



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA E SECAGEM CONVECTIVA DE MAÇÃ
CORTADA EM FORMA DE PARALELEPÍPEDO DESCRITAS POR
SOLUÇÃO NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DA EQUAÇÃO DE
DIFUSÃO**

AUTORA: Kalina Lígia Cavalcante de Almeida Farias Aires

ORIENTADOR: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva

CAMPINA GRANDE – PB

AGOSTO – 2016

KALINA LÍGIA CAVALCANTE DE ALMEIDA FARIAS AIRES

**DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA E SECAGEM CONVECTIVA DE MAÇÃ
CORTADA EM FORMA DE PARALELEPÍPEDO DESCRITAS POR
SOLUÇÃO NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DA EQUAÇÃO DE
DIFUSÃO**

Tese de Doutorado submetida à
Coordenação do Curso de Doutorado em
Engenharia de Processos da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do
título de Doutora em Engenharia de
Processos

ORIENTADOR: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva

CAMPINA GRANDE – PB

AGOSTO – 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A298d Aires, Kalina Lígia Cavalcante de Almeida Farias.

Desidratação osmótica e secagem convectiva de maçã cortada em forma de paralelepípedo descritas por solução numérica tridimensional da equação de difusão / Kalina Lígia Cavalcante de Almeida Farias Aires. – Campina Grande, 2016.

272 f : il.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva".

Referências.

1. Desidratação Osmótica. 2. Secagem Convectiva. 3. Otimização. 4. Simulação. 5. Método dos Volumes Finitos. I. Silva, Wilton Pereira da. II. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (PB). III. Título.

CDU 66.093.48 (043)

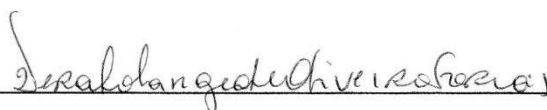
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE KALINA LÍGIA CAVALCANTE DE ALMEIDA FARIAS AIRES APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado **aprovada com distinção** em 26 de agosto de 2016



Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva

UAF/CCT/UFCG – Orientador



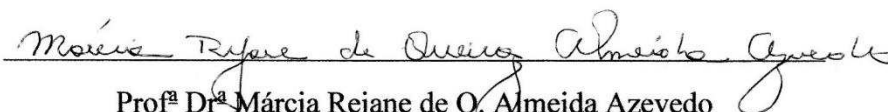
Profª. Drª. Vera Solange de Oliveira Farias

UAFM/CES/UFCG – Examinadora interna



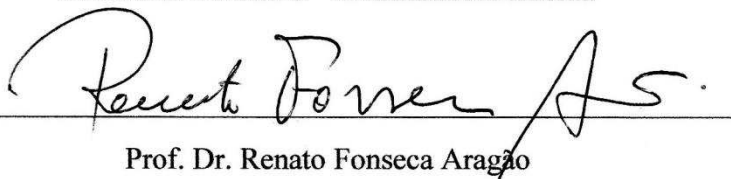
Profª Drª Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva

UAF/CCT/UFCG – Examinadora externa



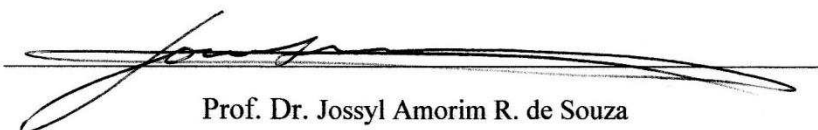
Profª Drª Márcia Rejane de Q. Almeida Azevedo

DAA/CCAA/UEPB – Examinadora externa



Prof. Dr. Renato Fonseca Aragão

UAEAl/CTRN/UFCG – Examinador externo



Prof. Dr. Jossyl Amorim R. de Souza

UAF/CCT/UFCG – Examinador externo

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por Kalina Lígia Cavalcante de Almeida Farias Aires e aprovada pela banca examinadora em 26 de agosto de 2016.



Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva

UAF/CCT/UFCG – Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

A Deus, a quem devo tudo em minha vida, Toda Honra e Toda Glória.

À minha mãe, Edviges Pereira Cavalcante, por ter exercido o papel de pai e mãe com maestria, sendo exemplo de honestidade, responsabilidade e generosidade.

Ao meu pai, Carlos Barbosa de Almeida (*in memorian*), por seu amor e pelas lições de fé em Deus, sobretudo, no final de sua vida.

Ao meu esposo, Juarez Everton de Farias Aires, por nosso amor, companheirismo e cumplicidade em todos os momentos. Por ser parte imprescindível da minha vida e me fazer sentir completa.

Aos meus filhos, Abdias Aires de Queiroz Neto e Mateus Cavalcante de Almeida Farias Aires, por terem me mostrado um amor imensurável e serem responsáveis pelos momentos mais felizes de minha vida.

Aos meus irmãos Carlos César Cavalcante de Almeida e Silvio Romero Cavalcante de Almeida, que, juntamente com suas famílias, proporcionam a certeza do quão forte é o amor que nos une.

Ao meu tio Guilherme Pereira Cavalcante (*in memorian*), pelo apoio dado durante toda minha vida e por sua presença em diversos momentos, exercendo o papel de pai.

À família Farias Aires, nas pessoas de Sr. Abdias (*in memorian*) e D. Terezinha (*in memorian*), extensão da minha família, pelo acolhimento, amor e convivência harmoniosa.

A toda minha família, pelo amor e união existentes entre nós.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que está presente em todos os momentos de minha vida e que, por diversas vezes, me deu provas de que quando nos esforçamos e fazemos a nossa parte, Ele nos ajuda.

A Juarez, por sua ajuda em diversos aspectos: no desenvolvimento do otimizador, nos experimentos, nas sugestões e incentivos. Enfim, por compartilhar de sua sabedoria, experiência e generosidade.

À minha mãe Edviges, pelas orações, pelo apoio e presença constantes. Por toda doação e amor a mim dedicados.

Aos meus filhos, Abdias e Mateus, que me fazem sentir mais forte para enfrentar as dificuldades naturais da vida e despertam em mim, a cada dia, a vontade de ser melhor como ser humano.

Ao meu orientador Dr. Wilton Pereira da Silva, por sua generosidade, dedicação e apoio constantes. Sinto-me honrada de ter sido aluna deste Professor, que, com toda sua inteligência, capacidade e conhecimento, transmite os seus ensinamentos com humildade, dedicação e simplicidade de maneira singular. Serei eternamente grata.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Wilton Pereira da Silva, Dra. Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva, Dr. Jossyl Amorim R. de Souza, Dra. Márcia Rejane de Q. Almeida Azevedo, Dr. Renato Fonseca Aragão, Dra. Vera Solange de Oliveira Farias, pelas valiosas contribuições concedidas a este trabalho e pelo respeito com o qual me dispensaram durante as apresentações inerentes a cada etapa do Doutorado, transmitindo tranquilidade e minimizando a apreensão e ansiedade características destas ocasiões.

À Dra. Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva pela dedicação, generosidade e atenção a mim dispensadas em todos os nossos encontros.

À Dra. Vera Solange de Oliveira Farias pela a atenção e disponibilidade em me orientar no início do curso e pelo carinho com o qual sempre me tratou.

Aos meus irmãos Carlos César e Silvio, e suas respectivas famílias, pela torcida, orações e momentos de alegria sempre que nos reunimos.

À família Farias Aires na qual me sinto membro, com toda intimidade e amor peculiares que a palavra “família” fomenta.

À Coordenação e ao corpo docente da Pós-graduação em Engenharia de Processos, em particular, aos professores que tive a honra de estudar: Dr.Wilton Pereira da Silva, Dr. Marcos José de Almeida Gama, Dr.Antonio Gilson B. de Lima, Dr.Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata e Dra.Maria Elita M. Duarte.

A todo corpo docente e administrativo do IFPB, em particular, aos professores que fazem parte da Coordenação de Matemática, pelo apoio à minha licença para a realização deste trabalho.

Às professoras Dra. Joselí Maria da Silva e Dra. Marta Maria Maurício Macena pelo esforço no sentido de conseguir o meu afastamento do trabalho em sala de aula, para a dedicação ao doutorado.

Ao colega de doutorado e sobrinho Fernando Antonio de Farias Aires Júnior e à minha mãe Edviges, pelo empréstimo dos seus computadores para a utilização no processo de otimização, necessário a esta pesquisa.

À amiga e colega de doutorado Célia Rufino pela amizade, pelo incentivo a ingressar neste curso e por ter me apresentado ao Professor Wilton.

Ao amigo Aluizio Freire, pelo companheirismo, convivência harmoniosa e compartilhamento de momentos alegres e de trabalho, durante os experimentos e as disciplinas cursadas.

À colega Deise Castro com a qual tive a primeira experiência com desidratação osmótica, o que muito me ajudou durante os meus próprios experimentos.

À colega Renata Duarte, pelo apoio e disponibilidade em facilitar o acesso ao Laboratório de Engenharia de Alimentos da UFCG.

Aos colegas de doutorado Juarez, Aluízio, Célia, Jacqueline, Antônio, Fabrício, Rubens, Waldemir, Juliana, Fernando Júnior, dentre outros, pela convivência harmoniosa durante o curso.

Ao Professor Dr. Nelson Nery, meu orientador do mestrado, pela carta de recomendação e a quem sou eternamente grata, pelo respeito com o qual sempre me tratou.

A todos os meus ex-professores e ex-alunos, que, certamente, contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal.

À antiga Escola Cenecista de Cabaceiras, atual Escola Estadual Abdias Aires de Queiroz, aonde estudei durante o Ensino Fundamental II e Médio e tive a honra de estrear como professora, experiência enriquecedora em minha vida profissional.

A todos os familiares e amigos que, de alguma forma, torceram para que eu conquistasse este título.

A todos os que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

Madre Teresa de Calcutá

Resumo

No presente trabalho, foi realizado um estudo acerca da desidratação osmótica e secagem convectiva de maçã, cortada em forma de paralelepípedo, descrita por meio de modelos difusivos, considerando-se o encolhimento da fruta e a difusividade de massa variável. A solução numérica da equação de difusão tridimensional em coordenadas cartesianas foi obtida através do método dos volumes finitos, com uma formulação totalmente implícita e condição de contorno de primeiro tipo. Experimentos laboratoriais de desidratação osmótica, em solução de sacarose, e secagem convectiva, foram realizados em diversas condições operacionais, aplicando-se uma determinada metodologia. Um código computacional foi desenvolvido na linguagem FORTRAN, composto por um otimizador, baseado no método inverso, acoplado à solução numérica da equação de difusão, com interface gráfica. O programa referente à solução numérica fornece a cinética da transferência de massa de água ou de sacarose, quando são conhecidos os parâmetros de processo. Os parâmetros de processo são determinados por otimização usando um conjunto de dados experimentais, através da minimização de uma função objetivo, denominada qui-quadrado. Vários testes de validação do programa computacional foram executados, os quais apresentaram resultados satisfatórios e coerentes quando comparados com a literatura. Para a secagem convectiva, a condição de contorno de terceiro tipo foi considerada mais adequada. Foram apresentados os resultados das cinéticas relativas à desidratação osmótica (água e sacarose) e à secagem convectiva. A temperatura de processo e a concentração da solução osmótica exerceram influência sobre os dois fenômenos, porém, a temperatura foi preponderante. Foi realizado um estudo da distribuição de massa de água e sacarose durante a desidratação osmótica e da distribuição de água, durante a secagem convectiva. Os resultados obtidos através dos modelos matemáticos que consideraram a difusividade variável e o encolhimento tiveram uma maior adequação aos dados experimentais.

Palavras-chave: Desidratação osmótica, secagem convectiva, otimização, simulação, método dos volumes finitos.

Abstract

In the present work, a study was conducted on the osmotic dehydration and convective drying of apple, sliced in parallelepiped shape, described by diffusion models, considering fruit shrinkage and variable mass diffusivity. The numerical solution of three-dimensional diffusion equation in Cartesian coordinates has been obtained by the method of finite volumes with fully implicit formulation and first kind boundary condition. The experiments on osmotic dehydration (sucrose solution) and convective drying were performed at several operating conditions. A computer code was developed in FORTRAN, comprising an optimizer based on the inverse method, coupled with the numerical solution of the diffusion equation, with a graphical user interface. The program concerning the numerical solution provides the kinetics of the mass transfer of water or sucrose, when the process parameters are known. The process parameters for optimization are determined by using a set of experimental data, through minimizing an objective function, known as chi-square. Several validation tests have been performed on the program. These tests produced satisfactory and consistent results when compared to other experiments cited in the literature. For convective drying, the boundary condition of the third kind has been considered more appropriate. Results are presented on the kinetics of osmotic dehydration (water and sucrose) and convective drying. The process temperature and osmotic solution concentration had an impact on the two phenomena, but the temperature was most predominant. A study on mass distribution of water and sucrose during the osmotic dehydration and on water distribution during convective drying was accomplished. The results obtained through mathematical models, considering variable mass diffusivities and shrinkage proved to be a better match to the experimental data.

Keywords: Osmotic dehydration, convective drying, optimization, simulation, finite volume method.

Sumário

Resumo	XI
Abstract	XII
Lista de Figuras	XVIII
Lista de Tabelas	XXIX
Nomenclatura	XXXIV
Capítulo 1: Introdução.....	1
1.1. Objetivo geral.....	4
1.2. Objetivos específicos.....	4
Capítulo 2: Revisão bibliográfica.....	6
2.1. Transferência de massa na desidratação.....	7
2.2. Contração volumétrica na desidratação.....	8
2.3. Principais fatores que influenciam a desidratação osmótica.....	9
2.3.1. Agentes osmóticos.....	9
2.3.2. Concentração da solução e proporção entre alimento e solução.....	10
2.3.3. Tamanho e geometria.....	11
2.3.4. Temperatura.....	12
2.3.5. Agitação do meio osmótico.....	13
2.4. Otimização do processo.....	13
2.5. Modelos matemáticos.....	15
2.5.1. Modelos que envolvem a Termodinâmica de Processos Irreversíveis..	16
2.5.2. Modelos empíricos.....	17
2.5.3. Modelos difusivos.....	19
2.6. A equação geral de transporte.....	20
2.7. A equação de difusão.....	21
2.8. Condições iniciais e de contorno.....	22
2.9. Métodos de resolução da equação de difusão.....	23
2.9.1. Métodos analíticos.....	24

2.9.1.1.	Solução analítica unidimensional com condição de contorno de primeiro tipo em coordenadas retangulares.....	25
2.9.1.2.	Solução analítica bidimensional com condição de contorno de primeiro tipo em coordenadas retangulares.....	26
2.9.1.3.	Solução analítica tridimensional com condição de contorno de primeiro tipo em coordenadas retangulares.....	28
2.9.1.4.	O uso de soluções analíticas da equação de difusão na desidratação osmótica.....	30
2.9.2.	Métodos numéricos.....	31
2.9.2.1.	O método dos volumes finitos (MVF).....	32
2.9.2.2.	Métodos iterativos para sistemas lineares: Método de Gauss-Seidel.....	35
2.9.2.3.	O uso de métodos numéricos na desidratação osmótica.....	35
2.10.	Estimativa dos parâmetros de processo na desidratação osmótica.....	38
2.11.	A maçã.....	39
2.11.1.	Produção mundial e nacional.....	41
2.11.2.	Desidratação osmótica (DO) de maçã.....	43
2.12.	Secagem de alimentos.....	46
2.12.1.	Secagem precedida por desidratação osmótica.....	48
Capítulo 3:	Materiais e métodos	52
3.1.	Discretização da equação de difusão tridimensional.....	52
3.1.1.	Discretização dos volumes de controle internos.....	56
3.1.2.	Discretização dos volumes de controle norte-frente.....	58
3.1.3.	Discretização dos volumes de controle leste-sul-atrás.....	60
3.1.4.	Discretização dos volumes de controle oeste-atrás-norte.....	62
3.1.5.	Avaliação de Γ^Φ nas faces dos volumes de controle.....	64
3.1.6.	Valor médio da grandeza de interesse.....	66
3.1.7.	Variação volumétrica.....	67
3.1.8.	O uso da simetria.....	68
3.2.	Determinação dos parâmetros de processo via otimização.....	69

3.2.1.	Interpolação linear.....	70
3.2.2.	Indicadores estatísticos.....	71
3.2.3.	Expressões para a difusividade.....	72
3.2.4.	Algoritmo de otimização.....	73
3.3.	Metodologia experimental.....	81
3.3.1.	Equipamentos utilizados.....	81
3.3.2.	Matéria-prima.....	84
3.3.3.	A desidratação osmótica.....	86
3.3.3.1.	O encolhimento durante a DO.....	90
3.3.4.	A secagem.....	91
3.3.4.1.	O encolhimento durante a secagem.....	94
3.4.	Metodologia computacional.....	95
Capítulo 4: Resultados e discussão		97
4.1.	A interface gráfica do software desenvolvido.....	97
4.1.1.	O menu “Arquivo”.....	98
4.1.1.1.	As simulações.....	99
4.1.1.2.	A otimização.....	102
4.1.2.	O menu “Resultados”.....	103
4.1.2.1.	Resultados da simulação.....	104
4.1.2.2.	Resultados da otimização.....	105
4.2.	Validação do programa computacional.....	106
4.2.1.	Uso de soluções analíticas da equação de difusão tridimensional na validação do programa desenvolvido.....	107
4.2.2.	Testes de consistência para a solução numérica.....	113
4.2.2.1.	Teste de consistência: parâmetros constantes.....	114
4.2.2.2.	Teste de consistência: parâmetros variáveis.....	118
4.2.3.	Teste de coerência para a solução numérica.....	125
4.2.4.	Teste de simetria.....	127
4.2.5.	Validação do otimizador.....	130
4.2.5.1.	Difusividade constante.....	131
4.2.5.2.	Difusividade variável.....	136

4.3.	A desidratação osmótica: resultados, análises e discussão.....	140
4.3.1.	A escolha da condição de contorno na DO.....	144
4.3.2.	Os modelos adotados na modelagem matemática da desidrataçã osmótica.....	147
4.3.3.	Resultados obtidos através do modelo 1.....	148
4.3.4.	Resultados obtidos através do modelo 2.....	153
4.3.5.	A distribuição de água e sacarose no interior do produto: uma análise complementar.....	174
4.3.5.1.	A distribuição de água.....	175
4.3.5.2.	A distribuição de sacarose.....	179
4.4.	A secagem.....	183
4.4.1.	A escolha da condição de contorno para a secagem convectiva.....	185
4.4.2.	Um otimizador para uma solução numérica qualquer.....	187
4.4.3.	Os modelos adotados na modelagem matemática da secagem.....	191
4.4.4.	Resultados obtidos através do modelo 1.....	191
4.4.5.	Resultados obtidos através do modelo 2.....	193
4.4.6.	Comparação entre os modelos 1 e 2.....	201
4.4.7.	A distribuição do teor de umidade no interior do produto ao longo da secagem complementar utilizando-se o modelo 2.....	202
Capítulo 5:	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	207
5.1.	Conclusões.....	207
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	210
Referências bibliográficas:	211
Apêndice:	225
A.	Cinéticas da desidrataçã osmótica.....	225
A.1.	Experimento 1: 40 °Brix e 40 °C.....	225
A.2.	Experimento 2: 60 °Brix e 40 °C.....	227
A.3.	Experimento 3: 40 °Brix e 60 °C.....	228

A.4.	Experimento 4: 60 °Brix e 60 °C.....	229
B.	Cinéticas da secagem.....	230
B.1.	Secagem a 40 °C.....	230
B.2.	Secagem a 60 °C.....	234

Lista de Figuras

Figura 2.1:	Domínio contínuo unidimensional.....	25
Figura 2.2:	Domínio contínuo bidimensional.....	26
Figura 2.3:	(a) Sistema cartesiano; (b) Domínio contínuo tridimensional.....	28
Figura 2.4:	Funções de interpolação no tempo (Adaptado de Maliska, 2010).....	33
Figura 2.5:	Esquema da formulação explícita (Adaptado de Silva, 2009).....	33
Figura 2.6:	Esquema da formulação implícita (Adaptado de Silva, 2009).....	34
Figura 2.7:	Esquema da formulação totalmente implícita (Adaptado de Silva, 2009).....	34
Figura 2.8:	Curvas típicas de secagem (Adaptado de Park et al., 2001).....	46
Figura 3.1:	Domínio tridimensional discreto com 27 tipos distintos de VC.....	53
Figura 3.2:	Esquema de orientação da malha tridimensional (Adaptado de Silva, 2009).....	53
Figura 3.3:	Volume de controle interno.....	56
Figura 3.4:	Volume de controle norte – frente.....	58
Figura 3.5:	Volume de controle leste – sul – atrás.....	60
Figura 3.6:	Volume de controle oeste – atrás – norte.....	62
Figura 3.7:	(a) Volumes de controle adjacentes com interfaces em comum; (b) Volumes de controle adjacentes com um plano vertical passando pelos pontos nodais P e S.....	64
Figura 3.8:	Volumes de controle adjacentes com Γ^Φ igual a: (a) Γ_P^Φ e Γ_S^Φ ; (b) Γ_{eq}^Φ	65
Figura 3.9:	Sólido com dimensões L_x , L_y e L_z	67
Figura 3.10:	(a) Domínio computacional; (b) 1/8 do paralelepípedo destacado; (c) 7/8 do domínio, destacando as fronteiras da parte equivalente a 1/8, que foi removida.....	68

Figura 3.11:	Novo domínio computacional, correspondente à oitava parte do domínio original.....	69
Figura 3.12:	Esquema para a obtenção de $\bar{\Phi}_i$ através de interpolação linear.....	71
Figura 3.13:	Esboço do gráfico da função qui-quadrado considerando-se o: (a) valor ótimo à direita do valor inicial a_0 ; (b) valor ótimo à esquerda do valor inicial a_0	75
Figura 3.14:	Esboço do gráfico da função qui-quadrado considerando-se $\chi_5^2 > \chi_4^2$	76
Figura 3.15:	Esboço do gráfico da função qui-quadrado na qual $\chi_5^2 > \chi_4^2$, considerando-se: (a) $\chi_6^2 > \chi_7^2$; (b) $\chi_6^2 < \chi_7^2$	77
Figura 3.16:	Esboço do gráfico da função qui-quadrado considerando-se $\chi_4^2 > \chi_5^2$	77
Figura 3.17:	Esboço do gráfico da função qui-quadrado na qual $\chi_4^2 > \chi_5^2$, considerando-se: (a) $\chi_6^2 > \chi_7^2$; (b) $\chi_6^2 < \chi_7^2$	78
Figura 3.18:	Esboço do gráfico do qui-quadrado com valor ótimo à esquerda dos valores iniciais.....	78
Figura 3.19:	Diagrama explicativo do algoritmo otimizador.....	80
Figura 3.20:	(a) Estufa de secagem e esterilização; (b) Estufa bacteriológica.....	81
Figura 3.21:	Balança digital: (a) AAKER; (b) GEHAKA.....	82
Figura 3.22:	(a) Paquímetro digital; (b) Refratômetro digital.....	82
Figura 3.23:	(a) Dessecador; (b) Termômetro digital.....	82
Figura 3.24:	(a) Anemômetro digital; (b) Higrômetro digital.....	83
Figura 3.25:	Estufa com circulação e renovação de ar.....	83
Figura 3.26:	Exemplar de maçã Gala utilizada nos experimentos.....	84
Figura 3.27:	Maçãs imersas em hipoclorito de sódio.....	84
Figura 3.28:	(a) Cortador de legumes; (b) Maçãs em forma de paralelepípedo.....	85
Figura 3.29:	Amostra <i>in natura</i> em triplicata.....	85
Figura 3.30:	(a) Cestas teladas; (b) Recipientes na estufa com as cestas imersas na solução osmótica.....	86
Figura 3.31:	Amostras de maçã após DO a 40 °Brix e 60 °C.....	87

Figura 3.32:	Amostras usadas na cinética do encolhimento na DO.....	90
Figura 3.33:	Amostras <i>in natura</i> e osmoticamente desidratadas a 60 °C por 1800 minutos.....	91
Figura 3.34:	Maçãs osmoticamente desidratadas (a) 40 °Brix e 60 °C; (b) 60 °Brix e 60 °C.....	92
Figura 3.35:	Amostras após secagem a 40 °C: (a) DO: 40 °Brix e 40 °C; (b) DO: 60 °Brix e 40 °C.....	93
Figura 3.36:	Amostras usadas na cinética do encolhimento durante a secagem com temperatura de 60 °C: (a) antes da secagem; (b) após a secagem.....	95
Figura 4.1:	Tela inicial da interface gráfica.....	98
Figura 4.2:	Tela inicial da interface com destaque para o menu Arquivo.....	98
Figura 4.3:	Arquivo de texto no qual são inseridos os dados iniciais.....	99
Figura 4.4:	Caixa de diálogo na qual é possível o usuário: (a) optar pela expressão para as dimensões do sólido; (b) inserir os valores dos parâmetros das referidas expressões.....	100
Figura 4.5:	Caixa de diálogo na qual é possível o usuário: (a) optar pela função difusividade; (b) inserir os parâmetros para a função difusividade...	100
Figura 4.6:	Caixa de diálogo na qual é possível o usuário: (a) decidir se quer obter a cinética para um volume de controle específico; (b) determinar a posição do volume de controle caso a resposta do item (a) seja positiva.....	101
Figura 4.7:	Caixa de diálogo na qual é possível o usuário: (a) decidir se quer gerar a malha para a obtenção da distribuição da grandeza de interesse; (b) escolher o plano e seis instantes de tempo.....	101
Figura 4.8:	Caixa de diálogo na qual é possível o usuário: (a) optar pela obtenção da cinética em volumes de controle contidos no plano k escolhido; (b) escolher os volumes de controle.....	102
Figura 4.9:	Tela na qual os dados experimentais são inseridos.....	103
Figura 4.10:	Tela inicial da interface gráfica com o menu "Resultados" em destaque.....	103
Figura 4.11:	Arquivo de texto com o resultado de uma simulação.....	104
Figura 4.12:	Exemplo de um arquivo de texto "Grid.txt"	105

Figura 4.13:	Caixa de diálogo com os resultados obtidos através de uma otimização.....	105
Figura 4.14:	Arquivo com o resultado de uma otimização.....	106
Figura 4.15:	Cinética da quantidade média de água obtida por simulação através da solução analítica.....	109
Figura 4.16:	Cinética da quantidade média de água obtida por simulação através do programa desenvolvido.....	110
Figura 4.17:	Superposição dos valores médios da quantidade de água obtidos através das soluções analítica e numérica.....	110
Figura 4.18:	Valores médios da quantidade de sacarose obtidos por meio da: (a) solução analítica; (b) solução numérica.....	111
Figura 4.19:	Superposição dos gráficos dos valores médios da quantidade de sacarose.....	112
Figura 4.20:	Paralelepípedo discretizado – Malha dividida em 7 x 5 x 3 volumes de controle.....	113
Figura 4.21:	Cinética do teor de umidade X nos volumes de controle: (a) VC(1,1,1); (b) VC(7,1,1); (c) VC(1,1,3); (d) VC(7,1,3).....	115
Figura 4.22:	Superposição dos transientes do teor de umidade nos volumes de controle localizados nos vértices inferiores.....	115
Figura 4.23:	Cinéticas do teor de umidade X nos volumes de controle: (a) VC(1,5,1); (b) VC(7,5,1); (c) VC(1,5,3); (d) VC(7,5,3).....	117
Figura 4.24:	Superposição das cinéticas do teor de umidade nos volumes de controle localizados nos vértices superiores.....	117
Figura 4.25:	Superposição da quantidade de sacarose nos volumes de controle localizados no centro das faces norte e sul.....	120
Figura 4.26:	Superposição dos gráficos da quantidade de sacarose QS nos centros das faces oeste e leste.....	121
Figura 4.27:	Superposição dos valores da quantidade de sacarose QS nos volumes de controle dos centros das faces atrás e frente.....	122
Figura 4.28:	Superposição dos valores de QS nos volumes de controle VC (3,4,2) e VC (5,4,2).....	123
Figura 4.29:	Volume do paralelepípedo obtido por simulação.....	124

