ml da solução padrão de ácido ascórbico em erlenmeyer contendo 50 ml de solução de ácido oxálico. Titular com solução de 2,6-diclorofenol

indofenol sódio até coloração rosa persistente por 15 segundos. Seja n o volume gasto nesta titulação; $n/5$ é o volume em ml gastos para titulação de 1 mg de ácido ascórbico.

b. Amostra:

Pipetar ou pesar um volume conveniente de amostra e adicionar 50 ml da solução de ácido oxálico no erlenmeyer. Titular com a solução de 2,6 diclorofenol indofenol sódio padronizado até coloração rosa persistente por 15 segundos.

5. CÁLCULO E EXPRESSÃO DO RESULTADO:

O resultado será expresso em mg de ácido ascórbico por 100 ml ou 100 g da amostra, pela fórmula:

$$\text{Ácido ascórbico (mg/100 ml ou mg/100 g)} = \frac{5 \times 100 \times n'}{n \times V \text{ ou } P}$$

n' = Volume de 2,6-diclorofenol indofenol sódio em ml gastos na titulação da amostra;

V = Volume de amostra usado na titulação;

n = Volume de 2,6-diclorofenol indofenol sódio em ml gastos na padronização.

P = Massa da amostra em g.

Precauções Analíticas:

Para amostra contendo anidrido sulfuroso, adicionar 19 ml de acetona, após o procedimento descrito em (4-b), e antes da titulação com 2,6-DCFI.

Para amostra de coloração intensa, juntar ao suposto final da titulação 20 ml de éter etílico e agitar. Caso a camada de éter fique rosa (identificar à coloração obtida na padronização do 2,6-DCFI), indica o ponto final da titulação.

Ref. Brasil. Ministério da Agricultura. Portaria nº76 de 26 de novembro de 1986.

Dispõe sobre os métodos analíticos de bebidas e vinagre. **Diário Oficial** da República Federativa do Brasil, Brasília, 28 de novembro de 1986. seção 1, pt. 2.

*INSTITUTO de tecnologia de alimentos. **Manual técnico de análise química de alimentos**. Campinas, 1990.

*PEARSON, David. **The Chemical Analysis of Foods**. 6. ed. London: J. & A. Churchill.

Anexo II

Estudo de Consumo

Ocupação: _____ Data: ____/____/____

Idade: _____ Sexo: () Masculino () Feminino

Estamos fazendo um estudo sobre suco de acerola e para isso necessitamos de sua colaboração através de suas respostas às perguntas formuladas abaixo.

Você gosta de acerola? () sim () não

Você prefere o suco: () natural () polpa

Você consome suco de acerola: () diariamente () semanalmente

() mensalmente () nunca

Se você fosse comprar o suco de acerola, que esta sendo mostrado, diga em relação à **aparência, sabor, cor e aroma do suco** qual a sua *opinião* utilizando a escala abaixo para expressar o quanto você gostou ou desgostou do produto.

Escalas:

1 = INDIFERENTE

2 = NÃO GOSTEI

3 = GOSTEI

Em relação:

Aparência do suco: _____

Sabor do suco: _____

Cor do suco: _____

Aroma do suco: _____