Figura 4.30:	Comportamento do teor de umidade X nos volumes de controle 1, 2 e 3.....	126
Figura 4.31:	Cinética da quantidade de água obtida com o paralelepípedo inteiro.....	128
Figura 4.32:	Cinética da quantidade de água obtida com o uso da simetria.....	129
Figura 4.33:	Superposição das cinéticas da quantidade de água obtidas sem e com o uso da simetria.....	129
Figura 4.34:	Superposição dos gráficos das cinéticas obtidas através dos pontos experimentais e simulados pelo otimizador.....	133
Figura 4.35:	Superposição entre os gráficos obtidos através dos pontos experimentais e simulados na absorção de água em materiais compósitos, com difusividade constante.....	135
Figura 4.36:	Superposição dos gráficos obtidos através dos pontos experimentais e simulados pelo otimizador na desidratação osmótica de goiaba.....	139
Figura 4.37:	Efeito da concentração da solução osmótica e da temperatura sobre a quantidade média final de água ($A = 2,501 \times 10^5$ e $B = - 1,138$)....	141
Figura 4.38:	Efeito da concentração da solução osmótica e da temperatura sobre a quantidade média final de sacarose ($A = 5,117$ e $B = 0,344$).....	142
Figura 4.39:	Cinéticas referentes à quantidade de: (a) água, (b) sacarose, obtidas através do Experimento 1.....	142
Figura 4.40:	Cinéticas referentes à quantidade de: (a) água, (b) sacarose, obtidas através do Experimento 2.....	143
Figura 4.41:	Cinéticas referentes à quantidade de: (a) água, (b) sacarose, obtidas através do Experimento 3.....	143
Figura 4.42:	Cinéticas referentes à quantidade de: (a) água, (b) sacarose, obtidas através do Experimento 4.....	143
Figura 4.43:	Cinéticas das quantidades de água obtidas considerando-se as condições de contorno de primeiro e terceiro tipos referentes ao: a) Experimento 1; b) Experimento 2.....	145
Figura 4.44:	Cinéticas das quantidades de água obtidas considerando-se as condições de contorno de primeiro e terceiro tipos referentes ao: a) Experimento 3; b) Experimento 4.....	145

Figura 4.45:	Cinéticas das quantidades de sacarose obtidas considerando-se as condições de contorno de primeiro e terceiro tipos referentes ao: a) Experimento 1; b) Experimento 2.....	146
Figura 4.46:	Cinéticas das quantidades de sacarose obtidas considerando-se as condições de contorno de primeiro e terceiro tipos referentes ao: a) Experimento 3; b) Experimento 4.....	147
Figura 4.47:	Superposição das cinéticas obtidas através dos dados experimentais e os resultados simulados para o Experimento 1 usando-se o modelo 1, referentes a quantidade de: a) água; (b) sacarose.....	150
Figura 4.48:	Superposição das cinéticas obtidas através dos dados experimentais e os resultados simulados para o Experimento 2 usando-se o modelo 1, referentes à quantidade de: (a) água; b) sacarose.....	150
Figura 4.49:	Superposição das cinéticas obtidas através dos dados experimentais e os resultados simulados para o Experimento 3 usando-se o modelo 1, referentes à quantidade de: a) água; b) sacarose.....	151
Figura 4.50:	Superposição das cinéticas obtidas através dos dados experimentais e os resultados simulados para o Experimento 4 usando-se o modelo 1, referentes à quantidade de: a) água; b) sacarose.....	151
Figura 4.51:	Ajuste da função linear às dimensões do sólido em função da quantidade de água.....	155
Figura 4.52:	Ajuste da função linear às dimensões do sólido em função da quantidade de sacarose.....	155
Figura 4.53:	Superposição das funções que representam às difusividades efetivas de massa relativas à quantidade de: a) água; b) sacarose....	163
Figura 4.54:	Difusividades efetivas médias e difusividades efetivas de massa em função dos valores locais das quantidades de: a) água; b) sacarose, obtidas para o Experimento 1 (40 °Brix, 40 °C).....	164

Figura 4.55:	Difusividades efetivas médias e difusividades efetivas de massa em função dos valores locais das quantidades de: a) água; b) sacarose, obtidas para o Experimento 2 (60 °Brix, 40 °C).....	164
Figura 4.56:	Difusividades efetivas médias e difusividades efetivas de massa em função dos valores locais das quantidades de: a) água; b) sacarose, obtidas para o Experimento 3 (40 °Brix, 60 °C).....	165
Figura 4.57:	Difusividades efetivas médias e difusividades efetivas de massa em função dos valores locais das quantidades de: a) água; b) sacarose, obtidas para o Experimento 4 (60 °Brix, 60 °C).....	165
Figura 4.58:	Superposição entre os dados experimentais e os resultados simulados obtidos através do modelo 2 relativos à quantidade de: (a) água; (b) sacarose, para o Experimento 1.....	166
Figura 4.59:	Superposição entre os dados experimentais e os resultados simulados usando-se o modelo 2 relativos à quantidade de: (a) água; (b) sacarose, para o Experimento 2.....	167
Figura 4.60:	Superposição entre os dados experimentais e os resultados simulados obtidos usando-se o modelo 2, relativos à quantidade de: (a) água; (b) sacarose, para o Experimento 3.....	167
Figura 4.61:	Superposição entre os dados experimentais e os resultados simulados obtidos usando-se o modelo 2, relativos à quantidade de: (a) água; (b) sacarose, para o Experimento 4.....	168
Figura 4.62:	Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para o Experimento 1, através dos modelos 1 e 2, referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.....	168
Figura 4.63:	Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para o Experimento 2, através dos modelos 1 e 2, referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.....	169
Figura 4.64:	Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para o Experimento 3, através dos modelos 1 e 2, referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.....	169
Figura 4.65:	Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para o Experimento 4, através dos modelos 1 e 2, referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.....	169

Figura 4.66:	Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para a temperatura de 40 °C e concentrações de 40 e 60 °Brix referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.....	170
Figura 4.67:	Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para a temperatura de 60 °C e concentrações de 40 e 60 °Brix referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.....	171
Figura 4.68:	Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para a concentração de 40 °Brix e temperatura de 40 e 60 °C referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.....	171
Figura 4.69:	Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para a concentração de 60 °Brix e temperatura de 40 e 60 °C referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.....	172
Figura 4.70:	Superposição entre a cinética da quantidade de água e a taxa de variação instantânea, referente ao Experimento 2.....	173
Figura 4.71:	Superposição entre a cinética da quantidade de sacarose e a taxa de variação instantânea, referente ao Experimento 2.....	173
Figura 4.72:	Domínio cartesiano tridimensional com destaque para os planos que contém os pontos nodais dos volumes de controle VC(i, j, k) cujas coordenadas k tem valores k = 12, k = 23, k = 34 ou k = 44...	174
Figura 4.73:	Distribuição da quantidade de água nos volumes de controle pertencentes ao Plano 23 nos instantes: (a) 30, (b) 60, (c) 180, (d) 240, (e) 480 e (f) 720 minutos, a partir do início do Experimento 1	175
Figura 4.74:	Distribuição da quantidade de água no instante de 240 min nos volumes de controle contidos no:(a) Plano 44, (b) Plano 34, (c) Plano 23, referente ao Experimento 2.....	176
Figura 4.75:	Malha utilizada no estudo da distribuição de água e sacarose no Plano 12, com destaque para quatro volumes de controle	177
Figura 4.76:	Distribuição da quantidade de água no Plano 12 nos instantes: (a) 30, (b) 60, (c) 180, (d) 240, (e) 480 e (f) 720 minutos, a partir do início do Experimento 3.....	177

Figura 4.77:	Evolução da quantidade de água nos volumes de controle VC(1,31,12), VC(16,16,12), VC(24,16,12) e VC(31,16,12) do início do Experimento 3 até o instante de 720 minutos.....	178
Figura 4.78:	Distribuição da quantidade de água nos instantes de 30, 60 e 180 minutos a partir do início do Experimento 4 no: (a) Plano 12; (b) Plano 34.....	179
Figura 4.79:	Distribuição da quantidade de sacarose nos volumes de controle pertencentes ao Plano 34 nos instantes: (a) 30, (b) 60, (c) 180, (d) 240, (e) 480 e (f) 720 minutos, a partir do início do Experimento 1	180
Figura 4.80:	Distribuição da quantidade de sacarose no instante de 240 min nos volumes de controle contidos no: (a) Plano 44, (b) Plano 34, (c) Plano 23, referente ao Experimento 2.....	180
Figura 4.81:	Distribuição da quantidade de sacarose no Plano 12 nos instantes: (a) 30, (b) 60, (c) 180, (d) 240, (e) 480 e (f) 720 minutos, a partir do início do Experimento 3.....	181
Figura 4.82:	Evolução da quantidade de sacarose nos volumes de controle VC(1,31,12), VC(16,16,12), VC(24,16,12) e VC(31,16,12) do início do Experimento 3 até o instante de 720 minutos.....	181
Figura 4.83:	Distribuição da quantidade de sacarose nos instantes de 30, 60 e 180 minutos a partir do início do Experimento 4 no: (a) Plano 12; (b) Plano 34.....	182
Figura 4.84:	Cinéticas das secagens: (a) Sec1 (DO: 40 °Brix, 40 °C); (b) Sec2 (DO: 60 °Brix, 40 °C), realizadas com temperatura de 40 °C.....	184
Figura 4.85:	Cinéticas das secagens: (a) Sec3 (DO: 40 °Brix, 60 °C); (b) Sec4 (DO: 60 °Brix, 60 °C), realizadas com temperatura de 60 °C.....	184
Figura 4.86:	Superposição das cinéticas relativas a Sec1, obtidas utilizando-se as condições de primeiro e terceiro tipos.....	186
Figura 4.87:	Superposição das cinéticas relativas a Sec2, obtidas utilizando-se as condições de primeiro e terceiro tipos.....	186
Figura 4.88:	Superposição das cinéticas relativas a Sec3, obtidas utilizando-se as condições de primeiro e terceiro tipos.....	186

Figura 4.89:	Superposição das cinéticas relativas a Sec4, obtidas utilizando-se as condições de primeiro e terceiro tipos.....	187
Figura 4.90:	Exemplo de arquivo "exp.txt", a ser provido pelo usuário do LS <i>Software</i>	188
Figura 4.91:	Exemplo de arquivo "Parameters.txt", provido pelo usuário do LS <i>Software</i> , a ser usado pelo solver criado pelo usuário.....	189
Figura 4.92:	Modificação no início do código fonte original do solver para ler os arquivos "exp.txt" e "Parameters.txt".....	190
Figura 4.93:	Código a ser acrescentado antes do <i>loop</i> no tempo para abrir um arquivo com o nome esperado pelo LS <i>Optimizer</i> , a partir do valor estipulado para a variável "information".....	190
Figura 4.94:	Cinéticas obtidas através do modelo 1, relativas a: (a) Sec1; (b) Sec2.....	192
Figura 4.95:	Cinéticas obtidas através do modelo 1, relativas a: (a) Sec3; (b) Sec4.....	193
Figura 4.96:	Ajuste linear dos valores adimensionais L_x^* , L_y^* e L_z^* em função do teor médio de umidade \bar{X}^*	194
Figura 4.97:	Superposição das difusividades obtidas para os experimentos da secagem convectiva, realizadas com temperatura de: (a) 40 °C; b) 60°C.....	196
Figura 4.98:	Superposição dos gráficos da difusividade em função do teor local de umidade e a difusividade média relativa a: (a) Sec1 ; (b) Sec2...	197
Figura 4.99:	Superposição dos gráficos da difusividade em função do teor local de umidade e a difusividade média relativa a: (a) Sec3 ; (b) Sec4...	197
Figura 4.100:	Curva simulada e pontos experimentais relativos a: (a) Sec1; b) Sec2.....	198
Figura 4.101:	Curva simulada e pontos experimentais relativos a: (a) Sec3; (b) Sec4.....	198
Figura 4.102:	Superposição das cinéticas obtidas para as secagens realizadas com temperatura de: (a) 40 °C; (b) 60 °C.....	199
Figura 4.103:	Superposição das cinéticas obtidas para os quatro experimentos de secagem.....	200

Figura 4.104:	Superposição entre as cinéticas relativas a: (a) Sec1; (b) Sec2, obtidas através dos modelos 1 e 2.....	201
Figura 4.105:	Superposição entre as cinéticas relativas a: (a) Sec3; (b) Sec4, obtidas através dos modelos 1 e 2.....	201
Figura 4.106:	Teor de umidade no Plano 34 aos 30 minutos a partir do início da secagem: (a) Sec1; (b) Sec2; (c) Sec3; (d) Sec4.....	202
Figura 4.107:	Distribuição do teor de umidade obtido no instante de 240 minutos a partir do início da secagem Sec1 no: (a) Plano 44; (b) Plano 34; (c) Plano 23; (d) Plano 12.....	203
Figura 4.108:	Distribuição do teor de umidade no Plano 23, referente à Sec2, nos instantes: (a) 30; (b) 60; (c) 180; (d) 240 e (e) 480 minutos.....	204
Figura 4.109:	Plano central do domínio destacando os volumes de controle: VC(1,31,23), VC(16,16,23), VC(24,16,23), VC(31,16,23).....	204
Figura 4.110:	Cinéticas de secagem dos volumes de controle VC(1,31,23), VC(16,16,23), VC(24,16,23) e VC(31,16,23) referente a secagem Sec2.....	205
Figura 4.111:	Distribuição do teor de umidade no Plano 23 no instante de 180 minutos referente a secagem: (a)Sec1; (b) Sec2; (c) Sec3; (d) Sec4.....	206

Lista de Tabelas

Tabela 2.1:	Alguns modelos empíricos.....	18
Tabela 2.2:	Composição da maçã Fuji por 100g de parte comestível.....	40
Tabela 2.3:	Maçã - Produção mundial (em mil toneladas métricas).....	41
Tabela 2.4:	Suprimento de maçã no Brasil de 2006 a 2012.....	42
Tabela 3.1:	Expressões para a difusividade.....	73
Tabela 3.2:	Precisão e fator multiplicativo.....	74
Tabela 3.3:	Condições operacionais da secagem.....	92
Tabela 4.1:	Parâmetros físicos usados na simulação da solução numérica.....	107
Tabela 4.2:	Dados referentes à quantidade de água em função do tempo (SILVA et al., 2014b).....	108
Tabela 4.3:	Dados da quantidade média de sacarose em função do tempo.....	109
Tabela 4.4:	Valores médios da quantidade média de água obtidos através das soluções analítica e numérica.....	111
Tabela 4.5:	Valores médios da quantidade de sacarose obtidos através das soluções analítica e numérica.....	112
Tabela 4.6:	Parâmetros físicos usados na simulação para o teste de consistência.....	114
Tabela 4.7:	Volumes de controle localizados nos vértices inferiores do paralelepípedo.....	114
Tabela 4.8:	Cinética do teor de umidade X nos volumes de controle dos vértices inferiores em seis instantes distintos.....	116
Tabela 4.9:	Volumes de controle localizados nos vértices superiores do paralelepípedo.....	116
Tabela 4.10:	Valores de X nos volumes de controle dos vértices superiores em seis instantes.....	118
Tabela 4.11:	Parâmetros físicos obtidos na DO de goiaba (SILVA et al., 2014c).....	118
Tabela 4.12:	Volumes de controle localizados no centro de cada face.....	120

Tabela 4.13:	Quantidade de sacarose nos volumes de controle centrais das faces norte e sul.....	121
Tabela 4.14:	Quantidade de sacarose nos volumes de controle centrais das faces oeste e leste em seis instantes distintos.....	122
Tabela 4.15:	Quantidade de sacarose nos centros das faces atrás e frente em seis instantes distintos.....	123
Tabela 4.16:	Quantidade de sacarose nos VC(3,4,2) e VC(5,4,2) em seis instantes.....	124
Tabela 4.17:	Valores de V em seis instantes distintos.....	125
Tabela 4.18:	Volumes de controle usados no teste de coerência.....	126
Tabela 4.19:	Valores de X nos volumes de controle 1, 2 e 3.....	127
Tabela 4.20:	Parâmetros físicos usados na simulação para o teste de simetria.....	127
Tabela 4.21:	Valores da quantidade média de água obtidos em seis instantes distintos.....	130
Tabela 4.22:	Dados obtidos na DO de abacaxi.....	131
Tabela 4.23:	Pontos escolhidos aleatoriamente da cinética do ganho de sacarose na simulação da DO de abacaxi.....	132
Tabela 4.24:	Parâmetros obtidos nas simulações realizadas com o otimizador acoplado à solução numérica da equação de difusão tridimensional.....	132
Tabela 4.25:	Parâmetros obtidos pelo otimizador com valor inicial $D_{S_0} = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$	133
Tabela 4.26:	Parâmetros obtidos na absorção de água de materiais compósitos (SILVA et al., 2012).....	134
Tabela 4.27:	Pontos escolhidos aleatoriamente usados como pontos experimentais hipotéticos na absorção de água em materiais compósitos, com difusividade constante.....	134
Tabela 4.28:	Parâmetros obtidos pelo otimizador para cada valor inicial atribuído.....	135
Tabela 4.29:	Pontos escolhidos aleatoriamente para pontos experimentais hipotéticos na absorção de água em materiais compósitos, com difusividade variável.....	136

Tabela 4.30:	Parâmetros obtidos para a absorção de água em materiais compósitos com difusividade variável.....	137
Tabela 4.31:	Pontos escolhidos aleatoriamente para pontos experimentais fictícios na DO de goiaba.....	138
Tabela 4.32:	Parâmetros obtidos na otimização com difusividade variável na DO de goiaba.....	139
Tabela 4.33:	Dados referentes aos experimentos de desidratação osmótica de maçã.....	140
Tabela 4.34:	Parâmetros obtidos através das simulações com os softwares Prescribed e Convective para a quantidade de água.....	144
Tabela 4.35:	Parâmetros obtidos através das simulações com os softwares Prescribed e Convective para a quantidade de sacarose.....	146
Tabela 4.36:	Parâmetros de processo relativos à quantidade de água com o uso do modelo 1.....	149
Tabela 4.37:	Parâmetros de processo relativos à quantidade de sacarose com o uso do modelo 1.....	149
Tabela 4.38:	Parâmetros de ajuste da função linear aos valores adimensionais L_x^* , L_y^* e L_z^* em função das quantidades de água e sacarose.....	154
Tabela 4.39:	Expressões lineares em função da quantidade de água para as dimensões do sólido.....	156
Tabela 4.40:	Expressões lineares em função da quantidade de sacarose para as dimensões do sólido.....	157
Tabela 4.41:	Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de água para o Experimento 1.....	158
Tabela 4.42:	Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de água para o Experimento 2.....	158
Tabela 4.43:	Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de água para o Experimento 3.....	159
Tabela 4.44:	Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de água para o Experimento 4.....	159
Tabela 4.45:	Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de sacarose para o Experimento 1.....	160

Tabela 4.46:	Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de sacarose para o Experimento 2.....	160
Tabela 4.47:	Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de sacarose para o Experimento 3.....	161
Tabela 4.48:	Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de sacarose para o Experimento 4.....	161
Tabela 4.49:	Parâmetros relativos à difusividade de água.....	162
Tabela 4.50:	Parâmetros relativos à difusividade de sacarose.....	162
Tabela 4.51:	Nomenclatura e condições operacionais da secagem convectiva.....	183
Tabela 4.52:	Dados referentes aos experimentos de desidratação osmótica de maçã.....	183
Tabela 4.53:	Parâmetros obtidos através das simulações com os softwares Prescribed e Convective para a secagem.....	185
Tabela 4.54:	Parâmetros de processo relativos ao teor de umidade obtidos com o uso do modelo 1.....	192
Tabela 4.55:	Parâmetros de ajuste da função linear aos valores adimensionais L_x^* , L_y^* e L_z^* em função do teor médio de umidade adimensional \bar{X}^*	194
Tabela 4.56:	Expressões que representam as dimensões das amostras obtidas por ajuste de curvas.....	195
Tabela 4.57:	Parâmetros relativos a difusividade de água na secagem convectiva.....	196
Tabela 4.58:	Valores iniciais e de equilíbrio dos teores de umidade em base seca para os quatro experimentos de secagem.....	199
Tabela A.1:	Cinética da DO realizada a 40 °Brix e 40 °C.....	226
Tabela A.2:	Dimensões das amostras de maçã ao longo do Experimento 1 (40 °Brix e 40 °C).....	226
Tabela A.3:	Cinética da DO realizada a 60 °Brix e 40 °C.....	227
Tabela A.4:	Dimensões das amostras de maçã ao longo do Experimento 2 (60 °Brix e 40 °C).....	227
Tabela A.5:	Cinética da DO realizada a 40 °Brix e 60 °C.....	228

Tabela A.6:	Dimensões das amostras de maçã ao longo do Experimento 3 (40 °Brix e 60 °C).....	228
Tabela A.7:	Cinética da DO realizada a 60 °Brix e 60 °C.....	229
Tabela A.8:	Dimensões das amostras de maçã ao longo do Experimento 4 (60 °Brix e 60 °C).....	229
Tabela B.1:	Cinética da secagem a 40 °C: DO a 40 °Brix e 40 °C.....	230
Tabela B.2:	Dimensões das amostras de maçã durante a secagem a 40 °C: DO a 40 °Brix e 60 °C.....	231
Tabela B.3:	Cinética da secagem a 40 °C: DO a 60 °Brix e 40 °C.....	232
Tabela B.4:	Dimensões das amostras de maçã durante a secagem a 40 °C: DO a 60 °Brix e 60 °C.....	233
Tabela B.5:	Cinética da secagem a 60 °C: DO a 40 °Brix e 60 °C.....	234
Tabela B.6:	Dimensões das amostras de maçã durante a secagem a 60 °C: DO a 40 °Brix e 60 °C.....	235
Tabela B.7:	Cinética da secagem a 60 °C: DO a 60 °Brix e 60 °C.....	236
Tabela B.8:	Dimensões das amostras de maçã durante a secagem a 60 °C: DO a 60 °Brix e 60 °C.....	237

Nomenclatura

Letras Latinas

$A_P, A_w, A_e, A_n, A_s, A_f, A_b$:	Coefficientes da equação de difusão discretizada	[-]
A_i :	i -ésima amostra de maçã na metodologia experimental.....	[-]
A_{in} :	Amostra <i>in natura</i>	[-]
A_ℓ, A_m, A_k, A_q :	Coefficientes da solução analítica..	[-]
B :	Termo independente de Φ na equação de difusão discretizada.....	[-]
B_ℓ, B_m, B_k, B_q :	Coefficientes da solução analítica.....	[-]
°Brix :	Uma unidade corresponde a 1 g de sólidos solúveis por 100g de solução osmótica.....	[g/g]
b.s. :	Base seca.....	[-]
D_{ef} :	Difusividade efetiva de massa.....	[m ² s ⁻¹]
D_{A_0} :	Difusividade inicial de água.....	[m ² min ⁻¹]
D_A :	Difusividade de água.....	[m ² min ⁻¹]
D_{S_0} :	Difusividade inicial de sacarose.....	[m ² min ⁻¹]
D_S :	Difusividade de sacarose.....	[m ² min ⁻¹]
i, j, k :	Índices que indicam a posição na malha.....	[-]
m :	Massa da amostra.....	[kg]
m_{eq} :	Massa de equilíbrio.....	[kg]
m_{t_i} :	Massa no instante t_i	[kg]
MA :	Massa de água.....	[kg]
MA_0 :	Massa de água inicial.....	[kg]
MA_{t_i} :	Massa de água no instante t_i	[kg]
MA_{eq} :	Massa de água de equilíbrio.....	[kg]

MS:	Massa seca.....	[kg]
MS ₀ :	Massa seca inicial (sem incorporação de solutos.....	[kg]
MS _{t_i} :	Massa seca no instante t _i	[kg]
N _i , N _j , N _k :	Número de VC da malha.....	[-]
QA ₀ :	Quantidade de água no instante inicial.....	[%]
QA _{t_i} :	Quantidade de água no instante t _i	[%]
QA _{eq} :	Quantidade de água de equilíbrio.....	[%]
QS _{t_i} :	Quantidade de sacarose no instante t _i	[%]
QS:	Quantidade de sacarose.....	[%]
\overline{QS} :	Quantidade média de sacarose.....	[%]
QS _{eq} :	Quantidade média de sacarose.....	[%]
S:	Termo fonte na equação de difusão.....	[-]
\overline{S} :	Teor médio de soluto.....	[g/g]
S ₀ :	Teor de soluto inicial.....	[g/g]
S _{eq} :	Quantidade de soluto de equilíbrio.....	[%]
SG _{t_i} :	Ganho de soluto no instante t _i	[kg]
t:	Tempo.....	[min]
t _{eq} :	Tempo de equilíbrio.....	[min]
T:	Temperatura.....	[°C]
\vec{v} :	Velocidade do meio.....	[ms ⁻¹]
V:	Volume do sólido.....	[m ³]
V _{ijk} :	Volume do VC que se encontra na posição i, j, k na malha.....	[m ³]
VC:	Volume de controle.....	[-]
X [*] :	Teor de umidade adimensional.....	[-]
\overline{X} :	Teor de umidade médio (base seca).....	[kgkg ⁻¹]
X ₀ :	Teor de umidade inicial (base seca).....	[kgkg ⁻¹]
X _{eq} :	Teor de umidade de equilíbrio (base seca).....	[kgkg ⁻¹]

Letras Gregas

Γ^Φ :	Parâmetro de transporte.....	[-]
Δ :	Variação.....	[-]
λ :	Coefficiente de transporte.....	[-]
μ_m, μ_n, μ_q :	Raízes da equação transcendental.....	[-]
Φ :	Variável de transporte.....	[-]
$\bar{\Phi}$:	Valor médio da variável de transporte.....	[-]
Φ_0 :	Valor inicial da variável de transporte.....	[-]
Φ_{eq} :	Valor de equilíbrio da variável de transporte.....	[-]
$\bar{\Phi}_i$:	Valor médio da grandeza de interesse para $t = t_i$	[-]
$\bar{\Phi}^{sim}$:	Valor médio simulado em $t = t_i$	[-]
$\Phi_P, \Phi_W, \Phi_E, \Phi_N, \Phi_S, \Phi_F, \Phi_B$	Variáveis dependentes na equação discretizada.	
:		[-]
∇ :	Operador Nabla.....	[-]
σ_i :	Desvio-padrão para o valor médio de Φ_i	[-]
$1/\sigma_i^2$:	Peso estatístico referente ao i -ésimo ponto experimental.....	[-]
$\delta\Phi_i$:	Desvio-padrão relativo a uma simulação numérica.....	[-]

Sobrescritos

0:	Tempo anterior.....	[-]
θ :	Tempo de avaliação de Φ na função de interpolação.....	[-]

Subscritos

e, w, n, s, f, b:	Fronteiras de um volume de controle.....	[-]
-------------------	--	-----

ef:	Efetiva.....	[-]
eq:	Equilíbrio.....	[-]
0:	Inicial.....	[-]
i:	i-ésimo valor da grandeza especificada.....	[-]

Capítulo 1: Introdução

A atividade da água é uma das mais importantes propriedades que influenciam no processamento, conservação e armazenamento de alimentos. Um alimento que possui atividade de água elevada está mais propício ao desenvolvimento de micro-organismos, que podem levar à sua deterioração (FIB, 2013). Os alimentos em sua forma *in natura*, a exemplo de frutas, legumes, verduras, peixes e carnes, por possuírem elevada quantidade de água, são altamente perecíveis.

As perdas pós-colheita de produtos agrícolas e os problemas enfrentados com o armazenamento e transporte desses alimentos levam a uma busca constante por técnicas alternativas que lhes propiciem um maior tempo de conservação, viabilizando a preservação dos seus nutrientes. Cerca de 1,3 bilhões de toneladas de alimentos são desperdiçados por ano, em todo o mundo, gerando um prejuízo em torno de 750 bilhões de dólares anuais, o que equivale a um terço do que é produzido. Deste total, 54% ocorrem na fase inicial da produção, manipulação pós-colheita e armazenagem (FAO, 2013).

Na América Latina, o desperdício de alimentos na etapa da produção, bem como, durante o consumo mal planejado representam, em cada uma, 28% do total de perdas. Este efeito na produção se deve, principalmente, à colheita ineficiente ou prematura e às condições excessivas de chuva ou de seca, frequentes no Brasil e na Argentina. As perdas também são atribuídas às fases de armazenamento (22%), de processamento (6%), de distribuição e mercado (16%) (FAO, 2014).

Nas últimas décadas, tem-se aumentado o investimento em pesquisas de novas tecnologias visando à obtenção de frutas semi-processadas que mantenham as características

sensoriais e nutritivas do produto fresco, com redução de custos industriais e perdas pós-colheita (ARBALLO et al., 2012a).

Encontrar formas de conservação, objetivando prolongar a vida útil dos alimentos é uma preocupação constante do setor industrial, que busca incessantemente a união de técnicas tradicionais de preservação com tecnologias atuais (YADAV e SINGH, 2012). Ainda de acordo com esses autores, as formas mais comuns de se obter a longevidade dos alimentos são a secagem, secagem por pulverização, resfriamento-secagem, congelamento, vácuo, conservas, preservação em xarope (desidratação osmótica), cristalização do açúcar ou adicionando conservantes, a exemplo de dióxido de carbono.

A desidratação de alimentos se apresenta como uma forma de diminuir a sua atividade de água e consiste em retirar parte da umidade por evaporação com transferência de calor e massa, podendo ser natural ou artificial (FIB, 2013).

A secagem natural, expondo o alimento diretamente ao Sol, é uma técnica antiga e ainda muito utilizada. Porém, esta forma de secar alimentos tem seus inconvenientes, tendo em vista a dependência das intempéries do clima, além de dificultar o cumprimento das condições higiênicas mínimas necessárias.

A secagem artificial é a maneira mais eficiente de desidratar alimentos e não enfrenta os problemas encontrados na secagem natural. Pode ser feita de várias formas, dentre elas, por convecção, utilizando-se ar quente, através do uso de micro-ondas, a vácuo, por liofilização e por meio de tratamento com ultrassom (FIB, 2013).

Atualmente, muitos alimentos são consumidos após algum tipo de tratamento; vários processos tecnológicos têm sido empregados em escala industrial para preservá-los, grande parte baseando-se em desidratação usando ar quente (SIMAL et al., 1997). Podem-se destacar sopas instantâneas, vegetais desidratados, plantas medicinais, sucos de fruta em pó, maçã, banana, melão desidratados, pickles, carne de sol, dentre outros produtos.

Por outro lado, o processo de secagem pode provocar mudanças na estrutura física do alimento como alterações de cor, sabor, textura, contração de volume, endurecimento superficial, como também, reações químicas, a exemplo de perdas de nutrientes e escurecimento enzimático (FIB, 2013). Tem-se dado cada vez mais atenção à função dos ingredientes ativos presentes nos alimentos para a saúde humana, a exemplo dos antioxidantes naturais. A preservação destes componentes durante a conservação é de suma importância no aspecto da qualidade do produto final (FERNANDES et al., 2011). Somado a isso, vale salientar que a secagem é um processo oneroso, tendo em vista que envolve mudança de fase

da água de líquido para vapor, o que acarreta um grande consumo de energia (SILVA et al., 2014a).

Neste sentido, a desidratação osmótica apresenta-se como uma opção de remoção parcial de água por imersão do alimento inteiro ou em pedaços, em uma solução de alta pressão osmótica, composta por água e um ou mais solutos (BORSATO et al., 2010). A diferença do potencial químico da água do alimento e o meio osmótico é a força motriz para a desidratação (SILVA et al., 2014a). Segundo Zúñiga e Pedreschi (2011) o processo envolve, essencialmente, dois fluxos simultâneos, que são: a difusão de água do alimento para a solução e a difusão de soluto para o alimento. O fenômeno ocorre a partir da concentração mais baixa para uma maior concentração, através da membrana semipermeável do tecido da fruta (YADAV e SINGH, 2012). A desidratação osmótica apresenta-se como um processo de custo financeiro relativamente baixo, que proporciona resultados satisfatórios em relação à retirada de parte da água do alimento, a conservação de suas vitaminas e minerais, a preservação da cor e sabor, além da diminuição do escurecimento oxidativo e da acidez, inerentes a alguns tipos de frutas (SOUZA et al., 2007; FERNANDES et al., 2011; YADAV e SINGH, 2012; BARBOSA JÚNIOR et al., 2013; KOPRIVICA et al., 2013; PERUSSELLO et al., 2014).

Diversos trabalhos abordando a desidratação osmótica de alimentos são encontrados na literatura (RASTOGI e RAGHAVARAO, 2004; EREN e KAYMAK-ERTEKIN, 2007; LOMBARD et al., 2008; SINGH e MEHTA, 2008; PATTANAPA et al., 2010; RUIZ-LÓPEZ et al., 2010; FERRARI et al., 2011; GANJLOO et al., 2011; JAIN et al., 2011; MERCALI et al., 2011; ARBALLO et al., 2012a; SHAMAEI et al., 2012; VASCONCELOS et al., 2012; YADAV et al., 2012; ABRAÃO et al., 2013; PORCIUNCULA et al., 2013; RODRÍGUEZ et al., 2013; SILVA et al., 2013; SILVA et al., 2014b; SILVA et al., 2014c). Em particular, pode-se citar a desidratação osmótica de maçã, que é o objetivo do presente trabalho (KAYMAK-ERTEKIN e SULTANOĞLU, 2000; DEROSSI et al., 2008; AZUARA et al., 2009; ALLALI et al., 2010; AZARPAZHOOH e RAMASWAMY, 2010; BORSATO et al., 2010; DEVIC et al., 2010; MONNERAT et al., 2010; CASTRO-GIRÁLDEZ et al., 2011; ZÚÑIGA e PEDRESHI, 2011; MAVROUDIS et al., 2012; DIAMANTE e YAMAGUCHI, 2012; KOPRIVICA et al., 2013; NIETO et al., 2013; AKTAS et al., 2013; SOURAKI et al., 2014).

Em grande parte das pesquisas encontradas, os modelos matemáticos utilizados são empíricos ou fenomenológicos, dos quais, alguns são difusivos (SIMAL et al., 1997;

DEROSSO et al., 2008; AZUARA et al., 2009; SOURAKI et al., 2014). Contudo, em sua maioria, a solução da equação de difusão é obtida pela forma analítica, onde são impostas condições que simplificam o problema, a exemplo da hipótese de que os parâmetros inerentes ao fenômeno de transferência de massa são constantes, como também, que o encolhimento do produto pode ser desprezado (SIMAL et al., 1997). Com essas imposições, o problema analisado torna-se distinto da situação real.

Tendo em vista a carência de pesquisas com este tema, a proposta deste trabalho é realizar um estudo da desidratação osmótica, seguida de secagem convectiva, de maçãs cortadas em forma de paralelepípedo, através de um modelo matemático difusivo, considerando o encolhimento da fruta e a variação dos parâmetros de processo. Para tal, estes parâmetros serão determinados através de um algoritmo de otimização acoplado a uma solução numérica da equação de difusão, que será obtida através do método dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita.

1.1. Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo o estudo da desidratação osmótica de pedaços de maçã, cortada em forma de paralelepípedo, seguida de secagem convectiva, por meio de um modelo matemático difusivo a ser desenvolvido, pressupondo os parâmetros de processo variáveis e considerando o encolhimento do produto.

1.2. Objetivos específicos

De forma precisa, esse trabalho pretende:

- Usar o método dos volumes finitos para obter uma solução numérica tridimensional da equação de difusão em coordenadas cartesianas, pressupondo condição de contorno do primeiro tipo;
- Propor um otimizador acoplado à solução numérica, visando à determinação dos valores dos parâmetros de processo inerentes aos fenômenos de difusão de massa que ocorrem durante a desidratação, para as várias condições experimentais estudadas, tanto para a absorção de sacarose quanto para a remoção de água;

- Desenvolver um *software* computacional, com interface gráfica, na plataforma *Windows*, para determinar os parâmetros de processo, via otimização, a partir de dados experimentais;
- Realizar experimentos de desidratação osmótica relativos à maçã, cortada na forma de paralelepípedo, em diversas condições operacionais;
- Simular os processos de difusão de massa: absorção de sacarose e remoção de água, nas condições operacionais estudadas;
- Encontrar correlações matemáticas para os coeficientes de difusão de massa como função dos parâmetros do processo de desidratação, bem como das dimensões do sólido;
- Predizer a distribuição de sacarose e de água no interior dos pedaços de maçã, em instantes previamente estipulados, bem como as suas respectivas cinéticas, utilizando-se de modelos matemáticos a serem desenvolvidos;
- Obter a cinética da secagem complementar de maçã osmoticamente desidratada em diversas condições operacionais;
- Interpretar e analisar os resultados encontrados através de comparações com trabalhos disponíveis na literatura.

Além da formulação de um modelo matemático difusivo, a proposta deste trabalho envolve o desenvolvimento de um *software* na linguagem FORTRAN. O referido programa permitirá a realização de simulações de desidratação osmótica e secagem de outros produtos, em diferentes condições operacionais, sem que haja necessidade da realização de experimentos laboratoriais. O fato de o programa computacional considerar os parâmetros de processo variáveis enriquece a pesquisa e tornam as simulações mais abrangentes.

Diante do exposto, espera-se que este trabalho traga contribuições significativas para esta área de pesquisa.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica

Como exposto no capítulo anterior, a desidratação osmótica é um processo de remoção parcial de água que consiste em colocar o alimento em contato com soluções concentradas de sólidos solúveis que possuem maior pressão osmótica e menor atividade de água. Pode-se dizer que é uma técnica de desidratação que produz um efeito de desidratação-impregnação (CASTRO-GIRÁLDEZ et al., 2011), onde há perda de água do produto para a solução, como também transporte de soluto do meio osmótico para o alimento.

A água é um elemento essencial na conservação da estrutura dos tecidos vegetais, quando é parcialmente retirada através da desidratação osmótica pode acarretar importantes alterações físico-químicas, induzindo a rearranjos celulares ou mesmo a destruição de parte da estrutura natural (NIETO et al., 2013). Quando um produto é osmoticamente desidratado, a sua estrutura é modificada, havendo alterações em seu volume, porosidade, densidade, dentre outros (MAYOR et al., 2011; NIETO et al., 2013). Diversos fatores influenciam neste fenômeno, a exemplo do agente osmótico a ser utilizado, concentração da solução, proporção entre massa do fruto e de soluto, temperatura, tamanho e geometria do produto, presença ou não de agitação do meio osmótico e natureza do alimento (RASTOGI e RAGHAVARAO, 2004; CORZO e BRACHO, 2006; FERRARI et al., 2011; YADAV e SINGH, 2012; BARBOSA JÚNIOR et al., 2013).

Neste capítulo são elencados os fatores mais relevantes para o processo de desidratação osmótica. À medida que isso é feito, uma revisão da literatura envolvendo trabalhos já realizados sobre este tema é realizada, enfatizando-se a desidratação osmótica de frutas e, em particular, da maçã.

2.1. Transferência de massa na desidratação osmótica

O principal objetivo no processo de desidratação osmótica é o estudo da transferência de massa. Essa movimentação ocorre através das membranas semipermeáveis das células que, dependendo do produto, podem oferecer maior ou menor resistência à passagem do fluxo (RASTOGI et al., 2002). Estudos sugerem que a desidratação osmótica ocorre a partir da superfície do produto e se move em direção ao centro da amostra, percorrendo todas as camadas das células, podendo causar tensões internas que resultam em degradação celular (RASTOGI et al., 2002; DEROSI et al., 2008).

Quando o alimento é imerso no meio osmótico, um gradiente de pressão é desenvolvido, ocasionando a transferência de parte da água do produto para a solução e, simultaneamente, de parte do soluto para o alimento, por um período, que se pode denominar de dinâmico. Depois de um determinado intervalo de tempo, que depende de diversos fatores, a diferença de potencial responsável por este transporte de massa torna-se nulo. É o que caracteriza o equilíbrio do processo e denomina-se estado estacionário (HERMAN-LARA et al., 2013).

O estudo do equilíbrio é importante não só para a modelagem da desidratação, como também para que se adquira um melhor conhecimento em relação à estabilidade dos alimentos para o armazenamento. A existência de atividade de água em camadas mais superficiais, por menor que seja, pode favorecer o desenvolvimento de bactérias patogênicas (AZUARA et al., 2009). Segundo Zúñiga e Pedreschi (2011), o processo de desidratação osmótica pode ser classificado em três períodos: dinâmico, pseudo-equilíbrio e equilíbrio. O período dinâmico é onde ocorrem as maiores taxas de transferência de massa; em seguida vem o pseudo-equilíbrio, que se dá em um tempo relativamente curto; e por fim, o equilíbrio, que se caracteriza pela estabilidade de composição e peso das amostras. O estado de equilíbrio muitas vezes demora a ser atingido e o que se considera é um pseudo-equilíbrio.

A análise da cinética de desidratação e o entendimento dos mecanismos que envolvem a transferência de massa são de grande relevância para uma melhor compreensão e controle do processo (SIMAL et al., 1997; RASTOGI et al., 2002; DEROSI et al., 2008; ZÚÑIGA e PEDRESCHI, 2011; YADAV e SINGH, 2012). A falta de clareza dos mecanismos de transferência de massa tem dificultado o desenvolvimento e a ampliação da

desidratação osmótica pelo setor industrial (DEROSSO et al., 2008). Assim, faz-se necessário determinar as melhores condições e métodos para que as taxas de perda de água sejam maximizadas e, dependendo do produto e do objetivo para o qual está sendo desidratado, o ganho de sólidos seja minimizado, sem, no entanto, afetar a qualidade do alimento (RASTOGI et al., 2002; ZÚÑIGA e PEDRESCHI, 2011). Segundo Rodríguez et al. (2013), existe um índice que é amplamente utilizado para mensurar a eficácia da desidratação osmótica, denominado índice de eficiência. Ele relaciona a perda de água e o ganho de sólidos. Valores altos deste parâmetro indicam que houve uma perda de água superior ao ganho de sólidos e o processo é considerado vantajoso.

2.2. Contração volumétrica na desidratação

A perda de água motivada pela desidratação osmótica ou pela secagem de alimentos ocasiona alterações em suas propriedades mecânicas. Dentre elas, pode-se mencionar a contração volumétrica (MAYOR et al., 2011; AKTAS et al., 2013; NIETO et al., 2013).

Comumente, encontram-se relatos de que a perda de água está diretamente ligada à contração volumétrica por parte da amostra (MOREIRA e SERENO, 2003; MAYOR et al., 2011). Apesar disso, em diversos trabalhos abordando a desidratação osmótica de alimentos este fato é negligenciado, numa tentativa de simplificar o fenômeno (SIMAL et al., 1997; BORSATO et al., 2010; ABRAÃO et al., 2013; PORCIUNCULA et al., 2013).

Maçãs cortadas em forma cilíndrica foram osmoticamente desidratadas em solução de sacarose por Moreira e Sereno (2003). Alterações no volume das amostras foram correlacionadas linearmente com o teor de umidade em base seca. Os pesquisadores concluíram que, independente da taxa de secagem, o encolhimento poderia ser calculado a partir do teor de umidade e, por outro lado, a determinação da contração volumétrica daria uma indicação indireta do teor de umidade das frutas.

Castro-Giráldez et al. (2011) desidrataram osmoticamente cilindros de maçã em solução de sacarose. Eles analisaram as mudanças estruturais da fruta usando uma abordagem termodinâmica não-linear. Em relação à contração volumétrica, os autores concluíram que houve um encolhimento de, no máximo, 60% em relação ao volume inicial.

2.3. Principais fatores que influenciam a desidratação osmótica

A desidratação osmótica é um fenômeno complexo que envolve parâmetros diversos. Como já foi mencionado, o agente osmótico, a temperatura utilizada, a natureza e geometria do produto, o tipo, a concentração e a proporção do agente osmótico, são de extrema relevância. Algumas destas variáveis são comentadas a seguir.

2.3.1. Agentes osmóticos

De acordo com Yadav e Singh (2012), um dos efeitos do agente osmótico é reduzir a atividade de água da solução para estabelecer o aumento da força motriz. É necessário que ele seja bem dissolvido na água, que não seja tóxico e que não reaja com o produto. No caso de fruta, a reutilização por até cinco vezes pode ser feita sem prejudicar a sua concentração.

Os agentes osmóticos mais utilizados são a sacarose (SIMAL et al., 1997; RUIZ-LÓPEZ et al., 2010; PATTANAPA et al., 2010; SEGUÍ et al., 2012 ; ARBALLO et al., 2012a) na forma de xarope ou cristalizado, a solução de sal (cloreto de sódio) ou uma combinação de ambos (MONNERAT et al., 2010). Além destes, também pode-se destacar xarope de milho (BARBOSA JÚNIOR et al., 2013), melão de beterraba (KOPRIVICA et al., 2013), xarope de maltose (NIETO et al., 2013), sucralose (PERUSSELLO et al., 2014), trealose (AKTAS et al., 2013), glicerol (PATTANAPA et al., 2010), glicose (AGNELLI et al., 2005), dentre outros, podendo-se também fazer combinações de dois ou mais solutos.

Com o objetivo de investigar o efeito do meio osmótico na textura e na cinética da desidratação osmótica de maçã, Mavroudis et al. (2012) utilizaram quatro combinações diferentes de agentes osmóticos, a saber: sacarose (50%); sacarose (40,47%) e cloreto de cálcio (0,25%); sacarose (48,27%) e cloreto de cálcio (0,5%) e finalmente, sacarose (40,52%) e cloreto de sódio (2%). Segundo os autores, estudos demonstram que o cloreto de cálcio retarda o envelhecimento das células das plantas, atrasando o processo de degradação. Os resultados mostraram que o amolecimento da fruta e a absorção de sólidos foram reduzidos nas situações em que o cloreto de sódio ou o cloreto de cálcio foram adicionados à sacarose. Este resultado foi atribuído ao fato de que a adição de minerais influencia na permeabilidade

do tecido celular. Na temperatura de 60 °C houve um amolecimento do tecido da maçã, independente da solução osmótica utilizada.

Vasconcelos et al. (2012) usaram soluções binárias (sacarose/água e glicose/água) e ternária (sacarose/água/sal) na desidratação osmótica de figos da Índia, com o objetivo de analisar a influência destas soluções sobre a perda de água, o ganho de sólidos e o índice de eficiência. A perda de água foi mais acentuada nos experimentos que usaram soluções binárias. Os autores atribuíram este resultado ao fato da baixa concentração do cloreto de sódio (3%) utilizada na solução ternária. A solução que continha a glicose foi mais eficaz na perda de água e favoreceu um menor ganho de sólidos. De uma forma geral, o efeito da temperatura ocasionou maior perda de água, enquanto que a influência da concentração foi maior no ganho de soluto. As melhores condições encontradas foram: solução de glicose a 40 °Brix, temperatura de 40 °C por 165 minutos, com um índice de eficiência de 108,47.

Koprivica et al. (2013) utilizaram melão de beterraba na desidratação osmótica de maçãs. Segundo os pesquisadores, existem vantagens em usar esse tipo de solução, visto que há absorção de vitaminas e sais minerais por parte do produto, a partir da solução hipertônica. O foco da pesquisa foi obter a influência da temperatura e do teor de matéria seca da solução em relação à perda de água, bem como, determinar um modelo matemático para descrever o processo. Eles concluíram que o teor de matéria seca foi preponderante em relação à temperatura na perda de água e que o modelo de Peleg se ajustou melhor na descrição deste fenômeno.

2.3.2. Concentração da solução e proporção entre alimento e solução

A concentração da solução osmótica exerce um papel fundamental no processo de desidratação. Estudos comprovam que um melhor nível de desidratação é obtido através da utilização de um agente osmótico com um peso molecular elevado e alta concentração da solução (DEROSSI et al., 2008). É comum encontrar na literatura que a concentração do xarope é diretamente proporcional à taxa de difusão de massa, sendo a perda de água superior à absorção de sólidos, na maioria dos casos.

Vale ressaltar que a proporção entre as quantidades de solução e de alimento também é relevante ao processo. A concentração é dita constante quando a quantidade de soluto impregnada no produto é insignificante em relação ao volume total da solução osmótica na qual o alimento está imerso. Por outro lado, se a porção do meio osmótico é pequena, a sua concentração será afetada à medida que o produto absorve o soluto e perde água para a solução, sendo, portanto, considerada variável (RUIZ-LÓPEZ et al., 2010). Para garantir uma força de condução uniforme, a concentração da solução osmótica deve ser constante, sendo um pré-requisito para a determinação do coeficiente de difusão, através da solução analítica da equação de Fick, que será abordada posteriormente (RASTOGI et al., 2002).

Na desidratação osmótica de cubos de abacaxi, Rastogi e Raghavarao (2004), utilizaram uma proporção de 1:25 (um para vinte e cinco), entre a massa do fruto e a massa da solução, respectivamente, com o objetivo de não alterar significativamente a concentração do meio osmótico durante os experimentos. Derossi et al. (2008) com a mesma finalidade, usaram a proporção de 1:20 na desidratação osmótica de maçã.

Ruiz-López et al. (2010) realizaram desidratação osmótica de abacaxi em solução de sacarose, cortados em forma de hexaedro, em tamanhos diferentes. As proporções utilizadas foram 1:1 (variável) e 1:10 (constante). Os coeficientes de difusão foram obtidos baseados na equação de Fick. A perda de água e o ganho de sólidos encontrados foram maiores quando a proporção da solução hipertônica utilizada foi de 1:10. De acordo com os autores, este fato é previsível, tendo em vista que no primeiro caso, a concentração diminui continuamente, enquanto que no segundo caso ela se mantém estável.

2.3.3. Tamanho e geometria

O tamanho e a geometria do alimento também exercem influência no transporte de massa durante o processo de desidratação osmótica. Segundo Ruiz-López et al. (2010), a forma considerada deve ser a mais próxima possível da realidade, pois uma escolha equivocada pode originar valores subestimados ou superestimados dos coeficientes de difusão de água e de sólidos. Na desidratação osmótica de abacaxi realizada por estes pesquisadores, foram considerados dois tamanhos diferentes. A perda de água e o ganho de sólidos foram

mais acentuados para as amostras de tamanho menor, quando ocorreu uma maior relação área/volume. É comum neste processo se formar uma camada densa de sólidos na superfície do produto, que atua como uma barreira e diminui o transporte de massa. Os autores acreditam que este fenômeno ocorreu e concluíram que o efeito foi acentuado nas amostras de maior tamanho.

É frequente a utilização de geometrias mais simples ou aproximações que destoam da realidade como forma de tornar o problema menos complexo. Em diversos trabalhos a configuração considerada é a da placa infinita, na qual se supõe que a difusão é mais importante apenas em uma direção e que, nas demais, o fluxo é desprezível. Estas hipóteses são válidas quando a espessura é muito pequena em relação aos lados. Caso contrário, as configurações mais adequadas são as de paralelepípedo ou cúbica (RASTOGI e RAGHAVARAO, 2004).

Agnelli et al. (2005) realizaram desidratação osmótica de peras e maçãs em soluções de sacarose e glicose, seguida de congelamento. A pera foi cortada em forma de disco, com 2 cm de diâmetro e 1 cm de altura. A maçã, foi cortada em forma de cubo de dois tamanhos diferentes, utilizando-se arestas com 1,5 cm e 2 cm de medida. Os parâmetros avaliados foram o ganho de sólidos, a redução de peso e o teor de sólidos solúveis. Na desidratação osmótica, foi usado um modelo matemático desenvolvido por Spiazzi e Mascheroni (1997) para descrever a transferência de massa, a influência da forma e a variação volumétrica. Segundo os autores, houve concordância entre os dados experimentais e os preditos pelo modelo, exceto na descrição da variação volumétrica, tendo em vista que a redução de volume foi acompanhada por deformação no formato das frutas, comprometendo a precisão dos resultados.

2.3.4. Temperatura

Outro fator importante é a temperatura da solução durante a desidratação osmótica. A maior parte dos estudos mostra que um aumento na temperatura acarreta uma diminuição da viscosidade da solução osmótica, influenciando diretamente no transporte de água e, em alguns casos, também na difusão de sólidos da solução para o produto (MOREIRA e

SERENO, 2003; RASTOGI e RAGHAVARAO, 2004; MERCALI et al., 2011, GANJLOO et al., 2011; BARBOSA JÚNIOR et al., 2013). Dois efeitos distintos causados pelo aumento da temperatura podem ser destacados na desidratação osmótica em um alimento: agitação molecular, causando o aumento da taxa de difusão de massa, e plasticidade, ocasionada pelo aumento da temperatura, quando esta excede um valor crítico (50 a 55 °C para algumas espécies), resultando em limitação da transferência de massa (ALLALI et al., 2010).

Pedaços de melão do tipo *Orange* foram osmoticamente desidratados por Barbosa Júnior et al. (2013) em soluções de sacarose e xarope de milho, separadamente e, em ambos os casos, os autores constataram que o transporte de massa cresceu à medida que a temperatura e a concentração da solução aumentaram.

2.3.5. Agitação do meio osmótico

A desidratação osmótica pode ser realizada em regime estático ou dinâmico. O regime dinâmico se caracteriza pela agitação do meio osmótico. Este procedimento mantém a solução homogênea e evita a formação de películas em torno do alimento, favorecendo a diminuição da resistência externa e viabilizando o transporte de massa (SIMAL et al., 1997; MOREIRA e SERENO, 2003; AGNELLI et al., 2005; DEROSI et al., 2008; RODRIGUES e MAURO, 2008; RUIZ-LÓPEZ et al., 2010; PATTANAPA et al., 2010; ARBALLO et al., 2012a; MAVROUDIS et al., 2012; HERMAN-LARA et al., 2013; RODRÍGUEZ et al., 2013; PERUSSELLO et al., 2014). De acordo com Yadav e Singh (2012), a agitação do meio osmótico realizada por bomba centrífuga mantendo os frutos parados, se mostrou vantajosa na desidratação osmótica de maçãs, tendo em vista que houve uma diminuição na absorção de sacarose durante o processo.

2.4. Otimização do processo

Dependendo das condições experimentais, a desidratação osmótica é um processo lento. Neste sentido, muitos trabalhos encontrados sobre este tema buscam encontrar as

melhores condições operacionais para o processo: a temperatura ideal, a melhor concentração, o tempo de imersão do produto para os quais se tenham resultados ótimos de ganho de sólidos e perda de água no menor tempo possível, dentre outros (TELES et al., 2006; EREN e KAYMAK-ERTEKIN, 2007; SOUZA et al., 2007; SHAFIQ et al., 2010; SHAMAEI et al., 2012; YADAV et al., 2012).

Jain et al. (2011) desidrataram cubos de mamão nas temperaturas 30, 40 e 50 °C, usando xarope de açúcar com concentrações 50, 60 e 70 °Brix durante 4, 5 e 6 horas. O foco da pesquisa foi determinar sob quais condições de temperatura (T), concentração (C) e tempo de imersão (θ), haveria uma maior perda de água (WL) com um ganho de sólidos (SG) satisfatório. Regressão polinomial de segunda ordem foi utilizada considerando como variáveis independentes T, C e θ , e como variáveis dependentes, WL e SG. Foi realizada a análise sensorial com o objetivo de encontrar o nível ideal do ganho de sólidos. Neste aspecto, com o auxílio da metodologia de superfície de resposta, os autores concluíram que a desidratação com temperatura de 37 °C, xarope com concentração de 60 °Brix, por um tempo de 4,25 horas, resultou em 28% de perda de água e 4% de ganho de sólidos e que essas eram as melhores condições para o processo.

Arballo et al. (2012a) realizaram a cinética de transferência de massa e a otimização da desidratação osmótica de abóbora, kiwi e pera em solução de sacarose, buscando as condições ideais de processamento, sob o aspecto de maior perda de água, menor ganho de sólidos com máxima redução de peso. Foi usada regressão linear e o método da função de conveniência como ferramentas na otimização do processo. Segundo os autores, a regressão polinomial tem a capacidade de encontrar uma única equação que envolve as diversas variáveis do processo e pode prever a evolução desses parâmetros. Este método combinado com a função de conveniência viabiliza o trabalho com diversos fatores característicos do problema e possibilita a identificação das zonas ideais de operação. As condições ótimas encontradas para cada produto foram: 114 min e 60 °Brix para a abóbora; 145,5 min e 60 °Brix para o kiwi e 240 min e 54 °Brix para a pera.

Yadav et al. (2012) estudaram as melhores condições para a desidratação osmótica de pêssego. Os experimentos foram realizados com xarope de sacarose com três concentrações (50, 60 e 70 °Brix), três temperaturas (35, 45, 55 °C) avaliadas por 2, 3 e 4 horas. A metodologia da superfície de resposta foi aplicada aos dados experimentais

juntamente com um pacote estatístico comercial (Design Expert. 7.1.6 versão, Statease EUA). Foi realizada a significância estatística dos termos da equação de regressão para avaliar o efeito das variáveis do processo, através de análise de variância. As condições ideais encontradas foram: solução de sacarose com concentração de 69,9 °Brix, a uma temperatura de 37,63 °C por 3,97 h.

2.5. Modelos matemáticos

A modelagem matemática da cinética de transferência de massa durante a desidratação osmótica de alimentos tem sido objeto de vários estudos encontrados na literatura (AZARPAZHOOH e RAMASWAMY, 2010). Para analisar determinado fenômeno físico, geralmente os pesquisadores utilizam métodos experimentais, analíticos, numéricos ou uma combinação destes métodos, a fim de complementar e enriquecer os resultados.

Os métodos experimentais são interessantes por lidarem com o problema físico de uma forma mais real e palpável (MALISKA, 2010). Por outro lado, são onerosos, demandam trabalho, tempo e precisão de instrumentos, como também, dependem da habilidade de quem estiver conduzindo os experimentos. Somado a isto, faz-se necessário a utilização de modelos matemáticos para validar os dados experimentais.

A simulação numérica praticamente não apresenta restrições, podendo ser realizada com condições de contorno gerais e geometrias complexas. O uso de um modelo numérico adequado e validado representa uma economia de tempo e custo financeiro, tendo em vista que os experimentos laboratoriais tornam-se desnecessários (MALISKA, 2010).

O uso da modelagem matemática tem sido motivo de grande interesse por parte de pesquisadores, por representar uma ferramenta poderosa na busca pelo conhecimento do fenômeno de transporte de massa na desidratação de alimentos, possibilitando a obtenção de formas de otimização do processo (ADORNO et al., 2013). É possível conseguir um esboço operacional adequado, através do conhecimento da cinética de transferência de massa durante o fenômeno de desidratação osmótica, com o uso da modelagem matemática (KOPRIVICA et al., 2013). Os modelos matemáticos são capazes de prever a influência dos parâmetros de processo, e com isso, podem contribuir na redução de custos e efeitos causados pela

desidratação. Com o desenvolvimento de tais métodos, dentre outras vantagens, o processo torna-se mais rápido e barato, visto que o tempo de processamento pode ser otimizado, gerando economia de energia e, além disso, tornando-se possível traçar o perfil da umidade no interior do alimento, o que conduz a um aumento da qualidade no produto final (PERUSSELLO et al., 2014).

Os principais tipos de modelos matemáticos encontrados na literatura para solucionar problemas de transporte de massa em desidratação osmótica são os que utilizam a teoria da termodinâmica de processos irreversíveis, os empíricos e os difusivos.

2.5.1. Modelos que envolvem a Termodinâmica de Processos Irreversíveis

Este tipo de abordagem analisa o transporte de massa sob o ponto de vista microscópico das estruturas microbiológicas das células existentes no tecido dos vegetais (TYREE, 1970; TOUPIN e MARCOTTE, 1989; MARCOTTE et al., 1991; SPIAZZI e MASCHERONI, 1997; CASTRO-GIRÁLDEZ et al., 2011). De acordo com a literatura existente, o processo é complexo e envolve as vias pelas quais as massas de água ou de soluto percorrem. Esses caminhos podem ser através da parede das células e o livre espaço intercelular, fora da membrana celular, denominado transporte apoplástico; a partir de uma célula diretamente para outra, caracterizado pelo movimento das moléculas através de pequenos canais, denominado transporte simplástico (TOUPIN e MARCOTTE, 1989). Alguns autores consideram também uma terceira via denominada transporte transmembranar, que seria um intercâmbio entre o interior da célula, o protoplasto, e o seu exterior, ou seja, o espaço livre que compreende o espaço intercelular e a parede celular (MARCOTTE et al., 1991).

Em sua pesquisa, Toupin e Marcotte (1989) destacaram que o fenômeno de transferência de massa em tecidos vegetais é altamente influenciado pela natureza e inter-relação das vias de transporte. Os pesquisadores defendem que equações derivadas da termodinâmica de processos irreversíveis podem ser aplicadas para modelar o transporte de massa através da membrana plasmática do tecido do alimento, levando em conta a natureza seletiva constituinte, possibilitando a quantificação das resistências à penetração. Os autores

analisaram as interações celulares, sob determinadas condições, usando equações oriundas da termodinâmica irreversível e o transporte de massa unidirecional, através da equação de Fick, na desidratação osmótica de raízes, a exemplo de cenoura e beterraba e em tubérculos de batata. A opção pela configuração unidimensional foi utilizada com o intuito de simplificar os cálculos, devido à complexidade das estruturas biológicas existentes. Segundo os pesquisadores, o modelo é capaz de simular todos os fenômenos presentes no sistema real e permite analisar os gradientes de concentração de massa em cada célula.

De acordo com Spiazzi e Mascheroni (1997), duas resistências se opõem à transferência de massa durante a desidratação osmótica de vegetais: uma interna e outra externa. Enquanto que a resistência externa é influenciada pela dinâmica do fluido em contato com o produto, a interna, muito mais complexa, é regida pela estrutura do tecido celular. Ainda de acordo com esses autores, os modelos matemáticos que descrevem o fenômeno, sob esta ótica, embora sejam bem fundamentados e representem bem os possíveis mecanismos de transferência de massa no produto, demandam conhecimentos nas áreas de física e biologia nem sempre disponíveis.

Alguns autores defendem que estes modelos mecanicistas necessitam de uma grande quantidade de propriedades não prontamente disponíveis, tais como a permeabilidade da membrana celular, elasticidade, porosidade e tortuosidade da parede celular (KAYMAK-ERTEKIN e SULTANOĞLU, 2000; BARBOSA JÚNIOR et al., 2013).

2.5.2. Modelos empíricos

Os modelos empíricos não descrevem o fenômeno no interior do alimento. Utilizam, basicamente, informações obtidas por dados experimentais, como também, extrínsecos ao produto, a exemplo de temperatura e umidade relativa do ar. Em geral, estes modelos analisam o comportamento dos dados experimentais, correlacionando o processamento de variáveis com a perda de água ou ganho de sólidos com o tempo de processo, sem considerar os fenômenos subjacentes a tal processo. Eles incluem regressões multivariáveis, análise de superfície de resposta, modelos derivados a partir de balanços de massa e outros (MERCALI et al., 2011). De acordo com Ruiz-López et al. (2010), esses modelos não fornecem explicações sobre o mecanismo do processo de desidratação osmótica.

Em alguns casos, os autores fazem alguma modificação nos modelos originais, de acordo com sua conveniência, porém, mantendo a essência que lhes são peculiares. São exemplos de modelos empíricos: Azuara (AZARPAZHOOH e RAMASWAMY, 2010; GANJLOO et al., 2011; ZÚÑIGA e PEDRESCHI, 2011), Page (PATTANAPA et al., 2010; SANTOS et al., 2011), Magee (MOREIRA e SERENO, 2003; ARBALLO et al., 2012a), Peleg (CORZO e BRACHO, 2006; MERCALI et al., 2011; KOPRIVICA et al., 2013).

Corzo e Bracho (2006) usaram o modelo de Peleg na cinética de desidratação osmótica de sardinha em solução salina. Foi constatado que as taxas de perda de água e ganho de sal cresceram com o aumento da temperatura e que o modelo mostrou-se eficaz para representar a transferência de massa.

A Tabela 2.1 apresenta alguns dos principais modelos empíricos.

Tabela 2.1: Alguns modelos empíricos.

NOME	MODELO	REFERÊNCIA
Peleg	$M(t) = \frac{t}{K_1 + K_2 t}$	Corzo e Bracho (2006) Koprivica et al. (2013)
Magee	$M(t) = K_1 + K_2 t^{1/2}$	Arballo et al. (2012a) Moreira e Sereno (2003)
Azuara	$M(t) = \frac{(K_1 t) M_{eq}}{1 + K_1 t}$	Mundada et al. (2011) Zúñiga e Pedreschi (2011)
Page	$M(t) = M_{eq} + (M_0 - M_{eq}) e^{at^b}$	Santos et al. (2011)
Midilli	$M(t) = M_{eq} + (M_0 - M_{eq})(a e^{-kt^n} - bt)$	Santos et al. (2011)
Lewis (Newton)	$M(t) = M_{eq} + (M_0 - M_{eq}) e^{-kt}$	Mundada et al. (2011)

Na Tabela 2.1 tem-se que t representa o tempo, K_1 , K_2 , a e b são constantes inerentes a cada modelo, $M(t)$ é o teor de umidade, M_0 é o teor de umidade no instante inicial e M_{eq} , representa o teor de umidade de equilíbrio.

Ganjloo et al. (2011) utilizaram os modelos de Azuara, Page e Peleg para descrever a cinética da desidratação osmótica de cubos de goiaba sem sementes, em solução de sacarose. Os resultados mostraram que a perda de água e o ganho de sólidos estão relacionados com a temperatura e a concentração da solução, enquanto que o teor de equilíbrio está relacionado com a concentração. De acordo com os autores, o modelo de Peleg foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Mundada et al. (2011) analisaram a cinética da desidratação osmótica de romãs em solução de sacarose, visando encontrar a relação entre tempo de imersão, concentração da solução e temperatura, com a transferência de massa. Foram usados vários modelos empíricos já conhecidos, a exemplo de Azuara, Page, Peleg, Magee, Lewis. A validação dos modelos foi realizada através de regressão não linear. Os modelos de Peleg e Azuara se adequaram melhor aos dados experimentais.

Na cinética da desidratação osmótica de abóbora, kiwi e pera, Arballo et al. (2012a) usaram os modelos de Magee e Azuara. O modelo de Magee apresentou um bom ajuste no início do processo, onde a taxa de desidratação é maior; além disso, foi mais eficiente na predição da perda de água. O modelo de Azuara demonstrou ser confiável durante todo o processo e foi mais apropriado na predição do ganho de sólidos.

2.5.3. Modelos difusivos

O processo de desidratação osmótica envolve a difusão de dois fluxos principais: fluxo de água do produto para a solução e de soluto da solução osmótica para o alimento. Na maioria dos casos, é inconveniente medir experimentalmente a quantidade de soluto absorvido pelo produto e de água liberada pelo alimento para a solução osmótica. Neste sentido, a determinação dos coeficientes de difusão é muito importante para todos os processos relativos ao fenômeno, e as soluções de equações baseadas na lei de Fick avaliam com eficácia estas quantidades (ZORRILLA e RUBIOLA, 1994).

O fenômeno de transferência difusiva de massa ocorre no processo de desidratação osmótica e, com o conhecimento do coeficiente de difusividade efetiva de massa, a taxa de transferência pode ser prevista de forma eficaz, simplificando a solução da equação de difusão (YADAV e SINGH, 2012).

Os modelos difusivos são usados para determinar o coeficiente efetivo de difusão de massa, tanto de água, como de soluto e uma das grandes vantagens, é a possibilidade de especificar o que ocorre no interior do produto durante o fenômeno (SILVA et al., 2014a).

Frequentemente são encontrados trabalhos sobre desidratação osmótica que usam modelos difusivos, os quais se baseiam na lei de Fick (SIMAL et al., 1997; RUIZ-LÓPEZ et al., 2010; HERMAN-LARA et al., 2013; BARBOSA JÚNIOR et al., 2013; SILVA et al. 2014a; SILVA et al. 2014b) para diversas geometrias e condições de contorno.

2.6. A equação geral de transporte

A equação geral de transporte para um volume infinitesimal é dada por:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \vec{v} \Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S, \quad (2.1)$$

em que $\partial(\lambda\Phi)/\partial t$ é denominado termo transiente, $\nabla \cdot (\lambda \vec{v} \Phi)$ é o termo advectivo, $\nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi)$ é o termo difusivo e S é o termo fonte. Tem-se, também, que Φ é a variável de interesse, t representa o tempo, λ é um parâmetro de transporte, Γ^Φ é um coeficiente de transporte e \vec{v} representa a velocidade do meio.

A Equação (2.1) é uma equação genérica comumente utilizada, sob determinadas condições, na representação das equações de conservação da quantidade de movimento, energia ou massa.

No presente trabalho, a abordagem da referida equação é feita em termos da conservação da massa, através de um modelo matemático difusivo. Neste sentido, o destaque é dado à equação de difusão de massa, mostrada a seguir.

2.7. A equação de difusão

Considerando o termo advectivo da Equação (2.1) igual à zero, esta equação passa a ser denominada equação de difusão e pode ser escrita sob a forma:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^{\Phi} \nabla \Phi) + S \quad (2.2)$$

Para o caso unidimensional, na direção x , a Equação (2.2) pode ser escrita como sendo:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + S \quad (2.3)$$

Para geometrias unidimensionais, a Equação (2.2) pode ser escrita, de uma maneira geral, sob a forma:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + S \quad (2.4)$$

onde n é um número inteiro, $0 \leq n \leq 2$, e estes valores são discutidos a seguir.

- Para $n = 0$, tem-se a equação de difusão em coordenadas retangulares:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + S \quad (2.5)$$

que, essencialmente, corresponde à Equação (2.3), quando impõe-se $r \equiv x$.

- Para $n = 1$, tem-se a equação de difusão em coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\Gamma^{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial r} \right) + S. \quad (2.6)$$

- Para $n = 2$, tem-se a equação de difusão em coordenadas esféricas:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2\Gamma^{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial r} \right) + S. \quad (2.7)$$

Considerando-se o caso bidimensional em coordenadas retangulares, nas direções x e y , a Equação (2.2) pode ser escrita sob a forma:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right) + S \quad (2.8)$$

Para uma geometria tridimensional, considera-se o fluxo difusivo em três direções. Em coordenadas cartesianas, nas direções x , y e z , a Equação (2.2) pode ser escrita como segue:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial z} \right) + S \quad (2.9)$$

2.8. Condições iniciais e de contorno

As condições iniciais consistem nos valores da variável de interesse para cada posição do domínio, no início ou a partir de um determinado instante em que se queira estudar o processo.

Em geral, as condições de contorno se referem ao comportamento da variável de interesse ou de seu fluxo no contorno do domínio. Para serem definidas em um processo, faz-se necessário analisar as variáveis envolvidas, a exemplo do tipo de produto e das condições experimentais.

A condição de contorno de primeiro tipo, também denominada condição de Dirichlet ou condição prescrita, é caracterizada quando o valor de equilíbrio da grandeza de interesse é instantaneamente assumido no contorno do domínio.

A condição de fluxo prescrito, também chamada condição de Newmann ou de segundo tipo, é aplicada quando se conhece o fluxo da grandeza de interesse no contorno do sistema.

Por outro lado, a condição de contorno convectiva, denominada de Cauchy ou de terceiro tipo, é utilizada quando a grandeza de interesse na superfície não entra em equilíbrio com o meio em que está inserida de forma instantânea. Ou seja, existe certa resistência e o equilíbrio leva algum tempo para ser alcançado.

Silva et al. (2014a) descreveram o processo de desidratação osmótica de cubos de abacaxi, considerando a solução tridimensional da equação de difusão. Três modelos foram avaliados. O primeiro, com a condição de contorno de primeiro tipo, cuja solução analítica foi acoplada a um otimizador desenvolvido por Silva et al. (2009a), e foram usados vinte e cinco termos de cada soma da série que representa tal solução da equação de difusão. O segundo modelo envolveu a condição de contorno de terceiro tipo e apenas um termo da série foi utilizado. O terceiro, também com condição de fronteira de terceiro tipo, considerou dezesseis termos de cada soma da série que representa a solução analítica da equação de difusão. Os autores concluíram que o primeiro modelo não foi satisfatório na descrição da migração de massa. Os resultados obtidos através do segundo modelo, mostraram que um número maior de termos da série deveria ser tomado para que os erros de truncamento pudessem ser negligenciados e, além disso, não foi capaz de prever a distribuição de sólidos. O terceiro modelo demonstrou ser mais adequado que os anteriores, tendo em vista que os indicadores estatísticos foram superiores com relação aos valores antes obtidos, e o modelo foi capaz de prever a distribuição de massa no produto.

2.9. Métodos de resolução da equação de difusão

O método de resolução da equação de difusão pode ser realizado seguindo duas vertentes: métodos analíticos (SIMAL et al., 1997; RASTOGI e RAGHAVARAO, 2004;

ZÚÑIGA e PEDRESCHI, 2011; ABRAÃO et al., 2013; BARBOSA JÚNIOR et al., 2013; SILVA et al., 2013; SOURAKI et al., 2014; SILVA et al., 2014b) ou métodos numéricos (SILVA et al., 2009a; ARBALLO et al., 2012b; ABRAÃO et al., 2013; PORCIUNCULA et al., 2013; RODRÍGUEZ et al., 2013; FABBRI et al., 2014; PERUSSELO et al., 2014, SILVA et al., 2014c).

Qualquer que seja a opção escolhida, as soluções dependem da geometria do domínio e das condições iniciais e de contorno.

2.9.1. Métodos analíticos

As soluções analíticas da equação de difusão possibilitam a descrição do processo em um domínio contínuo e fornecem o valor da grandeza de interesse em qualquer instante e posição desejadas (SILVA et al., 2014a). Além disso, constituem um importante meio de validação das soluções numéricas. A maioria dos trabalhos de desidratação osmótica que utilizam soluções analíticas da equação de difusão pressupõem que a difusividade de massa é constante durante todo o processo e que o produto não sofre contração volumétrica (SIMAL et al., 1997; FALADE et al., 2007; SILVA et al., 2014b). De acordo com Rastogi et al. (2002), em geral, é considerado que a difusividade constante ocorre sob a influência de umidade constante, no entanto, principalmente no início do processo de desidratação osmótica, a estrutura física do material se modifica consideravelmente e é nessa fase, onde a difusividade de massa se apresenta mais elevada.

De acordo com Silva et al. (2014a), com o objetivo de simplificar os cálculos que envolvem a solução da equação de difusão, geralmente são considerados poucos termos da série que representa a solução. Em muitos casos, apenas o primeiro termo é utilizado. Outra simplificação é uma aproximação da geometria do produto para o caso unidimensional, em que apenas o fluxo em uma única direção é considerado. Estas conjecturas podem desviar o problema físico da realidade, uma vez que em grande parte dos trabalhos envolvendo esse fenômeno, os resultados são contraditórios a essas hipóteses (AZARPAZHOOH e RAMASWAMY, 2010; FERRARI et al., 2011).

Tendo em vista que no presente trabalho utiliza-se a solução analítica em coordenadas cartesianas, nas seções seguintes apresentam-se as soluções analíticas para as geometrias unidimensional, bidimensional e tridimensional. Para tanto, as seguintes considerações são feitas:

- ✓ As dimensões do sólido não variam durante o processo;
- ✓ A distribuição inicial de Φ é uniforme;
- ✓ O mecanismo de transporte de massa ocorre exclusivamente por difusão;
- ✓ O sólido é considerado isotrópico e homogêneo;
- ✓ A difusividade efetiva de massa Γ^Φ é constante durante o processo;
- ✓ O processo é isotérmico.

Soluções analíticas considerando as demais geometrias podem ser encontradas em Crank (1992).

2.9.1.1. Solução analítica unidimensional com condição de contorno de primeiro tipo em coordenadas retangulares

Um domínio unidimensional em coordenadas cartesianas é mostrado através da Figura 2.1.

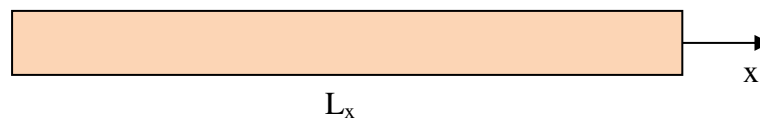


Figura 2.1: Domínio contínuo unidimensional.

Para uma placa infinita de espessura L_x , com condição de contorno do primeiro tipo, a solução da Equação (2.3) pode ser escrita sob a forma (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992):

$$\frac{\Phi(x, t) - \Phi_{eq}}{\Phi_0 - \Phi_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \cos \left[\frac{(2n-1)\pi}{2} \cdot \frac{x}{L_x/2} \right] \exp \left[- \left(\frac{(2n-1)\pi}{2} \right)^2 \frac{\Gamma^\Phi t}{(L_x/2)^2} \right] \quad (2.10)$$

Em que t é o tempo, x é a variável de posição, Φ_{eq} é o valor de equilíbrio da grandeza de interesse e Φ_0 é o seu valor inicial.

A Equação (2.10) explicita o valor de Φ em qualquer posição x do domínio $[-L_x/2; L_x/2]$. Entretanto, em determinadas situações, como a validação de soluções numéricas e a estimativa de parâmetros de processo, é importante determinar o seu valor médio, que pode ser obtido através da equação:

$$\bar{\Phi}(t) = \frac{1}{L_x} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \Phi(x, t) dx \quad (2.11)$$

Substituindo-se a Equação (2.10) em (2.11) e resolvendo-se a integral, obtém-se:

$$\bar{\Phi}(t) = \Phi_{eq} + (\Phi_0 - \Phi_{eq}) \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\left(2n-1\right) \frac{\pi}{L_x}\right]^2 \Gamma^{\Phi} t \quad (2.12)$$

2.9.1.2. Solução analítica bidimensional com condição de contorno de primeiro tipo em coordenadas retangulares

Um domínio contínuo bidimensional retangular, com dimensões L_x e L_y , é mostrado através da Figura 2.2.

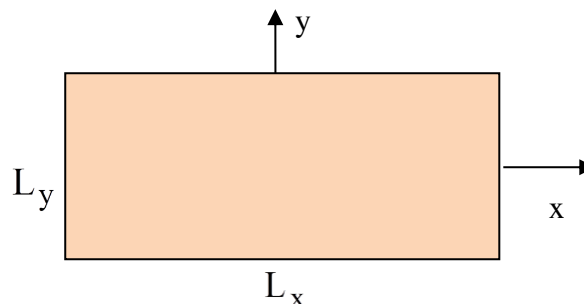


Figura 2.2: Domínio contínuo bidimensional.

A solução da Equação (2.8), com condição de contorno de primeiro tipo, tem a forma:

$$\Phi(x, y, t) = \Phi_{eq} + (\Phi_0 - \Phi_{eq}) \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{\ell} A_m \cos \left[\mu_{\ell} \frac{x}{L_x/2} \right] \cos \left[\mu_m \frac{y}{L_y/2} \right] \exp \left[- \left(\frac{\mu_{\ell}}{L_x/2} \right)^2 - \left(\frac{\mu_m}{L_y/2} \right)^2 \Gamma \Phi_t \right] \quad (2.13)$$

em que

$$A_q = \frac{2(-1)^{q+1}}{\mu_q} \quad (2.14)$$

$$\mu_q = \frac{(2q-1)}{2} \pi \quad (2.15)$$

e q representa os subscritos ℓ e m . A Equação (2.13) descreve o valor da variável Φ em qualquer instante t e posição (x,y) do domínio (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992).

Para calcular o valor médio de Φ no retângulo, pode-se usar a equação:

$$\bar{\Phi}(t) = \frac{1}{L_x L_y} \int_{-L_y/2}^{L_y/2} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \Phi(x, y, t) dx dy \quad (2.16)$$

Substituindo-se a expressão da Equação (2.13) em (2.16) e resolvendo-se a integral, encontra-se:

$$\frac{\bar{\Phi}(x, y, t) - \Phi_{eq}}{\Phi_0 - \Phi_{eq}} = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} B_{\ell} B_m \exp \left[- \left(\left(\frac{\mu_{\ell}}{L_x/2} \right)^2 + \left(\frac{\mu_m}{L_y/2} \right)^2 \right) \Gamma \Phi_t \right] \quad (2.17)$$

na qual

$$B_q = \frac{2}{\mu_q^2} \quad (2.18)$$

e q representa os subscritos ℓ e m .

2.9.1.3. Solução analítica tridimensional com condição de contorno de primeiro tipo em coordenadas retangulares

Para uma configuração tridimensional em coordenadas cartesianas, o domínio pode ser considerado como sendo um paralelepípedo com arestas L_x , L_y e L_z e os fluxos são considerados nas direções x , y e z , representado na Figura 2.3.

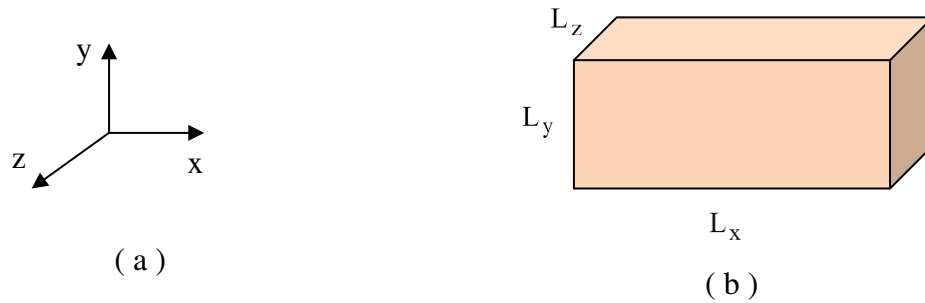


Figura 2.3: (a) Sistema cartesiano; (b) Domínio contínuo tridimensional.

De forma análoga aos resultados encontrados para o caso bidimensional, a solução da Equação (2.9) fornece o valor da grandeza Φ em qualquer posição (x, y, z) do domínio e no instante t e tem a forma (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992):

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_{eq} + (\Phi_0 - \Phi_{eq}) \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{\ell} A_m A_k \cos \left[\mu_{\ell} \frac{x}{L_x/2} \right] \cos \left[\mu_m \frac{y}{L_y/2} \right] \cos \left[\mu_k \frac{z}{L_z/2} \right] \exp \left[- \left(\left(\frac{\mu_{\ell}}{L_x/2} \right)^2 + \left(\frac{\mu_m}{L_y/2} \right)^2 + \left(\frac{\mu_k}{L_z/2} \right)^2 \right) \Gamma \Phi t \right] \quad (2.19)$$

em que

$$A_q = \frac{2(-1)^{q+1}}{\mu_q} \quad (2.20)$$

$$\mu_q = \frac{(2q-1)\pi}{2} \quad (2.21)$$

e q representa os subscritos ℓ , m e k.

O valor médio da grandeza Φ no paralelepípedo pode ser encontrado por:

$$\bar{\Phi}(t) = \frac{1}{L_x L_y L_z} \int_{-L_z/2}^{L_z/2} \int_{-L_y/2}^{L_y/2} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \Phi(x, y, z, t) dx dy dz \quad (2.22)$$

na qual V é o volume do paralelepípedo e $dx dy dz$, representa o volume do sólido em um volume infinitesimal.

Das Equações (2.19) e (2.22), obtém-se:

$$\frac{\bar{\Phi}(x, y, z, t) - \Phi_{eq}}{\Phi_0 - \Phi_{eq}} = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_{\ell} \cdot B_m \cdot B_k \exp \left[- \left(\left(\frac{\mu_{\ell}}{L_x/2} \right)^2 + \left(\frac{\mu_m}{L_y/2} \right)^2 + \left(\frac{\mu_k}{L_z/2} \right)^2 \right) \Gamma^{\Phi} t \right], \quad (2.23)$$

onde

$$B_q = \frac{2}{\mu_q^2} \quad (2.24)$$

e q representa os subscritos ℓ , m e k.

2.9.1.4. O uso de soluções analíticas da equação de difusão na desidratação osmótica

Diversas pesquisas envolvendo a desidratação de alimentos utilizam soluções analíticas da equação de difusão com as geometrias: esférica (SILVA et al., 2009a; SILVA et al., 2010), cilíndrica (DEROSSO et al., 2008; SILVA et al., 2009a; MERCALI et al., 2011; ABRAÃO et al., 2013; PORCIUNCULA et al., 2013) e cartesiana (FALADE et al., 2007; GARCIA et al., 2007; SILVA et al., 2013; SILVA et al. 2014a; SOURAKI et al., 2014).

Desidratação osmótica de fatias de rabanete em solução de cloreto de sódio, sob diferentes condições experimentais, foi realizada por Herman-Lara et al. (2013) na busca pelos valores de equilíbrio na transferência de massa, considerando-se os períodos dinâmico e estacionário. A solução analítica desenvolvida por Crank (1992) para uma placa plana foi usada, uma vez que os fluxos radiais foram desprezados devido à alta relação entre as dimensões nas direções axial e radial. Com o auxílio de regressão não-linear e da metodologia da superfície de resposta, foram determinados as difusividades de água e de soluto e o comportamento da transferência de massa foi analisado como uma função do tempo, da temperatura e da concentração da solução osmótica. Os resultados mostraram que temperaturas mais elevadas promovem maior perda de água e ganho de solutos e que, a difusividade de soluto aumenta com o crescimento da concentração da solução.

A transferência de massa na desidratação osmótica de goiabas em forma de paralelepípedo foi descrita por Silva et al. (2014b). Foram analisados a perda de água e o ganho de solutos em duas condições experimentais distintas, a saber: concentração do meio osmótico de 40 °Brix e temperatura 30 °C; concentração de 50 °Brix e temperatura de 40 °C. Para determinar as difusividades de massa, a solução analítica tridimensional da equação de difusão, com condição de contorno de primeiro tipo, foi acoplada a um otimizador desenvolvido por Silva et al. (2009a), baseado em método inverso. Algumas hipóteses foram impostas, dentre elas, o volume do sólido e os coeficientes de difusão constantes. Com os valores encontrados da difusividade efetiva de massa foram realizadas simulações das cinéticas. As comparações com os dados experimentais e os simulados mostraram boa precisão com base nos indicadores estatísticos. Segundo os autores, se os resultados obtidos com as suposições restritivas não fossem satisfatórios, seria possível usá-los como valores

iniciais em processos de otimização envolvendo soluções numéricas da equação de difusão desenvolvida.

2.9.2. Métodos numéricos

A solução analítica de uma equação diferencial que modela um problema físico nem sempre retrata a realidade, tendo em vista as hipóteses restritivas que geralmente são feitas para que estas soluções sejam obtidas. Por outro lado, os métodos numéricos para resolução de equações ou sistemas de equações diferenciais apresentam boa adequação, uma vez que podem ser aplicados em problemas complexos, sem que haja necessidade de restrições usualmente utilizadas na obtenção das soluções analíticas. Além disso, permitem a utilização de geometrias mais complexas, a exemplo das que utilizam coordenadas generalizadas (SILVA et al., 2009a). Nos últimos anos, a modelagem matemática e a simulação computacional tornaram-se as principais ferramentas para a descrição, otimização e controle do processamento de alimentos (FABBRI et al., 2014). Soluções numéricas baseiam-se na substituição das derivadas existentes nas equações diferenciais por expressões algébricas, simplificando a sua resolução. Com o avanço da tecnologia, os computadores estão cada vez mais rápidos e potentes, o que contribui para o uso deste tipo de abordagem.

Os métodos numéricos clássicos são: método das diferenças finitas (MDF), o método dos elementos finitos (MEF) e o método dos volumes finitos (MVF).

O MDF consiste em substituir as derivadas da equação diferencial por diferenças, gerando uma equação algébrica. Muito empregado na área de mecânica dos fluidos, pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, estruturadas ou não (MALISKA, 2010). O método de Crank-Nicolson é baseado no MDF, particularmente, utilizando-se diferenças centrais.

Por outro lado, o MEF é mais aplicado na área de elasticidade. É considerado eficaz para geometrias mais complexas, podendo ser usados em malhas não estruturadas. O domínio é subdividido em elementos menores, denominados elementos finitos. Para cada elemento é desenvolvida uma solução aproximada da equação diferencial (MALISKA, 2010). A solução total é gerada pela união das soluções individuais de cada elemento, tendo o cuidado para garantir a continuidade das fronteiras. As soluções individuais envolvem funções de aproximação que se baseiam em equações integrais.

Ambos os métodos, MDF e MEF, não trabalham com volumes de controle, apenas com pontos da malha, não sendo, portanto, conservativos em nível discreto (MALISKA, 2010).

2.9.2.1. O método dos volumes finitos (MVF)

O MVF é considerado um método robusto, tendo em vista que satisfaz os princípios de conservação em nível discreto, para qualquer tamanho de malha. Este método realiza um balanço de conservação da propriedade em cada volume de controle para obter a correspondente equação aproximada. Três etapas são essenciais em sua aplicação (MALISKA, 2010):

- Transformar o domínio contínuo em um domínio discreto, definindo a malha que será utilizada, formada por volumes finitos ou volumes de controle;
- Realizar os balanços da propriedade que é o objeto de estudo nos volumes finitos;
- Integrar sobre o volume de controle, no tempo e no espaço, as equações na forma conservativa.

A equação discretizada resultante satisfaz a conservação das propriedades em cada volume de controle, como também, em todo o domínio computacional.

Para que se realize a integração temporal da variável de interesse, algumas aproximações das derivadas de funções da variável Φ em relação às variáveis de posição precisam ser feitas. Desta forma, é necessário definir em que instante pode ser feito, se no início, em um instante intermediário ou no final do intervalo. Para tal, deve-se estabelecer uma função de interpolação que defina este momento. Uma destas funções pode ser dada por (MALISKA, 2010):

$$\Phi^\theta = \theta\Phi + (1 - \theta)\Phi^0 \quad (2.25)$$

em que Φ^0 indica o valor da variável no estepe de tempo anterior e θ se refere ao tempo de avaliação de Φ . Os valores atribuídos a θ definem o tipo de formulação a ser usada.

A Figura 2.4 retrata o tipo de formulação de acordo com o instante de avaliação da grandeza de interesse.

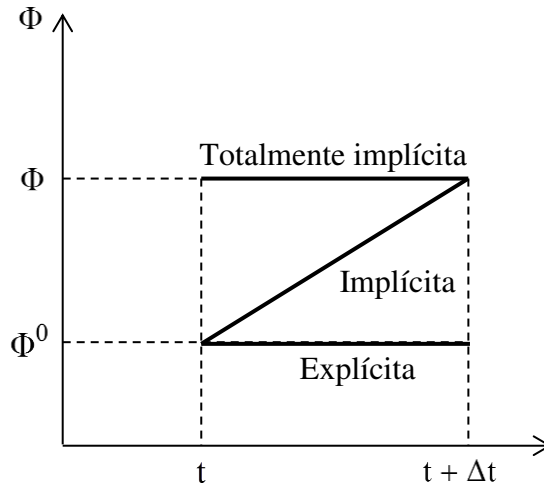


Figura 2.4: Funções de interpolação no tempo (Adaptado de Maliska, 2010).

Considerando-se um domínio unidimensional, para um determinado volume de controle que estiver sendo analisado, o seu ponto nodal será representado por P; W e E são os pontos nodais dos volumes localizados à esquerda e à direita, respectivamente.

- Para $\theta = 0$, a formulação é dita explícita. Para se determinar Φ em um ponto nodal P de um volume de controle, no instante $t + \Delta t$, faz-se necessário uma avaliação da variável Φ em sua vizinhança, no estepe de tempo anterior t, onde já são conhecidos. Ou seja, nesta formulação, Φ_P pode ser escrito em função de Φ_W e Φ_E , gerando um conjunto de equações a serem resolvidas. O esquema da Figura 2.5, mostra de forma mais clara esta formulação (MALISKA, 2010).

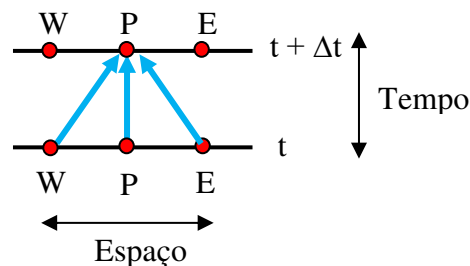


Figura 2.5: Esquema da formulação explícita (Adaptado de Silva, 2009).

- Para $0 < \theta < 1$, a formulação é denominada implícita. Caracteriza-se pelo fato de que a avaliação da grandeza de interesse é feita em um tempo intermediário do intervalo e os seus valores são tomados como uma média dos valores desta grandeza no início e no final do intervalo de tempo. Neste caso, para saber o valor de Φ_P no instante $t + \Delta t$, faz-se necessário avaliar Φ_W e Φ_E , no mesmo estepe de tempo e no estepe anterior, como também, Φ_P no estepe anterior. É considerada a formulação mais geral, porém demanda mais trabalho na programação (MALISKA, 2010).

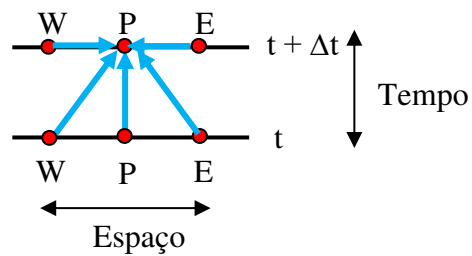


Figura 2.6: Esquema da formulação implícita (Adaptado de Silva, 2009).

- Para $\theta = 1$, tem-se a formulação totalmente implícita e a avaliação de Φ é feita no final do intervalo. Para determinar Φ_P em um determinado instante $t + \Delta t$, é necessário avaliar Φ_W e Φ_E , no mesmo instante, e Φ_P no instante anterior. Esta formulação gera um sistema de equações lineares, e é considerado incondicionalmente estável (MALISKA, 2010).

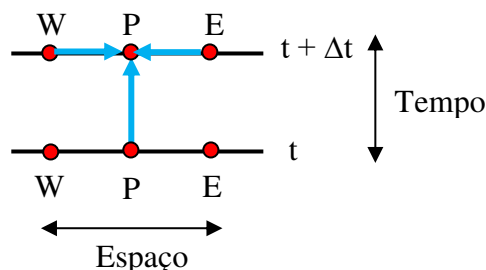


Figura 2.7: Esquema da formulação totalmente implícita (Adaptado de Silva, 2009).

Na presente pesquisa, a equação de difusão que modela a transferência de massa é resolvida através do método dos volumes finitos, com uma formulação totalmente implícita, cujo sistema de equações algébricas gerado será resolvido pelo método iterativo de Gauss-Seidel, mencionado a seguir.

2.9.2.2. Métodos iterativos para sistemas lineares: Método de Gauss-Seidel

De uma forma geral, os métodos de resolução de sistemas de equações são classificados como diretos e iterativos.

Os métodos diretos, em sua maioria, envolvem matrizes completas do sistema e, em sua resolução, tais matrizes devem ser invertidas. Dependendo do problema, este tipo de abordagem torna-se inviável, devido à dificuldade de se lidar com inversão de matrizes quando o número de equações do sistema é elevado (MALISKA, 2010).

Os métodos iterativos para a resolução de sistemas lineares, por sua vez, necessitam de uma estimativa inicial dos valores para as incógnitas do sistema que, neste caso, podem ser as condições iniciais. Procede-se as iterações até que um critério de convergência pré-estabelecido seja satisfeito (MALISKA, 2010).

O método de Gauss-Seidel é um método iterativo no qual se explicita o valor das incógnitas em todas as equações do sistema, atualizando os valores obtidos no mesmo ciclo iterativo, isto é, à medida que os valores de Φ no ponto nodal P são encontrados, já são utilizados no mesmo estepe de tempo. Em seguida, comparam-se tais valores com os valores da iteração anterior, estabelecendo-se uma tolerância. Caso não tenha sido alcançada, o processo se repete até que isto aconteça (MALISKA, 2010).

2.9.2.3. O uso de métodos numéricos na desidratação osmótica

Poucos trabalhos utilizam soluções numéricas da equação de difusão no estudo da desidratação osmótica.

Kaymak-Ertekin e Sultanoglu (2000) desidrataram fatias de maçãs em solução de sacarose, dextrose e uma combinação de ambos, em diferentes condições experimentais, durante 8 horas. A equação de difusão para a placa infinita foi resolvida numericamente pelo método de Crank-Nicolson de diferenças finitas. No desenvolvimento do modelo, a difusividade foi adotada como constante e o encolhimento foi desprezado. O modelo de Azuara foi utilizado na estimativa dos valores de equilíbrio para a perda de água e o ganho de sólidos. Os valores dos coeficientes de difusividade de massa foram determinados via otimização e ficaram na ordem de 10^{-11} a $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Borsato et al. (2010) desidrataram osmoticamente cilindros de maçãs do tipo Gala, em solução de sacarose com 60 °Brix de concentração e proporção 1:20 de fruta para solução. Uma equação diferencial envolvendo as concentrações e difusividades de soluto e água foi resolvida através do método dos elementos finitos, com condição de contorno de terceiro tipo. Foram adotadas as hipóteses de que os coeficientes de difusão mássica eram constantes em relação à concentração da solução, independentes do tempo e da posição, bem como, que o volume da amostra não variava em todo o processo. As difusividades e o número de Biot foram ajustados por otimização. Os resultados mostraram que, ao final de 33 horas, o teor de umidade nas extremidades dos pedaços de maçã foi de 41,5% e de 60,1% no centro da fruta, enquanto que o ganho de sacarose foi de 58,5% nas extremidades e 39% no centro das maçãs. Segundo os pesquisadores, os dados simulados foram coerentes com os experimentais, mostrando que o MEF foi apropriado para o que propunha a pesquisa.

A influência dos parâmetros do processo de desidratação osmótica de abóbora foi investigada por Abraão et al. (2013). Foram usadas as concentrações de 40, 50 e 60 °Brix da solução de sacarose, com as temperaturas de 40, 50 e 60 °C e com agitação do meio osmótico. A equação de difusão para o cilindro baseada na lei de Fick foi resolvida através do método das diferenças finitas, com condições de contorno de primeiro tipo, utilizando-se um programa desenvolvido na linguagem FORTRAN. Foi assumido que as difusividades de massa eram constantes e que não havia variação no volume das amostras. De acordo com os pesquisadores, os resultados obtidos mostraram que o aumento da temperatura elevou os valores das difusividades de água e sacarose. Por outro lado, embora a concentração mais alta da solução não tenha aumentado a difusividade de sacarose, contribuiu para o aumento da difusividade da água. Foi observado, também, que a concentração mais alta causou

plasticidade no tecido do produto, tornando-o quebradiço. O modelo foi considerado eficaz para descrever o processo.

O método das diferenças finitas foi aplicado por Porciuncula et al. (2013) na desidratação osmótica de banana. O objetivo principal da pesquisa foi comparar as difusividades de massa obtidas pelo método numérico e através da solução analítica bidimensional, com configuração cilíndrica. Simulações com três tipos distintos de coeficiente de difusão de massa foram realizadas: constante, linearmente dependente do teor de umidade e dependente do teor de umidade segundo uma função exponencial. Em todo o processo o encolhimento do fruto foi desprezado. Os resultados mostraram que o comportamento exponencial para o coeficiente de difusão é mais apropriado.

Desidratação osmótica de nectarina foi realizada por Rodríguez et al. (2013) com o objetivo de analisar a relação entre concentração e proporção da solução, temperatura e tipo de soluto, com o ganho de sólidos e a perda de água. As difusividades foram consideradas constantes e foram determinadas por meio de ajuste dos valores encontrados através da solução analítica da equação de difusão unidimensional para a placa infinita e pelo método dos elementos finitos, considerando a geometria próxima da real. A desidratação osmótica foi realizada em duas temperaturas distintas, com xarope de glicose ou sorbitol, nas proporções de 1:4 e 1:10 de fruta para solução. Todas as condições experimentais resultaram em 16 situações distintas. Os resultados mostraram que os aumentos da proporção e da concentração de 40 para 60 °Brix ocasionaram em maior perda de água, que foi intensificado quando o sorbitol foi utilizado como agente osmótico. Resultados semelhantes foram obtidos para o ganho de sólidos. Para todas as situações, o índice de eficiência foi calculado, alcançando valores superiores a 1, o que indica que a perda de água foi maior que o ganho de sólidos. Os valores obtidos para as difusividades de massa através da solução analítica foram sempre superiores aos determinados pela solução numérica, e estes, foram condizentes com a literatura. Os autores defendem que o fato de atribuir o fluxo em uma única direção, na solução analítica, superestima a taxa de difusão para a perda de água e o ganho de sólidos.

A descrição da desidratação osmótica de fatias de goiabas foi realizada por Silva et al. (2014c). A equação de difusão unidimensional foi resolvida pelo método dos volumes finitos com condição de contorno de primeiro tipo. Foram utilizados dois modelos matemáticos, considerando: difusividade constante e ausência de encolhimento; difusividade

variável e presença de encolhimento. Segundo os autores, os dois modelos apresentaram bons resultados. O encolhimento pode provocar mudanças internas na fruta que interferem na difusividade de massa. Os autores conjecturam que o fato do primeiro modelo apresentar bons indicadores estatísticos deve resultar de erros do modelo que foram mutuamente cancelados. O segundo modelo, por sua vez, foi considerado mais consistente com o problema físico.

2.10. Estimativa dos parâmetros de processo na desidratação osmótica

A determinação dos parâmetros de transferência de massa nos processos de difusão é de extrema importância para que sejam realizadas simulações do fenômeno por meio de modelos difusivos. De acordo com Yadav e Singh (2012), no processo de desidratação osmótica os parâmetros mais importantes são as difusividades de água e soluto. Sendo conhecida a difusividade efetiva torna-se possível prever a taxa de transferência de massa com maior precisão.

Em grande parte dos trabalhos encontrados na literatura, o valor da difusividade efetiva de massa é determinado através de regressão não-linear, utilizando-se um único ou poucos termos da série que representa a solução analítica. Segundo Silva et al. (2009a), apesar deste procedimento apresentar bons resultados ao longo do processo, pode acarretar em discrepâncias, sobretudo nos instantes iniciais do fenômeno. Além disso, se um número maior de termos for utilizado, a técnica torna-se inviável com o uso de softwares comerciais, uma vez que a série que representa a solução analítica tem que ser informada ao programa.

Os métodos inversos têm despertado um crescente interesse por parte de alguns pesquisadores na busca pelos melhores parâmetros para o processo (SILVA et al., 2009b; SILVA et al., 2010; FABBRI et al., 2014). Consistem em uma técnica matemática que combina modelos com algoritmos de otimização adequados, usados para determinar o melhor conjunto de parâmetros que minimizam uma função objetivo.

Derossi et al. (2008) realizaram desidratação osmótica de cilindros de maçã, com 15 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento, em solução de sacarose. A solução analítica da equação de difusão para a geometria de cilindro finito foi utilizada. As difusividades de massa foram determinadas por otimização, utilizando-se 700 valores de difusividade em um

determinado intervalo. O erro encontrado foi próximo de zero, sendo considerado satisfatório, e os valores encontrados para a difusividade foram $4,10 \times 10^{-10}$ e $1,81 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para água e sacarose, respectivamente.

Silva et al. (2010) utilizaram a solução analítica da equação de difusão para sólidos esféricos na descrição da desidratação osmótica de acerolas. A difusividade efetiva de massa foi estimada através de método inverso, utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt, baseado na norma dos mínimos quadrados. Segundo os pesquisadores, este método tem sido usado com sucesso na estimativa de parâmetros e apresenta vantagens por ser estável e apresentar uma boa taxa de convergência. Eles concluíram que o método atendeu às expectativas, mostrando resultados coerentes com os dados experimentais e com outros trabalhos envolvendo o mesmo fruto e as mesmas condições experimentais.

A difusividade efetiva de água D foi estudada durante a desidratação osmótica de carne de caprino, realizada por Corzo et al. (2014), utilizando-se cloreto de sódio (NaCl) e combinações de dois ou mais tipos de sal, dentre as variedades: NaCl, KCl (cloreto de potássio), CaCl_2 (cloreto de cálcio) e MgCl_2 (cloreto de magnésio). Os pedaços de carne foram cortados em forma de paralelepípedo com dimensões 4cm, 4cm e 1 cm e imersos na solução osmótica em temperatura ambiente. A modelagem matemática foi feita através da equação de difusão. A solução analítica bidimensional, com condição de contorno de primeiro tipo, foi acoplada a dois algoritmos otimizadores distintos: o primeiro baseado no método de Levenberg-Marquardt, e o outro, desenvolvido por Silva et al. (2009a). Foram considerados os vinte e cinco primeiros termos da série que representa a referida solução. A maior diferença entre os valores de D fornecidos pelos dois algoritmos foi de 10,68%. Segundo os autores, os dois métodos resolveram o problema de forma satisfatória, entretanto, de acordo com os indicadores estatísticos, o algoritmo desenvolvido por Silva et al. (2009a) foi significativamente superior, além de apresentar menor tempo de desempenho e requisitar apenas de um conjunto de dados experimentais para a sua execução.

2.11. A maçã

A maçã, cujo nome científico é *Malus domestica*, é uma fruta proveniente da macieira, da família Rosaceae, que também inclui damascos, cerejas, pêssegos, pera e ameixa. É

originada da região do Cáucaso, cadeia de montanhas da Ásia e leste da China. A maçã é um dos quatro frutos mais consumidos no mundo, sendo usada principalmente *in natura*, em forma de suco concentrado, de vinagre, desidratada e em bebidas fermentadas, a exemplo da sidra. É uma fruta rica em fenóis, substâncias pécnicas e celulose, que juntamente com a lignina constituem a fibra (PETRI e LEITE, 2008).

De acordo com a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO, 2011), em 100 gramas de maçã, cultivar Fuji, pode-se encontrar as seguintes quantidades, em média, de vitaminas e minerais, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Composição da maçã Fuji por 100g de parte comestível.

Umidade (%)	84,3	Carboidrato(g)	15,2	Cobre (mg)	0,06
Energia (kcal)	56	Fibra alimentar(g)	1,3	Ferro (mg)	0,1
Energia (kJ)	232	Cálcio (mg)	2	Vitamina C (mg)	2,4
Proteína (g)	0,3	Magnésio (mg)	2	Fósforo (mg)	9

Fonte: TACO (2011).

A maçã, especialmente o seu bagaço, é uma importante fonte de pectina, o seu teor é superior a 15% em base seca (CANTERI et al., 2012). Esta substância é muito utilizada na tecnologia de alimentos, promove o aumento da viscosidade e funciona como estabilizante no preparo de doces, geleias, iogurtes, produtos de panificação, dentre outros. Existem trabalhos na literatura que reportam sobre a existência e a extração desta substância na maçã (GWANPUA et al., 2014; WIKIERA et al., 2015).

Dos açúcares solúveis presentes em sua composição, a sucrose é predominante, responsável por 44-75% do total, enquanto que o ácido málico prevalece com até 90% dos ácidos orgânicos totais (MA et al., 2015).

Segundo Hecke et al. (2006), os polifenóis são compostos orgânicos que podem ser encontrados na casca e na polpa de frutas, enquanto que os flavonoides podem contribuir na sua cor e sabor. Ambos fazem parte dos compostos fenólicos presentes na maçã. Aktas et al. (2013) defendem que a preferência por maçã, dentre os produtos secos, é devido à atividade antioxidante dos polifenóis presentes em sua composição. Segundo os pesquisadores, os

polifenóis contribuem para a qualidade sensorial tanto de alimentos frescos, como de alimentos transformados por algum processo deste gênero.

2.11.1. Produção mundial e nacional

Segundo dados divulgados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, MAPA (2013), a produção de maçã cresceu cerca de 28% nas últimas seis safras, como mostra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Maçã - Produção mundial (em mil toneladas métricas).

Ano	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13
Produção	53.081	60.550	62.342	62.318	66.500	67.852
China	24.800	29.800	31.681	33.263	35.985	38.000
União Europeia	10.295	12.655	12.021	10.886	12.069	11.297
Estados Unidos	4.103	4.327	4.288	4.174	4.224	4.200
Outros	13.883	13.768	14.353	13.996	14.221	14.355

Fonte: MAPA (2013).

A produção mundial de maçã em 2013 foi de 80.822.520 toneladas, enquanto que a produção brasileira, no referido ano, foi de 1.231.472 toneladas (FAO, 2015).

Os estados brasileiros que se destacam na produção desse fruto são Santa Catarina (18 mil ha) e Rio Grande do Sul (17 mil ha), que concentram 96% dos pomares brasileiros (MAPA, 2013).

Os principais concorrentes do Brasil na América do Sul, tanto no mercado interno como no externo, são Chile e Argentina, que produzem quantidades semelhantes ao Brasil. Entre os anos de 1995 a 1996, as importações realizadas pelo Brasil ficaram em torno de 20%. No ano de 2013, este percentual caiu para 5%. Do volume total produzido, 25% vão para o mercado externo. Em 2012 cerca de 72 mil toneladas de maçãs foram exportadas pelo Brasil, o que corresponde a 24% a mais comparando com o ano de 2001 (MAPA, 2013).

A Tabela 2.4 expõe informações acerca da produção e suprimento de maçã no Brasil, expressas em toneladas (Ton).

Tabela 2.4: Suprimento de maçã no Brasil de 2006 a 2012.

Ano	Produção (Ton)	Importações de maçãs frescas (Ton)	Exportações de maçãs frescas e sucos (Ton)	Suprimento doméstico (Ton)	Suprimento por habitante (Kg/hab/ano)
2006	863.019	77.741	215.638	782.344	4,22
2007	1.115.319	68.574	323.016	973.240	5,19
2008	1.124.155	55.042	326.883	965.104	5,09
2009	1.222.885	61.343	252.706	1.130.220	5,90
2010	1.279.026	76.879	359.679	1.087.811	5,63
2011	1.338.995	96.565	282.941	1.202.837	6,17
2012	1.335.478	57.920	331.734	1.135.813	5,78

Fonte: MAPA (2013).

Elaborado por CGPCP/DEAGRO/SPA/MAPA com base nos dados do IBGE e SECEX/MDIC.

O melhoramento genético é uma prática comum no cultivo de maçã e pode ter como consequência o aumento da capacidade produtiva, a variação no tamanho, na aparência e sabor, na resistência às doenças comuns a esta fruta, resultando em um produto de qualidade superior. As principais cultivares produzidas no Brasil são a Gala, a Fuji e seus clones, que juntos correspondem a aproximadamente 90% da produção, sendo 55% da variedade Gala e 40% da família da Fuji (FIOAVANÇO e SANTOS, 2013).

Os principais clones desenvolvidos atualmente no Brasil são: Galaxy, Baigent (Broofield), Maxi Gala, Fuji Suprema e Fuji Mishima. Além das cultivares Gala e Fuji, são também produzidas no Brasil, porém em menor escala, as variedades Eva, Condessa, Imperatriz, Monalisa, Baronesa, Daiane, Joaquina e Cripps Pink ou Pink Lady (FIOAVANÇO e SANTOS, 2013).

O setor de produção de maçã é um dos mais importantes segmentos do agronegócio da fruticultura brasileira, sendo responsável pela geração de um expressivo número de empregos (PETRI e LEITE, 2008).

2.11.2. Desidratação osmótica (DO) de maçã

Segundo Castro-Giráldez et al. (2011), a desidratação osmótica em sistemas multifásicos como a maçã, isto é, sistemas que contém em sua formação líquidos dispersos com gás, produzem fenômenos de transferência de massas simultâneos com alterações físicas e estruturais. Na composição da maçã encontram-se vários elementos, tais como: água, sólidos não solúveis, sólidos solúveis e gases. Estudos indicam que a pectina contida no tecido da maçã contribui de forma decisiva na porosidade do seu tecido, a qual favorece a penetração de soluto e a retirada de água. Uma alta concentração do meio osmótico circundante em materiais porosos pode provocar um aumento significativo de penetração de soluto e do transporte de água através dos poros do alimento (MAVROUDIS et al., 2012).

Moreira e Sereno (2003) realizaram desidratação osmótica com maçãs da variedade *Golden delicious*, cortadas em forma cilíndrica, com solução de sacarose a 40, 50 e 60 °Brix. No referido trabalho, os autores analisaram os coeficientes de transferência de massa e o encolhimento do produto sob condições estáticas e não estáticas, utilizando o modelo de Magee (Tabela 2.1) para a condição estática e uma extensão do mesmo, para condições não estáticas. De acordo com os autores, o aumento de concentração de sacarose na solução influenciou diretamente na transferência de massa, sendo mais significativa na transferência de água, que ocorreu durante todo o processo (2 horas), enquanto que o ganho de sólidos foi mais importante na primeira hora. Comparando-se os resultados obtidos sob condições estáticas e não estáticas, eles verificaram que a perda de água foi mais significativa em condições de fluxo turbulento, atingindo um teor de umidade de equilíbrio mais baixo do que no regime sem agitação do meio osmótico, enquanto que o ganho de sólidos foi semelhante nos dois casos. No que se refere ao encolhimento do produto, os autores obtiveram uma relação linear entre o teor de umidade e sua contração volumétrica, independente das condições utilizadas. Concluíram, ainda, que os resultados foram satisfatórios e interessantes

para a indústria, visto que, o processo utilizando agitação do meio osmótico, promove um aumento na perda de água sem comprometer o ganho de soluto.

Visando estudar a relação entre a transferência de massa e a concentração da solução osmótica, durante a desidratação osmótica, Azuara et al. (2009) desidrataram maçãs, variedade *Golden Delicious*, em sacarose a 60 °Brix com temperatura de 40 °C, durante uma hora. As frutas foram cortadas ao meio, com diâmetro interno medindo 20 mm e espessura de 1,5 mm. As maçãs cortadas permaneceram com a casca, de modo a favorecer o transporte de fluxo apenas através da face em que foi cortada. Uma sonda tubular foi utilizada para extrair amostras cilíndricas. Os cilindros de maçã foram analisados imediatamente após a DO, em seguida, após 4 e 24 horas de armazenamento. A solução analítica unidimensional da equação de difusão com condição de contorno de primeiro tipo foi utilizada para determinar as difusividades de massa em função da concentração. Os valores encontrados foram $1,53 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,05 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ para as difusividades de água e sacarose, respectivamente. O estudo demonstrou que, após uma hora do início do processo, a amostra perdeu 0,37 kg de água / kg de maçã e absorveu 0,30 kg de sacarose / kg de maçã. A resistência à absorção de sacarose foi maior que a resistência à perda de água, o que, segundo os autores, explica a eficiência do processo de desidratação osmótica em frutas.

Maçãs do tipo *Idared*, cortadas em formato cúbico, com arestas medindo 1 cm, foram osmoticamente desidratadas por Koprivica et al. (2013). A solução utilizada foi melaço de beterraba com concentrações de 40, 60 e 80 °Brix e temperaturas de 45, 55 e 65 °C, durante 300 minutos. A equação de Peleg foi empregada como um primeiro modelo, juntamente com a análise da variância, com o objetivo de investigar a influência dos parâmetros: temperatura, concentração da solução e tempo de imersão na perda de água, por parte da maçã. O método dos mínimos quadrados também foi utilizado com o *software* MathCad 14.0, no sentido de determinar as constantes inerentes ao modelo. Foi constatado que existe uma relação entre a temperatura e a concentração da solução com as constantes do modelo de Peleg. De acordo com os autores, este modelo descreveu bem a perda de água e revelou que a concentração da solução osmótica é o parâmetro mais significativo, enquanto que a temperatura é o parâmetro de menor importância para o processo. A utilização de um conjunto de dados experimentais e a análise da variância mostrou que uma das constantes do modelo poderia ser aproximada por 1, sem que o coeficiente de correlação R^2 fosse alterado. Desta forma, obteve-se uma equação

matemática mais simples, a partir da equação de Peleg, que modelou de forma adequada a perda de água do fruto imerso na solução de melação de beterraba, sob as condições descritas acima.

Souraki et al. (2014), objetivando relacionar difusividade efetiva de massa com encolhimento e teor de umidade, desidrataram osmoticamente fatias de maçãs do tipo *Golden* durante 6 horas, em solução de sacarose nas concentrações 30, 40 e 50 °Brix, nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C. As fatias foram consideradas como placas infinitas. A equação de difusão unidimensional com condição de contorno de primeiro tipo foi resolvida pelo método de separação de variáveis, considerando-se o primeiro termo da série que representa a sua solução para estimar a perda de água e o ganho de sólidos. O modelo foi ajustado aos dados experimentais para estimar a difusividade efetiva de massa, considerando o encolhimento da amostra e a ausência do mesmo. Um modelo desenvolvido por Azuara et al. (1992) foi usado para estimar os valores de equilíbrio. A análise dos resultados revelou que o encolhimento da maçã pode ser representado por uma função linear que depende principalmente da perda de água, da redução do peso ou do teor de umidade normalizado. Além disso, foi constatado que os valores de difusão efetiva de massa são menores quando o encolhimento é considerado, levando os autores a concluírem que a segunda lei de Fick de difusão sem considerar o encolhimento, superestima a transferência de massa por difusão.

Yildiz et al. (2016) realizaram desidratação osmótica de fatias de maçã do tipo *Golden deliciuos*, com dimensões 10 x 10 x 50 mm. As fatias foram submetidas à pré-tratamento elétrico em nove condições distintas, obtidas através de combinações entre três diferentes voltagens em três instantes de tempo. A solução osmótica composta de sacarose e água destilada tinha concentração de 50 °Brix e temperatura de 40 °C. No estudo do processo, a difusividade de massa foi considerada constante, o encolhimento foi desconsiderado e o método das diferenças finitas foi aplicado a um modelo difusivo. O critério adotado para o término do processo foi o teor de matéria seca das amostras atingirem 40% do total da massa. Foi realizada análise da distribuição de massa de água e sacarose nas fatias de maçã. Os autores concluíram que o pré-tratamento aplicado foi eficaz na transferência de massa e que o aumento da taxa de transferência ocorreu quando o mesmo foi aplicado em baixa tensão e em intervalos de tempo mais curtos. O menor tempo obtido foi 110 minutos para as amostras pré-tratadas a 32 Volts/cm durante 20 ou 30 s.

2.12. Secagem de alimentos

Produtos higroscópicos possuem uma fina camada de água em sua superfície. No início do processo de secagem, denominado período de acomodação, o calor fornecido é responsável pelo aumento da temperatura do produto e da pressão de vapor da água (PARK et al., 2001). Em seguida, a água transportada é a água livre presente no alimento. O transporte de água, em condições fixas de fluxo de ar, ocorre a uma velocidade constante por um período de tempo, denominado de período de taxa constante. Segundo Fioreze (2004), este fenômeno ocorre também em produtos nos quais a resistência interna para o transporte de água é inferior à resistência externa, responsável pela evaporação de água na superfície. Após este ínterim surgem, na superfície do produto, regiões onde não existe mais a película de água. Neste instante, diz-se que o alimento atingiu a umidade crítica. Em seguida, forma-se na superfície do alimento uma camada seca que dificulta a transferência da água que se encontra no interior. Desta forma, a secagem ocorre de forma mais lenta, caracterizando o período de taxa decrescente. Neste período, a resistência interna é maior do que a externa.

A Figura 2.8 mostra os gráficos típicos de uma secagem.

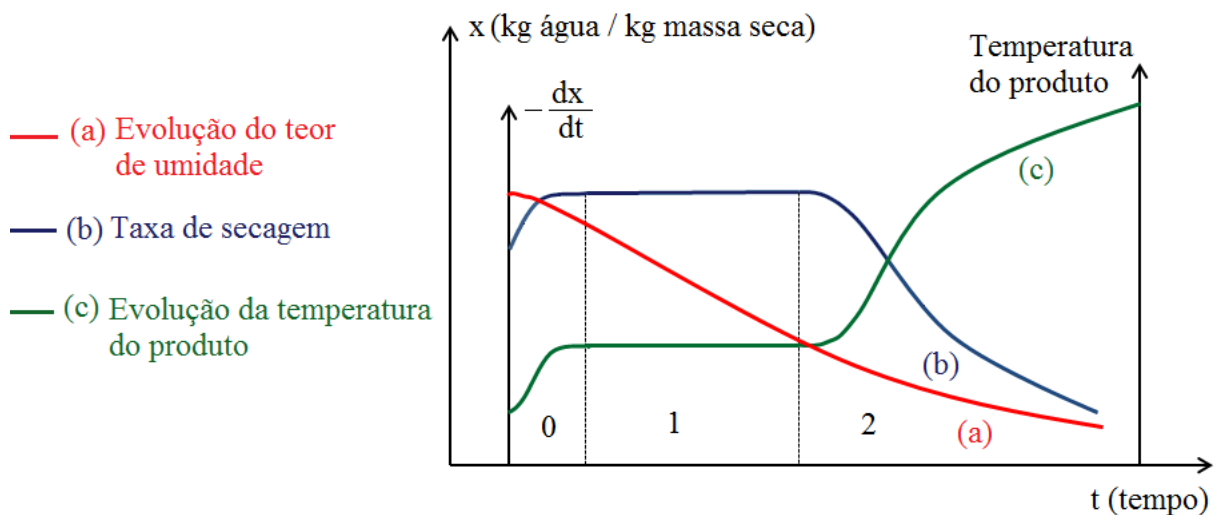


Figura 2.8: Curvas típicas de secagem (Adaptado de Park et al., 2001).

Na Figura 2.8 tem-se que a curva (a) representa o decréscimo do teor de umidade do alimento em relação ao tempo t de secagem. A curva (b) representa a velocidade ou taxa de

secagem do produto em relação a evolução do tempo t . A curva (c), por sua vez, mostra a evolução da temperatura T , em relação ao tempo t , durante a secagem. Em relação aos períodos, tem-se que o período 0 (zero) é o período de acomodação; o período 1 é o de taxa constante, e o período 2, é denominado período de taxa decrescente (PARK et al., 2001).

A secagem de alimentos é uma técnica muito utilizada pelo setor industrial e corresponde a até 15% do consumo de energia deste setor. Este processo tem como principal objetivo diminuir a atividade de água e prevenir a deterioração, com custo mínimo e promovendo qualidade máxima do produto final (TELES et al., 2006). Se for realizada de forma inadequada, além de danificar o alimento, causando alterações de cor, sabor, textura e aroma, poderá consumir energia em excesso, o que torna o processo oneroso. O conhecimento dos mecanismos de transferência de água do interior de um produto durante a secagem evita perdas deste produto e também de energia. Neste sentido, a modelagem matemática tem um papel fundamental no estudo da secagem, tendo em vista a sua complexidade. O uso de modelos matemáticos precisos para simular as curvas de secagem de alimentos é de fundamental importância para se obter um melhor controle do processo (KALETA e GÓRNICKI, 2010). Os modelos mais utilizados na modelagem da secagem baseiam-se nos mecanismos do fenômeno, geralmente usando as equações de Fick, de Fourier ou ambas, para representar os fenômenos de transporte de massa e calor (SILVA et al 2009a, PERUSSELLO et al., 2014). Os modelos empíricos têm larga aplicação e se norteiam pelo comportamento matemático dos dados experimentais (KALETA e GÓRNICKI, 2010; SANTOS et al., 2011).

Silva et al. (2009a) desenvolveram um algoritmo otimizador que foi acoplado à solução analítica da equação de difusão, com condição de contorno de primeiro tipo, para descrever a cinética de secagem do feijão Caupi. Foram considerados 200 termos da série infinita que representa esta solução. De acordo com os autores, o algoritmo desenvolvido não necessita de valores iniciais para o processo de otimização. As difusividades foram estimadas adequadamente e o maior erro registrado foi de 0,3%, no início do processo.

Silva et al. (2009b) desenvolveram uma solução numérica da equação de difusão que descreve a transferência de calor e transporte de massa em sólidos de revolução, com condição de contorno de equilíbrio e coordenadas generalizadas, usando o MVF. Os autores usaram conceitos de simetria e a equação de difusão bidimensional, objetivando reduzir o

esforço computacional na descrição de processos de difusão. Para validar a solução numérica, foram feitas três simulações: com feijão Caupi utilizando a geometria esférica, arroz com geometria de cilindro finito e difusividade constante, e arroz, considerando a mesma geometria, entretanto, com difusividade variável. Os pesquisadores concluíram que o modelo também pode ser usado para sólidos longos obtidos por extrusão e que os resultados obtidos eram condizentes com a literatura.

Santos et al. (2011) estudaram o processo de secagem por raios infravermelhos em maçãs Fuji e Gala, com o objetivo de modelar as curvas de secagem nos períodos de taxas de secagem constante e decrescente. De acordo com os autores, o aquecimento por infravermelho oferece vantagens em relação a outros métodos, a exemplo de maior eficiência energética, redução do tempo e alto grau de controle, tendo em vista a automatização dos aparelhos, resultando em produtos com maior qualidade. Para o período de taxa constante foi usado um modelo linear que relaciona o teor de umidade diretamente com o tempo e a temperatura de processo. Para o período de taxa decrescente foram testados vários modelos empíricos, entretanto, o que melhor se adequou às condições experimentais foi o desenvolvido por Midilli (Tabela 2.1).

2.12.1. Secagem precedida por desidratação osmótica

O processo de desidratação osmótica retira parcialmente a água existente no alimento. No entanto, um produto osmoticamente desidratado tem seu teor de umidade variando no intervalo de 20 a 50% e a atividade de água entre 0,65 e 0,90, não sendo, portanto, microbiologicamente estável (AGNELLI et al., 2005; YADAV e SINGH, 2012). Para que atinja uma estabilidade que assegure a sua preservação e conservação por um período mais longo, faz-se necessário uma complementação do processo, através da secagem, que pode ser por convecção, por vácuo, micro-ondas, por congelamento, dentre outras formas. Quando o processo de secagem segue esta sequência, obtém-se um produto de melhor qualidade, uma vez que a desidratação osmótica como um pré-tratamento reduz o impacto desfavorável no alimento e o protege de alterações químicas e físicas mais abruptas causadas pela secagem.

Diversos trabalhos encontrados na literatura utilizam a desidratação osmótica como pré-tratamento para uma posterior secagem (EL-AOUAR et al., 2003; AGNELLI et al., 2005; TELES et al., 2006; GARCIA et al., 2007; SOUZA et al., 2007; SINGH e MEHTA, 2008; PATTANAPA et al., 2010; AMINZADEH et al., 2012; BCHIR et al., 2012; ARBALLO et al., 2012b; LOMBARD et al., 2008; KUMAR e SAGAR, 2012).

Perussello et al. (2014) realizaram desidratação osmótica de fatias de batata yacon em solução de sucralose, com agitação do meio osmótico. A modelagem matemática para a transferência de massa foi baseada na lei de Fick. A transferência de calor durante o processo foi descrita usando uma equação baseada na equação de Fourier. A difusividade efetiva de massa foi considerada constante e foi obtida por otimização, usando o Programa Matlab. A solução da equação diferencial foi desenvolvida com base no método dos elementos finitos. O domínio computacional considerado foi o cilindro finito para descrever a transferência de massa bidimensional e a condição de contorno de terceiro tipo foi adotada. Os resultados obtidos pelos modelos ajustaram-se bem aos dados experimentais e apresentaram bons coeficientes de correlação.

Outros trabalhos que envolvem a secagem de maçã precedida por desidratação osmótica serão mostrados a seguir.

O método de separação de variáveis foi aplicado por Simal et al. (1997) para resolver uma equação de difusão usada para modelar a secagem de maçãs cortadas em formato cúbico, como também para avaliar os efeitos da desidratação osmótica como pré-tratamento. Para realizar tal estudo, os autores consideraram o processo isotérmico, e a difusão como o principal mecanismo de transferência de massa, bem como o encolhimento desprezível. Através da equação de Fick, com condição de contorno de equilíbrio, com o auxílio do Programa EXCEL e da equação de Arrhenius, os valores da difusividade foram determinados. A desidratação osmótica foi realizada com cubos de maçã imersos em solução de sacarose a 70 °Brix, com proporção de 1 para 6 e com agitação do meio osmótico de 50 rpm, por um período máximo de 3 horas. Em seguida, foi realizada a secagem nas temperaturas 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 °C. O encolhimento das amostras foi medido experimentalmente e os resultados mostraram que as frutas osmoticamente desidratadas encolheram cerca de 35% em relação às medidas iniciais, enquanto que, as amostras que foram secadas sem o pré-tratamento, tiveram seus volumes reduzidos em torno de 62%. Os autores concluíram que

quando o encolhimento é considerado, a transferência de massa é um problema de fronteira móvel que não pode ser resolvido por um método simples e que deve ser mais apropriado a sua resolução por um método numérico. Dentre os valores obtidos para a difusividade, pode-se ressaltar que, para o produto desidratado com ar de secagem a 60 °C, por exemplo, o valor da difusividade sem o pré-tratamento foi superior ao valor para a maçã osmoticamente desidratada. O modelo apresentou melhor precisão na secagem das amostras submetidas ao pré-tratamento.

Devic et al. (2010) avaliaram a influência da desidratação osmótica, da secagem convectiva e da combinação de ambos os processos, sobre os polifenóis presentes na maçã. Foram usados as cultivares *Guillevic* e *Marie Menard*, por apresentarem concentrações diferentes de polifenóis. Os frutos foram pré-tratados com ácido cítrico, cloreto de cálcio e ácido ascórbico, para evitar o escurecimento enzimático. A desidratação osmótica ocorreu em solução de sacarose com concentração de 60 °Brix, com temperaturas de 45 e 60 °C e proporção de 20:1, entre soluto e amostras, cortadas em formato cúbico. A secagem foi realizada a uma temperatura de 45 °C usando-se 200g de cubos de maçãs. Um modelo matemático empírico que relaciona o teor de água e o peso da amostra no início do experimento e em um instante qualquer, foi utilizado para analisar a perda de água e o ganho de sólidos na desidratação osmótica, bem como a perda de água na secagem. Os resultados mostraram que a perda de água foi muito maior no início do processo, tanto na DO como na secagem. A temperatura maior da solução osmótica influenciou no transporte de água da DO, enquanto que o tipo de cultivar afetou a cinética da secagem. A preservação dos polifenóis dependeu do processo aplicado. A retenção foi maior na secagem convectiva do que na desidratação osmótica. Por outro lado, com a combinação dos dois processos, as perdas de polifenóis foram limitadas durante a secagem.

Diamante e Yamaguchi (2012) usaram a metodologia da superfície de resposta para estudar a secagem de cubos de maçã, osmoticamente desidratados com solução composta de suco concentrado de maçã e concentrado de groselha, considerada fonte de vitamina C. De acordo com os autores, a maçã desidratada com esta solução resulta em um produto natural, enriquecido com vitaminas e minerais. Um modelo matemático quadrático foi usado para cada variável dependente, a saber: nível de concentração de groselha, temperatura de secagem e tempo de imersão. O objetivo do modelo foi encontrar as melhores condições para a

secagem convectiva. Os resultados obtidos mostraram que a secagem se efetivou a uma taxa decrescente, não apresentando em nenhum momento taxa constante. As melhores condições do processo de secagem foram: concentração de 24,4 a 30 °Brix de groselha com 52 a 55 minutos de tempo de imersão, temperatura de secagem de 70 °C por 119 a 125 minutos e teores de ácido ascórbico de 98,4 a 116,5 mg/100g de matéria seca.

Fatias de maçã, cultivar *Granny Smith*, foram desidratadas em solução de sacarose e trealose com agitação do meio osmótico por Aktas et al. (2013). Em seguida, foi realizada a secagem com temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Concomitantemente, amostras de maçãs *in natura* foram secas com as mesmas condições de temperatura. As amostras foram armazenadas por um ano e, a cada três meses, foram avaliadas em relação às propriedades de cor, atividade de água, quantidade de matéria seca, de vitamina C e de fenóis, com o objetivo de avaliar o efeito do tempo sobre a qualidade das amostras secas. Os resultados mostraram que as frutas pré-tratadas tiveram o teor de umidade inicial e o tempo de secagem reduzidos em relação às amostras *in natura*. Por outro lado, o aumento da concentração diminuiu o tempo de secagem. As amostras pré-tratadas com trealose perderam mais água do que as demais. Na avaliação realizada com seis meses, verificou-se que as maçãs não tratadas tiveram a sua atividade de água maior do que as outras, enquanto que, as que foram tratadas com trealose, tiveram a menor atividade de água. De uma forma geral, as frutas que foram submetidas ao tratamento osmótico apresentaram melhores resultados e qualidade superior, tanto após a secagem, como durante o armazenamento.

Diante do exposto e ratificando a justificativa citada no Capítulo 1, a revisão da literatura abordando este tema demonstra que há uma escassez de pesquisas com o tema proposto nesta tese. Não foram encontrados trabalhos envolvendo a desidratação osmótica de maçãs, utilizando o método dos volumes finitos, considerando os parâmetros de processo variáveis. Os poucos trabalhos encontrados abordando a desidratação osmótica de maçã com o uso de soluções numéricas não eram puramente difusivos ou consideravam pelo menos um dos parâmetros constantes. Desta forma, o presente estudo contribuirá nesta área de pesquisa.

Capítulo 3: Materiais e métodos

Como já foi relatada anteriormente, a proposta desta pesquisa é descrever o processo de desidratação osmótica de maçãs, seguida de secagem convectiva. Para tal, é proposto um modelo matemático que utiliza uma solução numérica da equação de difusão obtida através do método dos volumes finitos, (MVF), com condição de contorno de primeiro tipo e com uma formulação totalmente implícita. Os parâmetros de processo e o encolhimento são considerados variáveis durante o processo.

Neste Capítulo, são descritos os procedimentos empregados na resolução da equação de difusão através do método numérico citado, os procedimentos aplicados na etapa experimental e a metodologia computacional desenvolvida.

A geometria considerada para o fruto é a de um paralelepípedo e a equação de difusão tridimensional em coordenadas cartesianas é resolvida, usando o MVF, considerando os fluxos mássicos nas direções x , y e z .

3.1. Discretização da equação de difusão tridimensional

A primeira etapa na aplicação do MVF é a discretização do domínio contínuo em subdomínios, denominados volumes de controle (VC). Neste caso, o domínio tridimensional discretizado é dividido em N volumes finitos, como mostra a Figura 3.1. Observando-se a referida Figura, percebe-se que existem vinte e sete tipos distintos de volumes de controle, que são caracterizados por suas localizações na malha.

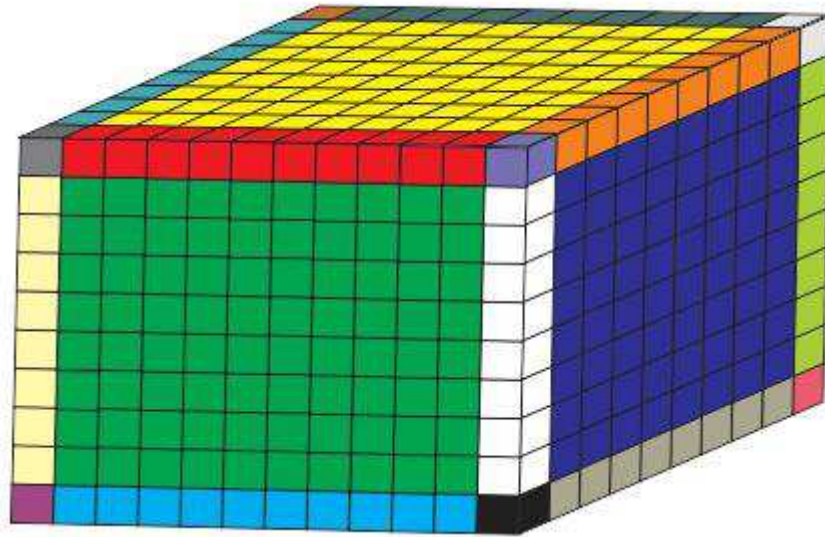


Figura 3.1: Domínio tridimensional discreto com 27 tipos distintos de VC.

Um determinado volume de controle é representado pelo seu ponto nodal P e, dependendo de sua posição na malha, ele pode ter vizinhos a oeste (W), leste (E), norte (N), sul (S), frente (F) ou atrás (B), todos representados por seus pontos nodais. A Figura 3.2, representa a orientação considerada.

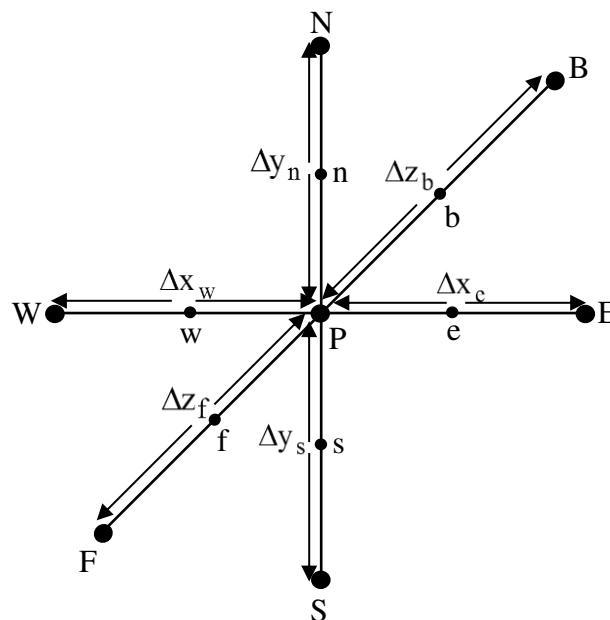


Figura 3.2: Esquema de orientação da malha tridimensional (Adaptado de Silva, 2009).

Na Figura 3.2, w, e, n, s, f e b, representam as interfaces dos volumes de controle à esquerda, direita, norte, sul, frente e atrás de P, respectivamente. Por outro lado, Δx_e , Δx_w , Δy_n , Δy_s , Δz_f e Δz_b são as respectivas distâncias entre P e os pontos nodais E, W, N, S, F e B dos volumes de controle vizinhos.

Integrando-se a Equação (2.9) no tempo Δt e no volume do volume de controle de arestas Δx , Δy e Δz , obtém-se:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_b^f \int_s^n \int_w^e \frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} dx dy dz dt = & \int_t^{t+\Delta t} \int_b^f \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right) dx dy dz dt + \\ & + \int_t^{t+\Delta t} \int_b^f \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right) dx dy dz dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_b^f \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z} \right) dx dy dz dt + \\ & + \int_t^{t+\Delta t} \int_b^f \int_s^n \int_w^e S(\Phi) dx dy dz dt \end{aligned} \quad (3.1)$$

As derivadas podem ser aproximadas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} (a) \quad \frac{\partial}{\partial t} (\lambda\Phi) &\cong \frac{\lambda\Phi - \lambda^0\Phi^0}{\Delta t} \\ (b) \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right) &\cong \frac{\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x} \Big|_e - \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x} \Big|_w}{\Delta x} \\ (c) \quad \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right) &\cong \frac{\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \Big|_n - \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \Big|_s}{\Delta y} \\ (d) \quad \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z} \right) &\cong \frac{\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z} \Big|_f - \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z} \Big|_b}{\Delta z} \end{aligned} \quad (3.2a - d)$$

Na Equação (3.2a) o termo $\lambda\Phi$ no segundo membro indica que a grandeza está sendo avaliada no instante final do intervalo de tempo, enquanto que $\lambda^0\Phi^0$ significa que a avaliação foi feita no início do intervalo de tempo.

Para precaver a divergência da solução do sistema de equações, faz-se necessário evitar que um termo fonte variável seja considerado constante dentro de um intervalo de

tempo, fazendo com que a influência exercida pela variável contida no seu interior seja feita de forma implícita (MALISKA, 2010). Uma forma de conduzir este procedimento é tornando-o linear. Através da expansão de série de Taylor (SILVA, 2009), obtém-se:

$$S = S_C + S_P \Phi_P \quad (3.3)$$

Para garantir a convergência da solução, além da linearidade do termo fonte, é preciso que o coeficiente S_P seja negativo. Caso isto não ocorra, através de manipulações algébricas, é possível conduzir a este resultado. Mais detalhes podem ser encontrados em Silva (2009) e Maliska (2010).

Substituindo-se as Equações (3.2a–d) e (3.3) na Equação (3.1), e resolvendo-se as integrais, encontra-se:

$$\begin{aligned} (\lambda_P \Phi_P - \lambda_P^0 \Phi_P^0) \Delta x \Delta y \Delta z = & \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e \Delta y \Delta z \Delta t - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w \Delta y \Delta z \Delta t + \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n \Delta x \Delta z \Delta t - \\ & - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s \Delta x \Delta z \Delta t + \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f \Delta x \Delta y \Delta t - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b \Delta x \Delta y \Delta t + (S_C + S_P \Phi_P) \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Dividindo-se a Equação (3.4) por Δt , tem-se:

$$\begin{aligned} (\lambda_P \Phi_P - \lambda_P^0 \Phi_P^0) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} = & \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e \Delta y \Delta z - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w \Delta y \Delta z + \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n \Delta x \Delta z - \\ & - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s \Delta x \Delta z + \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f \Delta x \Delta y - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b \Delta x \Delta y + (S_C + S_P \Phi_P) \Delta x \Delta y \Delta z. \end{aligned} \quad (3.5)$$

O processo de discretização da equação de difusão, até a etapa delimitada pela Equação (3.5), é idêntico para os 27 tipos distintos de volumes de controle. A partir deste passo, faz-se necessário realizar aproximações de derivadas existentes na referida equação, que diferem para cada um dos tipos de volumes de controle.

No que segue, são apresentadas a discretização de quatro tipos distintos de volumes de controle, sendo os demais feitos de forma análoga.

3.1.1. Discretização dos volumes de controle internos

Os volumes de controle internos caracterizam-se por não terem contato com o meio externo. Eles possuem vizinhos a oeste (W), a leste (E), ao norte (N), ao sul (S), à frente (F) e atrás (B). A Figura 3.3 representa um volume de controle interno característico.

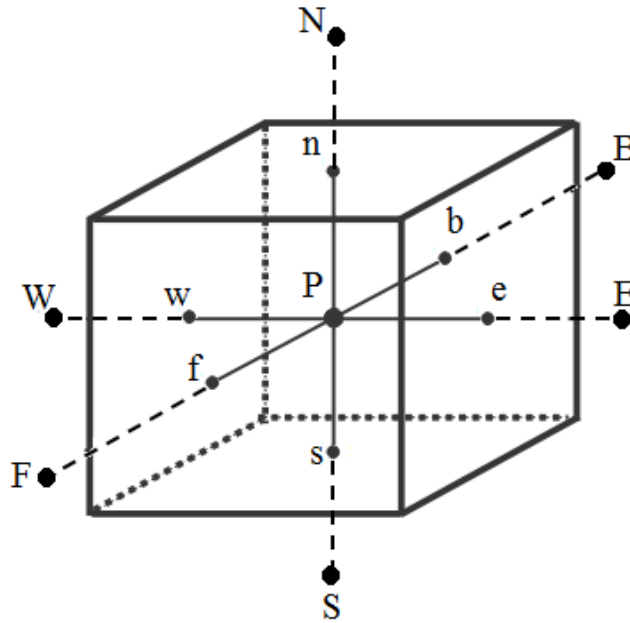


Figura 3.3: Volume de controle interno.

Para os volumes de controle internos, as seguintes aproximações para as derivadas da Equação (3.5) podem ser feitas:

$$\begin{aligned}
 (a) \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e &\cong \Gamma_e^\Phi \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta x_e} & (d) \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s &\cong \Gamma_s^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} \\
 (b) \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w &\cong \Gamma_w^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta x_w} & (e) \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f &\cong \Gamma_f^\Phi \frac{\Phi_F - \Phi_P}{\Delta z_f} \\
 (c) \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n &\cong \Gamma_n^\Phi \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n} & (f) \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b &\cong \Gamma_b^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_B}{\Delta z_b}
 \end{aligned} \tag{3.6a-f}$$

Substituindo-se as aproximações obtidas nas Equações (3.6a–f) na Equação (3.5), obtém-se:

$$\begin{aligned}
 (\lambda_P \Phi_P - \lambda_P^0 \Phi_P^0) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} &= \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \Phi_E - \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \Phi_P - \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \Phi_P + \\
 &+ \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \Phi_W + \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \Phi_N - \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \Phi_P - \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \Phi_P + \\
 &+ \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \Phi_S + \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \Phi_F - \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \Phi_P - \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \Phi_P + \\
 &+ \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \Phi_B + (S_C + S_P \Phi_P) \Delta x \Delta y \Delta z.
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Reorganizando-se os termos da Equação (3.7), a mesma pode ser escrita de forma algébrica simplificada como segue:

$$A_P \Phi_P = A_e \Phi_E + A_w \Phi_W + A_n \Phi_N + A_s \Phi_S + A_f \Phi_F + A_b \Phi_B + B \tag{3.8}$$

nos quais tem-se:

$$\begin{aligned}
 (a) A_P &= \lambda_P \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} + \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} + \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} + \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} + \\
 &+ \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} + \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} - S_P \Delta x \Delta y \Delta z
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (b) A_e &= \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} & (e) A_w &= \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} & (g) A_n &= \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n}
 \end{aligned} \tag{3.9a–h}$$

$$\begin{aligned}
 (c) A_s &= \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} & (f) A_f &= \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} & (h) A_b &= \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b}
 \end{aligned}$$

$$(d) B = \lambda_P^0 \Phi_P^0 \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + S_C \Delta x \Delta y \Delta z$$

3.1.2. Discretização dos volumes de controle norte-frente

Figura 3.1 destaca estes tipos de volumes de controle na cor vermelha. Possuem vizinhos a oeste, a leste, ao sul e atrás, enquanto que o contato com o meio externo ocorre através das fronteiras norte e frente. Como a condição de contorno considerada é a de primeiro tipo, os valores da variável de interesse nas fronteiras norte e frente, dadas por Φ_n e Φ_f , são conhecidos.

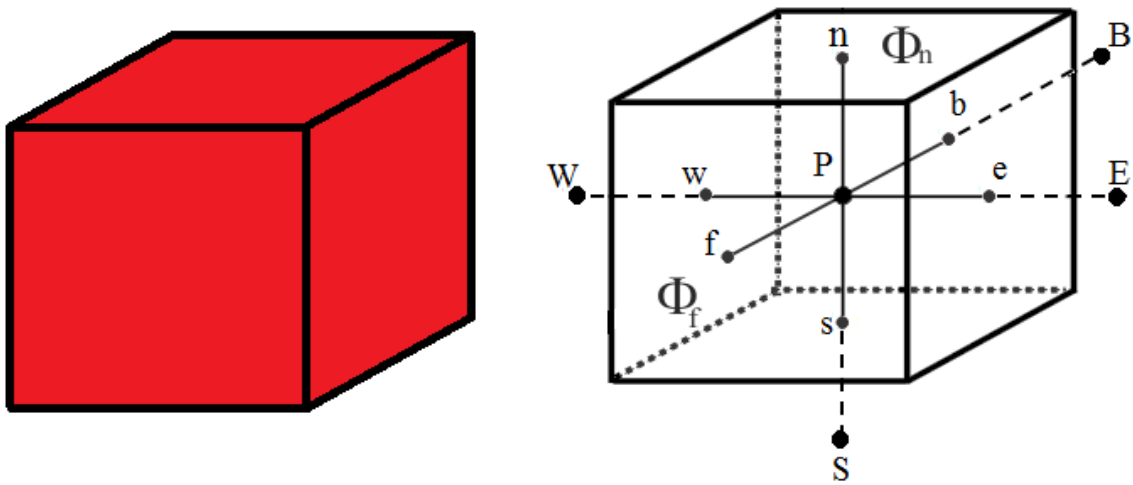


Figura 3.4: Volume de controle norte – frente.

Neste caso, as aproximações das derivadas da Equação (3.5) são dadas por:

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e &\cong \Gamma_e^\Phi \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta x_e} & \text{(d)} \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b &\cong \Gamma_b^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_B}{\Delta z_b} \\
 \text{(b)} \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w &\cong \Gamma_w^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta x_w} & \text{(e)} \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f &\cong \Gamma_f^\Phi \frac{\Phi_f - \Phi_P}{\frac{\Delta z_f}{2}} = 2\Gamma_f^\Phi \frac{\Phi_f - \Phi_P}{\Delta z_f} \quad (3.10a-f) \\
 \text{(c)} \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s &\cong \Gamma_s^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} & \text{(f)} \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n &\cong \Gamma_n^\Phi \frac{\Phi_n - \Phi_P}{\frac{\Delta y_n}{2}} = 2\Gamma_n^\Phi \frac{\Phi_n - \Phi_P}{\Delta y_n}
 \end{aligned}$$

Substituindo-se as Equações (3.10a – f) na Equação (3.5), encontra-se:

$$\begin{aligned}
 & \left(\lambda_P \Phi_P - \lambda_P^0 \Phi_P^0 \right) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} = \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \Phi_E - \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \Phi_P - \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \Phi_P + \\
 & + \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \Phi_W + \frac{2\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \Phi_n - \frac{2\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \Phi_P - \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \Phi_P + \\
 & + \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \Phi_S + \frac{2\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \Phi_f - \frac{2\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \Phi_P - \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \Phi_P + \\
 & + \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \Phi_B + (S_C + S_P \Phi_P) \Delta x \Delta y \Delta z.
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Reorganizando-se os termos, é possível escrever a Equação (3.11) na forma simplificada:

$$A_P \Phi_P = A_e \Phi_E + A_w \Phi_W + A_s \Phi_S + A_b \Phi_B + B \tag{3.12}$$

na qual

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad A_P &= \lambda_P \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} + \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} + \frac{2\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \\
 &+ \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} + \frac{2\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} + \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} - S_P \Delta x \Delta y \Delta z \\
 \text{(b)} \quad A_e &= \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} & \text{(e)} \quad A_w &= \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \\
 \text{(c)} \quad A_s &= \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} & \text{(f)} \quad A_b &= \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \\
 \text{(d)} \quad B &= \frac{2\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \Phi_f + \frac{2\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \Phi_n + \lambda_P^0 \Phi_P^0 \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + S_C \Delta x \Delta y \Delta z
 \end{aligned} \tag{3.13a – f}$$

3.1.3. Discretização dos volumes de controle leste-sul-atrás

Na Figura 3.1 este volume de controle é ilustrado em cor rosa. Este é o único volume de controle do domínio que possui vizinho a oeste, ao norte e à frente, estando em contato com o meio externo a leste, ao sul e por trás. Conseqüentemente, os valores da grandeza de interesse Φ_e , Φ_s e Φ_b são conhecidos.

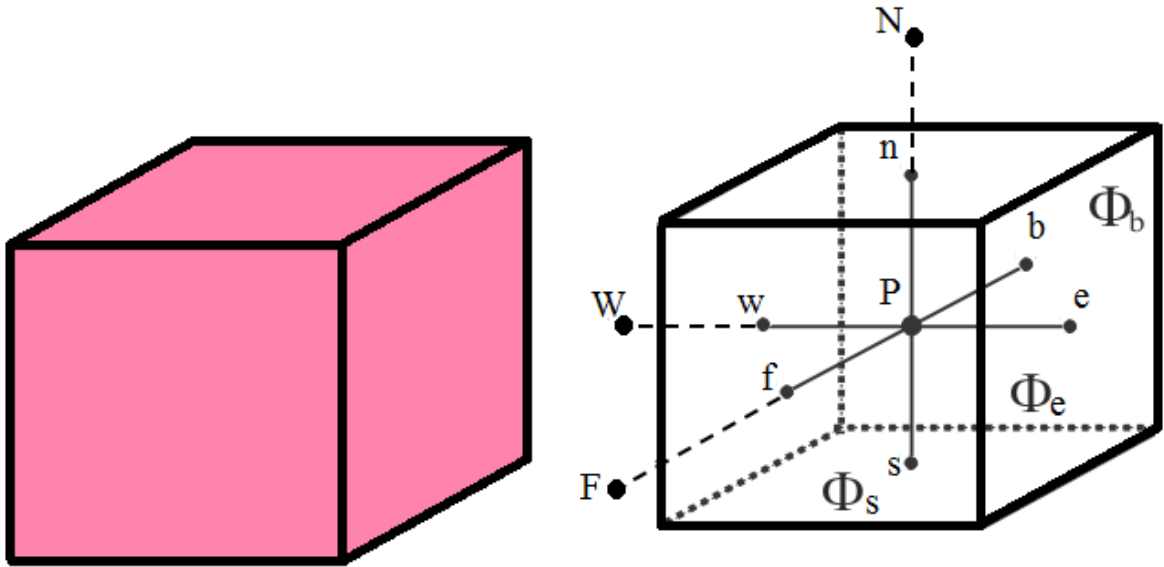


Figura 3.5: Volume de controle leste – sul – atrás.

Para este volume de controle, as aproximações das derivadas da Equação (3.5) são dadas por:

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e &\cong \Gamma_e^\Phi \frac{\Phi_e - \Phi_P}{\Delta x_e} = 2\Gamma_e^\Phi \frac{\Phi_e - \Phi_P}{\Delta x_e} & \text{(d)} \quad \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w &\cong \Gamma_w^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta x_w} \\
 \text{(b)} \quad \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s &\cong \Gamma_s^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_s}{\Delta y_s} = 2\Gamma_s^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_s}{\Delta y_s} & \text{(e)} \quad \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n &\cong \Gamma_n^\Phi \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n} \quad (3.14a-f) \\
 \text{(c)} \quad \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b &\cong \Gamma_b^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_b}{\Delta z_b} = 2\Gamma_b^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_b}{\Delta z_b} & \text{(f)} \quad \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f &\cong \Gamma_f^\Phi \frac{\Phi_F - \Phi_P}{\Delta z_f}
 \end{aligned}$$

Substituindo-se as Equações (3.14a – f) na Equação (3.5), encontra-se:

$$\begin{aligned}
 (\lambda_P \Phi_P - \lambda_P^0 \Phi_P^0) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} &= \frac{2\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \Phi_e - \frac{2\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \Phi_P - \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \Phi_P + \\
 + \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \Phi_W + \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \Phi_N - \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \Phi_P - \frac{2\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \Phi_P + \\
 + \frac{2\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \Phi_s + \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \Phi_F - \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \Phi_P - \frac{2\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \Phi_P + \\
 + \frac{2\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \Phi_b + (S_C + S_P \Phi_P) \Delta x \Delta y \Delta z.
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Organizando-se os termos, a Equação (3.15) pode ser escrita sob a forma:

$$A_P \Phi_P = A_w \Phi_W + A_n \Phi_N + A_f \Phi_F + B. \tag{3.16}$$

Em que seus coeficientes são expressos por:

$$\begin{aligned}
 \text{(a) } A_P &= \lambda_P \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{2\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} + \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} + \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} + \frac{2\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} + \\
 &+ \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} + \frac{2\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} - S_P \Delta x \Delta y \Delta z \\
 \text{(b) } A_w &= \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} & \text{(d) } A_n &= \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} & \text{(e) } A_f &= \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \\
 \text{(c) } B &= \frac{2\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \Phi_e + \frac{2\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \Phi_s + \frac{2\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \Phi_b + \lambda_P^0 \Phi_P^0 \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \\
 &+ S_C \Delta x \Delta y \Delta z
 \end{aligned} \tag{3.17a – e}$$

3.1.4. Discretização dos volumes de controle oeste-atrás-norte

Na Figura 3.1, este volume de controle apresenta-se na cor marrom. A sua característica é o contato com o meio externo, que é feito através das faces oeste, atrás e norte. Portanto, os valores da variável de interesse nestes contornos são conhecidos, devido à condição de contorno de primeiro tipo. Por outro lado, este volume de controle faz fronteira com os volumes de controle localizados a leste, ao sul e à frente.

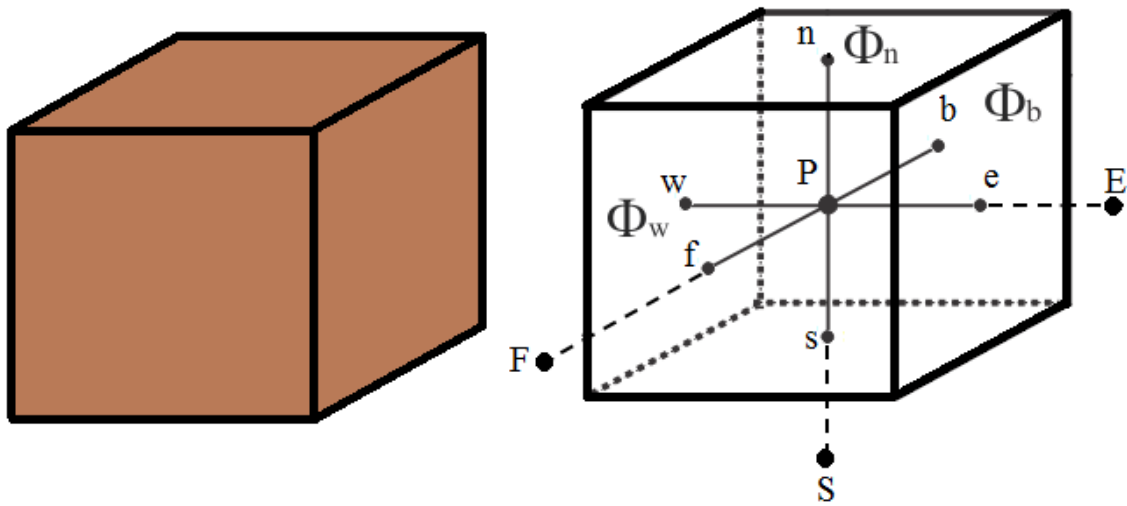


Figura 3.6: Volume de controle oeste – atrás – norte.

Para o volume de controle citado, as aproximações das derivadas da Equação (3.5) são dadas por:

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e &\cong \Gamma_e^\Phi \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta x_e} & \text{(d)} \quad \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w &\cong \Gamma_w^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_w}{\Delta x_w} = 2\Gamma_w^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_w}{\Delta x_w} \\
 \text{(b)} \quad \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s &\cong \Gamma_s^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} & \text{(e)} \quad \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b &\cong \Gamma_b^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_b}{\Delta z_b} = 2\Gamma_b^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_b}{\Delta z_b} \quad (3.18a-f) \\
 \text{(c)} \quad \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f &\cong \Gamma_f^\Phi \frac{\Phi_F - \Phi_P}{\Delta z_f} & \text{(f)} \quad \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n &\cong \Gamma_n^\Phi \frac{\Phi_n - \Phi_P}{\Delta y_n} = 2\Gamma_n^\Phi \frac{\Phi_n - \Phi_P}{\Delta y_n}
 \end{aligned}$$

Substituindo-as na Equação (3.5), obtém-se:

$$\begin{aligned}
 & \left(\lambda_P \Phi_P - \lambda_P^0 \Phi_P^0 \right) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} = \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \Phi_E - \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \Phi_P - \frac{2\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \Phi_P + \\
 & + \frac{2\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \Phi_w + \frac{2\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \Phi_n - \frac{2\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \Phi_P - \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \Phi_P + \\
 & + \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \Phi_S + \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \Phi_F - \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \Phi_P - \frac{2\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \Phi_P + \\
 & + \frac{2\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \Phi_b + (S_C + S_P \Phi_P) \Delta x \Delta y \Delta z.
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Resultando em

$$A_P \Phi_P = A_e \Phi_E + A_s \Phi_S + A_f \Phi_F + B. \tag{3.20}$$

Em que seus coeficientes são expressos por:

$$\begin{aligned}
 (a) A_P = & \lambda_P \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} + \frac{2\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} + \frac{2\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} + \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} + \\
 & + \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} + \frac{2\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} - S_P \Delta x \Delta y \Delta z
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (b) A_e = & \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} & (d) A_s = & \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} & (e) A_f = & \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f}
 \end{aligned} \tag{3.21a-e}$$

$$\begin{aligned}
 (c) B = & \frac{2\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \Phi_w + \frac{2\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \Phi_n + \frac{2\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \Phi_b + \lambda_P^0 \Phi_P^0 \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \\
 & + S_C \Delta x \Delta y \Delta z
 \end{aligned}$$

3.1.5. Avaliação de Γ^Φ nas faces dos volumes de controle

O parâmetro Γ^Φ nos pontos nodais de cada volume de controle depende da grandeza de interesse Φ no ponto nodal P, ou seja,

$$\Gamma_P^\Phi = f(\Phi_P, a, b) \quad (3.22)$$

em que f é uma função de Φ_P a ser determinada de acordo com os dados experimentais e os parâmetros a e b são determinados por otimização.

Entretanto, observando-se as expressões que representam os coeficientes em cada equação discretizada, encontram-se termos que contém Γ_e^Φ , Γ_w^Φ , Γ_n^Φ , Γ_s^Φ , Γ_f^Φ e/ou Γ_b^Φ . Estes termos representam os valores do parâmetro Γ^Φ , nas faces leste, oeste, norte, sul, frente e atrás, de cada volume de controle, respectivamente. Quando este parâmetro é considerado constante, então o seu valor é o mesmo em todo o domínio. No entanto, se for considerado variável, faz-se necessário uma estimativa do seu valor nas faces de cada volume de controle.

A Figura 3.7 representa dois volumes de controle adjacentes com uma interface comum, neste caso, a interface sul em relação ao ponto nodal P.

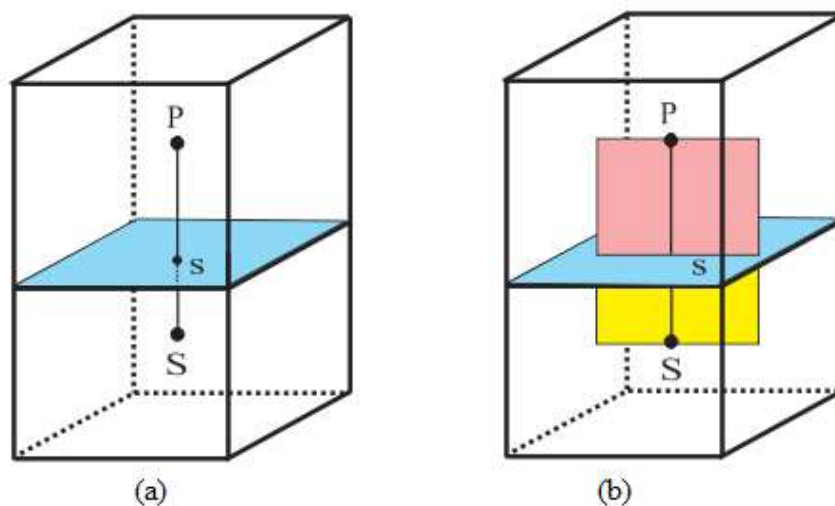


Figura 3.7: (a) Volumes de controle adjacentes com interfaces em comum; (b) Volumes de controle adjacentes com um plano vertical passando pelos pontos nodais P e S.

A Figura 3.8 destaca o plano vertical que passa pelos pontos nodais P e S para facilitar a análise.

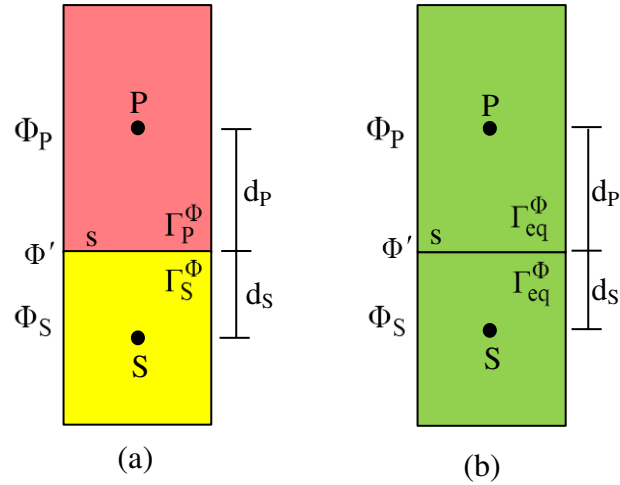


Figura 3.8: Volumes de controle adjacentes com Γ^Φ igual a: (a) Γ_P^Φ e Γ_S^Φ ; (b) Γ_{eq}^Φ .

Na Figura 3.8, tem-se que d_P e d_S são as distâncias entre os respectivos pontos nodais e a interface s ; Γ_P^Φ e Γ_S^Φ são os coeficientes de transporte dos volumes de controle na parte (a) da figura e Γ_{eq}^Φ é o coeficiente de transporte considerado em todo o domínio da parte (b).

A relação entre os coeficientes de transporte é dada por (SILVA, 2009):

$$\Gamma_{eq}^\Phi = \frac{\Gamma_P^\Phi \cdot \Gamma_S^\Phi}{f_d \Gamma_P^\Phi + (1 - f_d) \Gamma_S^\Phi} \quad (3.23)$$

em que

$$f_d = \frac{d_P}{d_P + d_S} \quad (3.24)$$

Se a malha for uniforme, tem-se que $d_P = d_S$, resultando em $f_d = \frac{1}{2}$. Substituindo-se esta expressão na Equação (3.23), obtém-se:

$$\Gamma_{eq}^\Phi = \frac{2\Gamma_P^\Phi \cdot \Gamma_S^\Phi}{\Gamma_S^\Phi + \Gamma_P^\Phi} \quad (3.25)$$

Para o caso do coeficiente de transporte ser constante, tem-se que $\Gamma_P^\Phi = \Gamma_S^\Phi$. Para os volumes de controle que têm contato com o meio externo, o valor do coeficiente de transporte nestas faces externas, é admitido igual ao valor deste parâmetro no ponto nodal.

3.1.6. Valor médio da grandeza de interesse

Com a solução da equação de difusão, é possível determinar o valor da grandeza de interesse em qualquer posição do domínio e em qualquer instante. No entanto, em muitas situações, é interessante saber o seu valor médio, que pode ser expresso pela Equação (3.26):

$$\overline{\Phi} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{N_k} \Phi_{ijk} V_{ijk}, \quad (3.26)$$

em que i, j, k definem a posição do volume de controle no domínio discretizado; V_{ijk} é o volume do volume de controle que se encontra na posição i, j, k ; N_i, N_j e N_k são os números de volumes de controle da malha, nas direções x, y e z , respectivamente; e V representa o volume do sólido dado por

$$V = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{N_k} V_{ijk}. \quad (3.27)$$

3.1.7. Variação volumétrica

Na presente pesquisa, o encolhimento do fruto é considerado ao longo do processo de desidratação osmótica, como também na secagem convectiva complementar. Nomeando-se de L_x , L_y e L_z , as medidas do sólido nas direções x, y e z, respectivamente, como mostra a Figura 3.9, pressupõe-se que há mudança no volume da amostra e que esta mudança pode ocorrer de forma diferente para L_x , L_y e L_z , sem, no entanto, haver alteração de sua geometria. Neste caso, o volume é calculado durante todo o processo através da expressão:

$$V = L_x \cdot L_y \cdot L_z \quad (3.28)$$

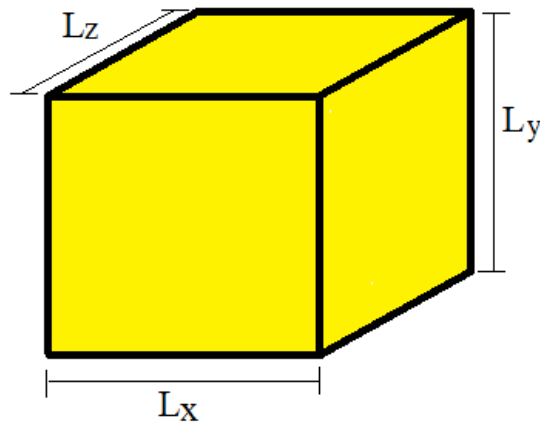


Figura 3.9: Sólido com dimensões L_x , L_y e L_z .

Admite-se que estas dimensões variam de acordo com o valor médio da grandeza de interesse, ou seja, da quantidade de água ou de sacarose. De uma forma geral, essas dimensões podem ser representadas por:

$$L_x = f(\bar{\Phi}) \quad (3.29)$$

$$L_y = g(\bar{\Phi}) \quad (3.30)$$

$$L_z = h(\bar{\Phi}) \quad (3.31)$$

em que f , g e h , são funções a serem determinadas via ajuste de curvas, através dos dados experimentais, obtidos para estas dimensões.

No programa desenvolvido para a determinação da solução numérica, a malha é atualizada de acordo com os novos valores da grandeza de interesse em cada estepe de tempo de acordo com as Equações (3.29) – (3.31).

3.1.8. O uso da simetria

Tendo em vista que as condições físicas do presente trabalho são iguais em todas as faces do paralelepípedo, o conceito de simetria é utilizado com o objetivo de reduzir o tempo de execução do programa desenvolvido, como também, promover uma economia de memória computacional.

Sem apresentar qualquer perda de generalidade, um subdomínio correspondendo à oitava parte do paralelepípedo é considerado, como ilustra a Figura 3.10, que não está em escala.

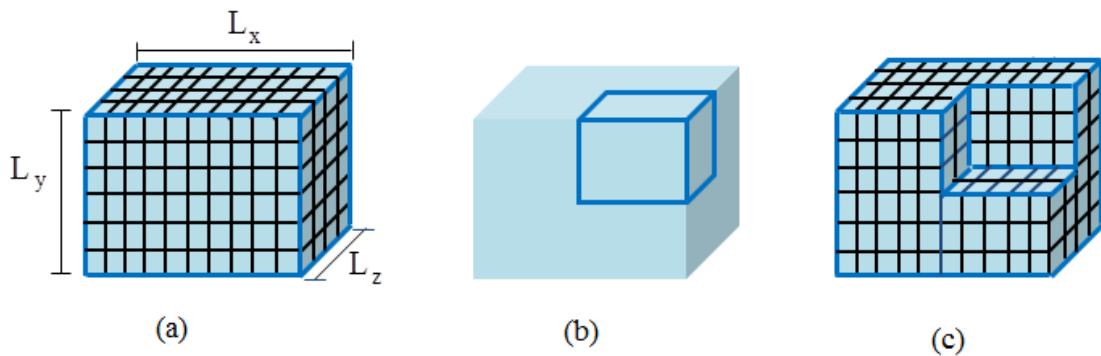


Figura 3.10: (a) Domínio computacional; (b) 1/8 do paralelepípedo destacado; (c) 7/8 do domínio, destacando as fronteiras da parte equivalente a 1/8, que foi removida.

Nos volumes de controle do novo domínio (1/8 do paralelepípedo) que têm contato com as faces oeste, atrás e sul, mostradas na Figura 3.10 (c), o fluxo da grandeza de interesse considerado é nulo. Desta forma, os termos $\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w$, $\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s$ e $\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b$ nas equações discretizadas para estes volumes de controle também se anulam. Conseqüentemente, as equações tornam-se mais simples. Em adição a este fato, as dimensões do novo domínio correspondem à metade das medidas originais, como mostra a Figura 3.11, que não está em

escala, resultando, portanto, em uma malha computacional mais reduzida, o que justifica a economia de tempo e memória computacional.

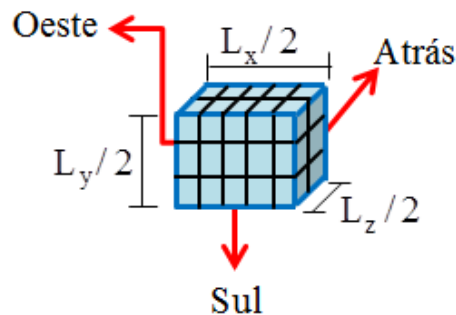


Figura 3.11: Novo domínio computacional, correspondente à oitava parte do domínio original.

3.2. Determinação dos parâmetros de processo via otimização

O principal objetivo deste trabalho é o estudo da transferência de massa na desidratação osmótica e secagem convectiva de maçã, explicitado no Capítulo 1. Desta forma, fez-se o estudo de um processo difusivo, que é regulado, principalmente, pela difusividade de massa, tendo em vista a condição de contorno ser do primeiro tipo. Para tal, foi desenvolvido um código computacional, cujas principais atribuições são:

- ✓ A obtenção da cinética do processo quando são conhecidos os seus parâmetros.

Neste caso, são inseridos dados referentes à difusividade, dimensões do produto, tempo de processo, valor inicial e de equilíbrio da grandeza de interesse, dentre outros. Através de método direto, o programa fornece a solução numérica da equação de difusão com a condição de contorno de primeiro tipo.

- ✓ A determinação dos parâmetros de processo por otimização quando um conjunto de dados experimentais é conhecido.

Para a determinação dos parâmetros a e b que compõe a função difusividade, representada de forma genérica por $\Gamma_P^\Phi = f(\Phi_P, a, b)$, representada na Equação (3.22). A aplicação do programa é baseada em método inverso, no qual um conjunto de dados

experimentais é inserido ao código e, através de um algoritmo otimizador, são fornecidos os parâmetros para a difusividade. Tendo sido obtida a expressão da difusividade, a simulação gerada pelo programa deve ser o mais próxima possível dos dados experimentais. Entretanto, até serem encontrados estes valores, faz-se necessário a realização de testes, cujo princípio básico é a minimização de uma função objetivo, denominada de qui-quadrado, que faz uma comparação entre os dados simulados e experimentais, através da relação (TAYLOR, 1997):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} (\delta \Phi_i)^2 \frac{1}{\sigma_i^2}. \quad (3.32)$$

Na Equação (3.32), N_p representa o número de pontos experimentais, σ_i é o desvio padrão do valor médio de Φ_i , $1/\sigma_i^2$ é o peso estatístico referente ao i -ésimo ponto experimental, cujo valor pode ser considerado igual à unidade, quando não se tem informações acerca do seu valor, e $\delta \Phi_i$, é o desvio definido por (SILVA e SILVA, 1998):

$$\delta \Phi_i = \bar{\Phi}_i - \bar{\Phi}^{\text{sim}} \quad (3.33)$$

em que $\bar{\Phi}_i$ é o valor médio da grandeza de interesse para $t = t_i$ e $\bar{\Phi}^{\text{sim}}$ é o valor médio simulado neste mesmo instante.

3.2.1. Interpolação linear

Considerando-se o i -ésimo ponto simulado $(t_i, \bar{\Phi}^{\text{sim}})$, na comparação realizada com os pontos experimentais através da Equação (3.33), pode ocorrer de não existir o ponto $(t_i, \bar{\Phi}_i)$. Em outras palavras, $\bar{\Phi}_i$ pode não ser conhecido exatamente no instante $t = t_i$. Neste caso, devem existir dois pontos simulados nos instantes t_i^{sim} e t_{i+1}^{sim} , tais que $t_i^{\text{sim}} < t_i < t_{i+1}^{\text{sim}}$, como mostra a Figura 3.12 (SILVA, 2007).

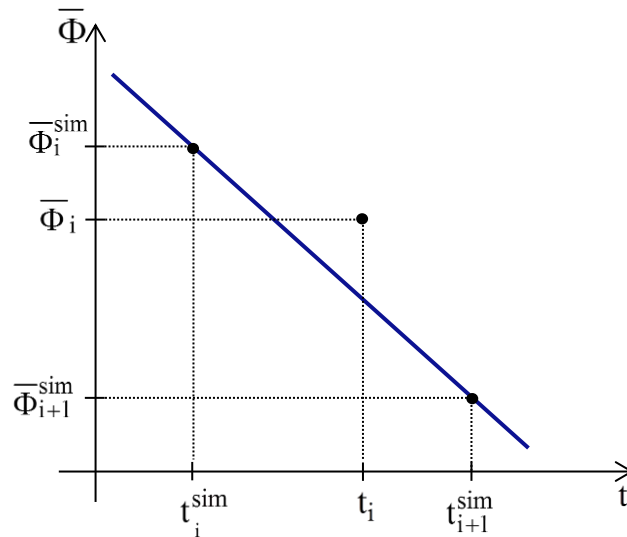


Figura 3.12: Esquema para a obtenção de $\bar{\Phi}_i$ através de interpolação linear.

Desta forma, é possível determinar o valor de $\bar{\Phi}_i$ através de interpolação linear, segundo a Equação (3.34) (SILVA, 2007)

$$\bar{\Phi}_i = \frac{\bar{\Phi}_i^{\text{sim}} - \bar{\Phi}_{i+1}^{\text{sim}}}{t_{i+1}^{\text{sim}} - t_i^{\text{sim}}} (t_{i+1}^{\text{sim}} - t_i) + \bar{\Phi}_{i+1}^{\text{sim}}. \quad (3.34)$$

Após a aplicação da interpolação linear, caso seja necessário, torna-se possível o cálculo do desvio mostrado através da Equação (3.33) e, conseqüentemente, a obtenção do valor do qui-quadrado pela Equação (3.32) referente aos pontos experimental e simulado, no instante $t = t_i$.

3.2.2. Indicadores estatísticos

Vale ressaltar que o otimizador busca minimizar a função qui-quadrado, que por sua vez, promove um ajuste da curva simulada aos dados experimentais. Em outras palavras, busca-se uma redução das diferenças entre os valores calculados pelo sistema de equações (simulados) e os experimentais. Para medir a qualidade destes ajustes são usados indicadores estatísticos, a exemplo do coeficiente de determinação e do erro quadrático médio.

O coeficiente de determinação, representado por R^2 , é definido como sendo o quadrado do coeficiente de correlação. Para uma sequência de dados experimentais $\bar{\Phi}_{t_i}$ e outra de valores simulados $\bar{\Phi}_{t_i}^{sim}$, R^2 pode ser escrito de acordo com a Equação (3.35) (SILVA e SILVA, 1998).

$$R^2 = \frac{\left[\sum_1^{N_P} \left(\bar{\Phi}_{t_i} \cdot \bar{\Phi}_{t_i}^{sim} \right) - N_P \left(\text{med}(\bar{\Phi}_{t_i}) \right) \cdot \left(\text{med}(\bar{\Phi}_{t_i}^{sim}) \right) \right]^2}{\left[\sum_1^{N_P} (\bar{\Phi}_{t_i})^2 - N_P \left(\text{med}(\bar{\Phi}_{t_i}) \right)^2 \right] \cdot \left[\sum_1^{N_P} (\bar{\Phi}_{t_i}^{sim})^2 - N_P \left(\text{med}(\bar{\Phi}_{t_i}^{sim}) \right)^2 \right]} \quad (3.35)$$

na qual N_P indica o número de pontos, $\text{med}(\bar{\Phi}_{t_i})$ e $\text{med}(\bar{\Phi}_{t_i}^{sim})$ representam, respectivamente, os valores médios das sequências $\bar{\Phi}_{t_i}$ e $\bar{\Phi}_{t_i}^{sim}$.

O erro quadrático médio, por sua vez, é definido pela relação (SILVA e SILVA, 1998):

$$\overline{\epsilon^2} = \frac{\chi^2}{\sum_1^{N_P} (1/\sigma_i)^2} \quad (3.36)$$

3.2.3. Expressões para a difusividade

De uma forma geral, no presente trabalho, considera-se que a difusividade de massa, Γ^Φ , é uma função que depende do valor local da grandeza de interesse Φ e de, no máximo, duas constantes a e b , que serão determinadas via ajuste de curvas. A opção por não envolver um número maior de constantes foi feita objetivando minimizar o tempo de execução em cada simulação. No trabalho de Silva (2007), encontra-se uma relação com vinte funções com as características descritas acima que podem representar a difusividade, como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Expressões para a difusividade.

Índice	Expressão para Γ^Φ	Índice	Expressão para Γ^Φ
1	a	11	$b \cdot \ln(a \cdot \Phi^{1/2})$
2	$a \cdot \Phi + b$	12	$b \cdot \ln(a \cdot \Phi)$
3	$a \cdot \Phi^2 + b$	13	$b \cdot \ln(a \cdot \Phi^2)$
4	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi)$	14	$b \cdot \cosh(a \cdot \Phi^{1/2})$
5	$b \cdot \exp(a/\Phi)$	15	$b \cdot \cosh(a \cdot \Phi^2)$
6	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^2)$	16	$b/\cosh(a \cdot \Phi)$
7	$b \cdot \cosh(a \cdot \Phi)$	17	$b/\cosh(a \cdot \Phi^{1/2})$
8	$1/(a \cdot \Phi + b)$	18	$b/\cosh(a \cdot \Phi^2)$
9	$a \cdot \Phi^{1/2} + b$	19	$a/\Phi^{1/2} + b$
10	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^{1/2})$	20	$a/\Phi + b$

3.2.4. Algoritmo de otimização

O algoritmo de otimização utilizado neste trabalho, baseia-se na ideia do otimizador desenvolvido por Silva (2007), com algumas alterações.

O algoritmo consiste na procura pelos valores ótimos das constantes a e b , os quais minimizam a função objetivo qui-quadrado. De forma sucinta, as etapas são descritas a seguir.

O primeiro passo é a atribuição de valores iniciais, denotados por a_0 e b_0 . Com estes valores, a equação de difusão é resolvida e o qui-quadrado é determinado. Uma das constantes é fixada, enquanto a busca é feita com a outra. Um incremento é dado à constante que não está fixa, a equação de difusão é resolvida e um novo qui-quadrado é encontrado. Faz-se uma comparação entre os valores dos qui-quadrados para se determinar em que lado dos valores iniciais o valor ótimo (valor mínimo, segundo uma precisão estabelecida) está localizado. De posse desta informação, decide-se que tipo de incremento será dado à constante e determina-se um intervalo que contém o ponto mínimo. Em seguida, este intervalo

é dividido ao meio e novo teste é feito para definir em qual dos dois lados se encontra o valor ótimo. O subintervalo que contém o valor ótimo é dividido mais uma vez e novo teste é realizado. Com a informação acerca de qual subintervalo está localizado o valor ótimo, é feita uma “varredura”, utilizando-se uma sequência de incrementos, até encontrá-lo. Encontrado este valor, fixa-se a constante que foi manipulada e repete-se o procedimento com a outra constante. Este processo é repetido até que o valor ótimo seja encontrado atingindo uma precisão estabelecida.

Em suma, o intervalo inicial é dividido por duas vezes e uma “varredura” é realizada em um subintervalo que corresponde, aproximadamente, à quarta parte do intervalo inicial. A seguir, o processo será explicado de forma detalhada.

Inicialmente, foi definido um fator multiplicativo, representado pela expressão “Fator_mult”, que está associado à precisão estabelecida, de acordo com Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Precisão e fator multiplicativo.

Precisão	Fator_mult
1×10^{-4}	1×10^{-6}
1×10^{-5}	1×10^{-7}
1×10^{-6}	1×10^{-8}

Foram definidos os incrementos utilizados, que dependem do valor inicial a_0 ou b_0 e do fator multiplicativo, mostrados a seguir:

- ✓ $\text{Increm1} = a_0 \times \text{Fator_mult}$ ou $\text{Increm1} = b_0 \times \text{Fator_mult}$
- ✓ $\text{Increm2} = 2 \times \text{Increm1}$
- ✓ $\text{Increm3} = 3 \times \text{Increm1}$

Em determinados instantes durante a iteração, Increm2 e Increm3 serão multiplicados por potências de 2, obedecendo as sequências S_1 e S_2 de incrementos, mostradas a seguir.

- ✓ $S_1: \text{Increm3}, 2 \times \text{Increm3}, 4 \times \text{Increm3}, 8 \times \text{Increm3}, \dots$
- ✓ $S_2: \text{Increm2}, 2 \times \text{Increm2}, 4 \times \text{Increm2}, 8 \times \text{Increm2}, \dots$

Os seguintes passos foram seguidos:

1º passo: Atribuem-se valores iniciais para as constantes a e b (a_0 e b_0), resolve-se a

Equação (2.9) e calcula-se o valor do χ^2 (denotado por χ_0^2);

2º passo: Fixa-se o valor de b , adiciona-se o Incrém1 ao parâmetro a_0 ($a = a_0 + \text{Incrém1}$),

resolve-se a Equação (2.9) e calcula-se o valor de χ^2 (denotado por χ_1^2);

3º passo: Comparam-se os dois valores do qui-quadrado: se $\chi_1^2 < \chi_0^2$, o valor ótimo $a_{\text{ótimo}}$ localiza-se à direita de a_0 , como mostra a Figura 3.13(a), segue-se para o 4º passo; se

$\chi_1^2 > \chi_0^2$, o valor ótimo localiza-se à esquerda de a_0 , de acordo com a Figura 3.13 (b), segue-se para o 5º passo;

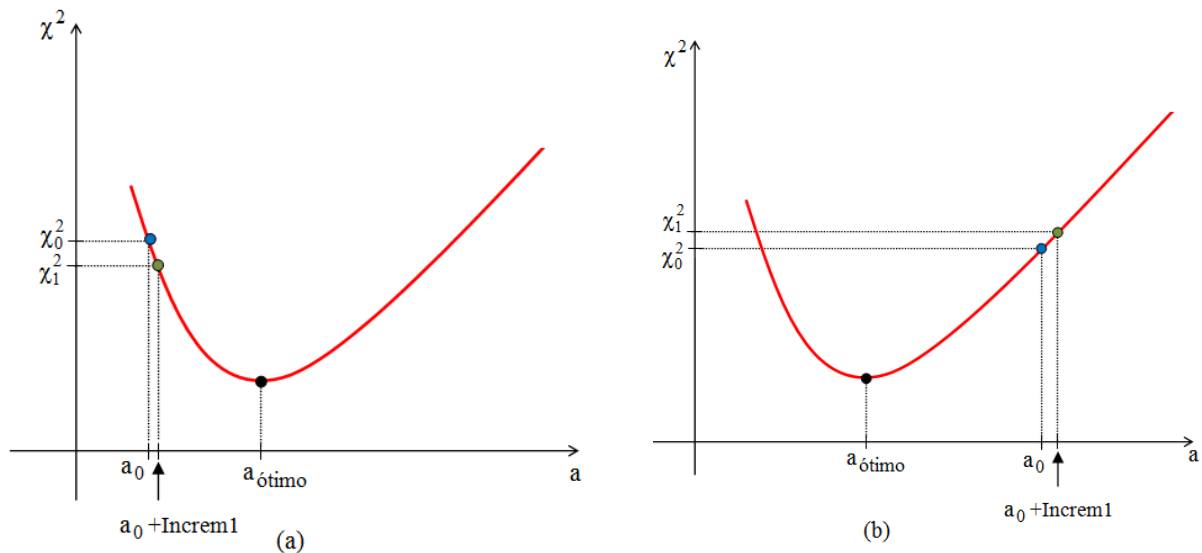


Figura 3.13: Esboço do gráfico da função qui-quadrado considerando-se o: (a) valor ótimo à direita do valor inicial a_0 ; (b) valor ótimo à esquerda do valor inicial a_0 .

4º passo:

(4.1) Atualiza-se o valor de a somando-se o incremento na ordem descrita na sequência S_I ;

(4.2) Resolve-se a Equação (2.9), calcula-se o valor do χ^2 e compara-se com o anterior; se for menor que o anterior, retorna-se para o passo 4.1, caso contrário, segue-se para o passo 4.3.

(4.3) Fixam-se os dois últimos valores de a (denotados por a_2 e a_3 , respectivamente). Faz-se o parâmetro a igual ao valor da média entre a_2 e a_3 e denota-se por a_4 ($a_4 = (a_2 + a_3)/2$).

(4.4) Resolve-se a Equação (2.9) e calcula-se o χ^2 , denominando-o de χ_4^2 .

(4.5) Adiciona-se o Incrém1 à a_4 e denota-se por a_5 ($a_5 = a_4 + \text{Incrém1}$). Resolve-se a Equação (2.9) e calcula-se o χ^2 , nomeando-o de χ_5^2 .

(4.6) Comparam-se os dois últimos valores dos qui-quadrados:

(4.6.1) Se $\chi_5^2 > \chi_4^2$, o valor mínimo localiza-se à esquerda de a_5 , como ilustra a Figura 3.14. Se $\chi_4^2 > \chi_5^2$, segue-se para o passo 4.6.2.

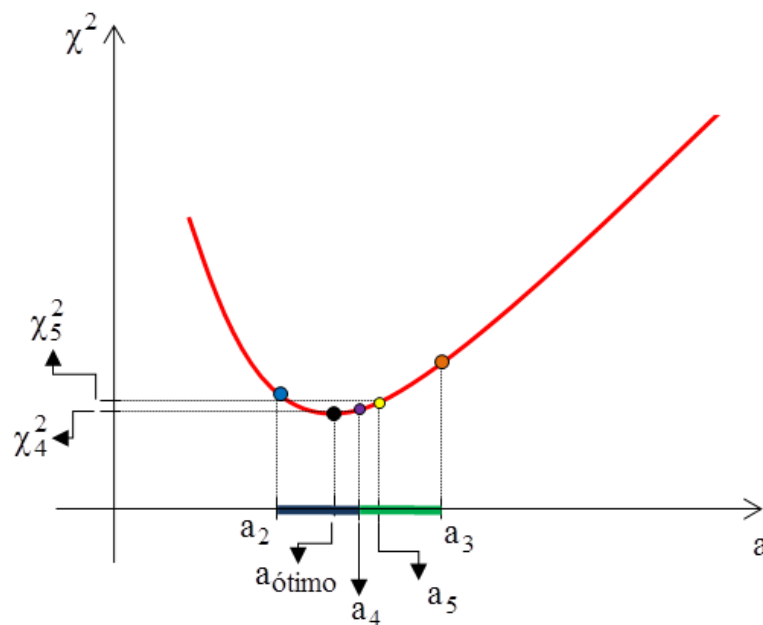


Figura 3.14: Esboço do gráfico da função qui-quadrado considerando-se: $\chi_5^2 > \chi_4^2$.

(4.6.1.1) Calcula-se a média entre a_2 e a_5 , denotando-se por a_6 . Acrescenta-se o Incrém1 à a_6 e obtém-se a_7 ($a_7 = a_6 + \text{Incrém1}$). Resolve-se a Equação (2.9) e calculam-se os valores dos qui-quadrados χ_6^2 e χ_7^2 .

(4.6.1.2) Se $\chi_6^2 > \chi_7^2$, o valor mínimo localiza-se à direita de a_6 , como mostra a Figura 3.15a. Segue-se para o passo 6.1.

(4.6.1.3) Se $\chi_6^2 < \chi_7^2$, o valor mínimo localiza-se à esquerda de a_7 , de acordo com a Figura 3.15b. Segue-se para o passo 6.2.

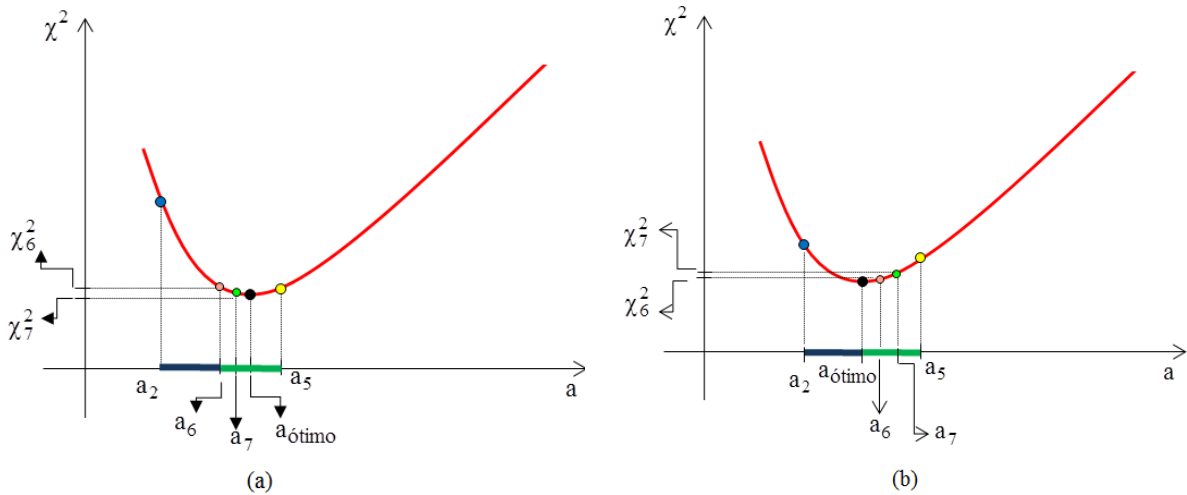


Figura 3.15: Esboço do gráfico da função qui-quadrado na qual $\chi_5^2 > \chi_4^2$, considerando-se: (a) $\chi_6^2 > \chi_7^2$; (b) $\chi_6^2 < \chi_7^2$.

(4.6.2) Se $\chi_4^2 > \chi_5^2$ então o valor ótimo está localizado à direita de a_4 como ilustra a Figura 3.16.

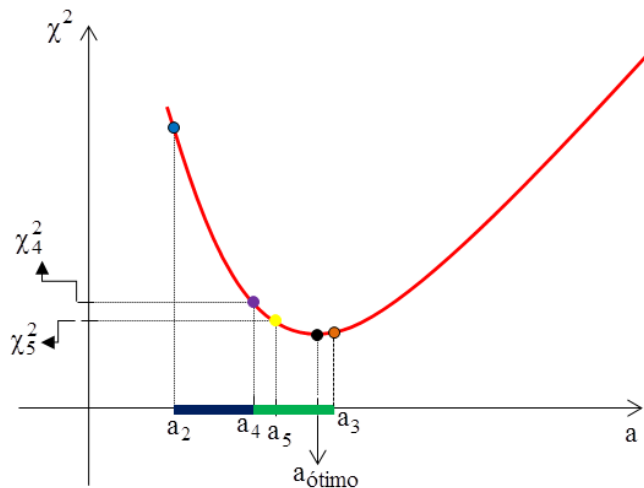


Figura 3.16: Esboço do gráfico da função qui-quadrado considerando-se: $\chi_4^2 > \chi_5^2$.

(4.6.2.1) Calcula-se a média entre a_4 e a_3 , denotando-se por a_6 . Acrescenta-se o Incremento à a_6 e obtém-se a_7 ($a_7 = a_6 + \text{Incremento}$). Resolve-se a Equação (2.9) e calculam-se os valores dos qui-quadrados χ_6^2 e χ_7^2 .

(4.6.2.2) Se $\chi_6^2 > \chi_7^2$, o valor mínimo localiza-se à direita de a_6 , como mostra a Figura 3.17(a). Segue-se para o passo 6.1.

(4.6.2.3) Se $\chi_6^2 < \chi_7^2$, o valor mínimo localiza-se à esquerda de a_7 , como mostra a Figura 3.17(b). Segue-se para o passo 6.2.

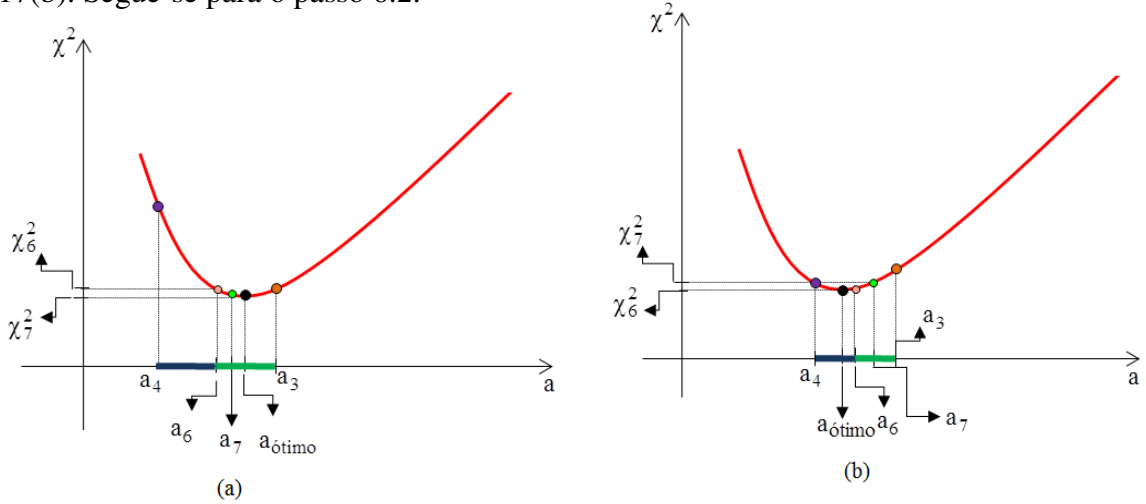


Figura 3.17: Esboço do gráfico da função qui-quadrado na qual $\chi_4^2 > \chi_5^2$, considerando-se:

(a) $\chi_6^2 > \chi_7^2$; (b) $\chi_6^2 < \chi_7^2$.

5º passo:

(5.1) Define-se o parâmetro a como sendo $a = a_0 - \text{Incrém 1}$. Resolve-se a Equação (2.9) e calcula-se o valor do χ^2 , denominando-o de χ_1^2 . Comparando-se os valores dos qui-quadrados, tem-se que $\chi_1^2 < \chi_0^2$, como mostra a Figura 3.18.

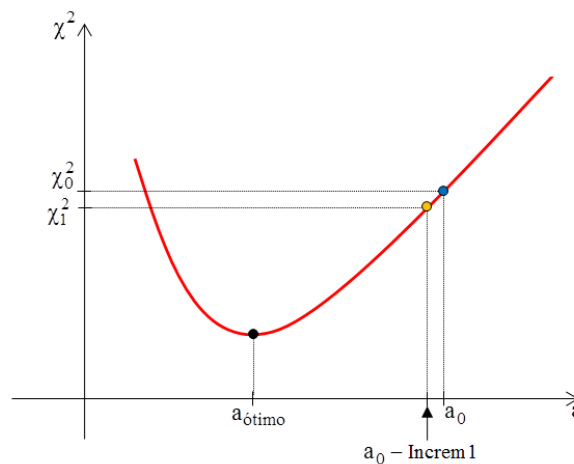


Figura 3.18: Esboço do gráfico do qui-quadrado com valor ótimo à esquerda dos valores iniciais.

(5.2) Atualiza-se o valor de a subtraindo-se o incremento na ordem descrita na sequência S_1 ;

(5.3) Resolve-se a Equação (2.9), calcula-se o valor do χ^2 e compara-se com o anterior; se for menor que o anterior, retorna-se para o passo 5.2, caso contrário, fixam-se os dois últimos valores de a , denotando-os de a_3 e a_2 , respectivamente. Faz-se o parâmetro a igual à média aritmética entre a_3 e a_2 e denomina-o de a_4 ($a_4 = (a_3 + a_2)/2$). Segue-se para o passo 4.4.

6º passo:

(6.1) Atualiza-se o valor de a somando-se os incrementos apresentados na sequência S_2 . Resolve-se a Equação (2.9), determina-se o χ^2 e compara-se com o anterior. Repete-se este procedimento enquanto o valor de χ^2 for menor que o anterior; caso contrário, fixa-se o penúltimo valor de a , considera-o como primeira estimativa para este parâmetro e segue-se para o 7º passo;

(6.2) Atualiza-se o valor de a subtraindo-se os incrementos apresentados na sequência S_2 . Resolve-se a Equação (2.9), determina-se o χ^2 e compara-se com o anterior. Repete-se este procedimento enquanto o valor de χ^2 for menor que o anterior; caso contrário, fixa-se o penúltimo valor de a , considera-o como primeira estimativa para este parâmetro e segue-se para o 7º passo;

7º passo: Mantém-se o parâmetro a fixo e repete-se todo o processo com o parâmetro b . Segue-se para o 8º passo;

8º passo: Caso a precisão estabelecida não tenha sido alcançada, inicia-se uma nova etapa a partir do 2º passo, considerando os últimos valores obtidos para os parâmetros a e b como os novos valores iniciais. O processo continua até que a precisão seja atingida em relação a cada um dos parâmetros a e b .

A Figura 3.19 mostra um diagrama explicativo a respeito das etapas do algoritmo otimizador.

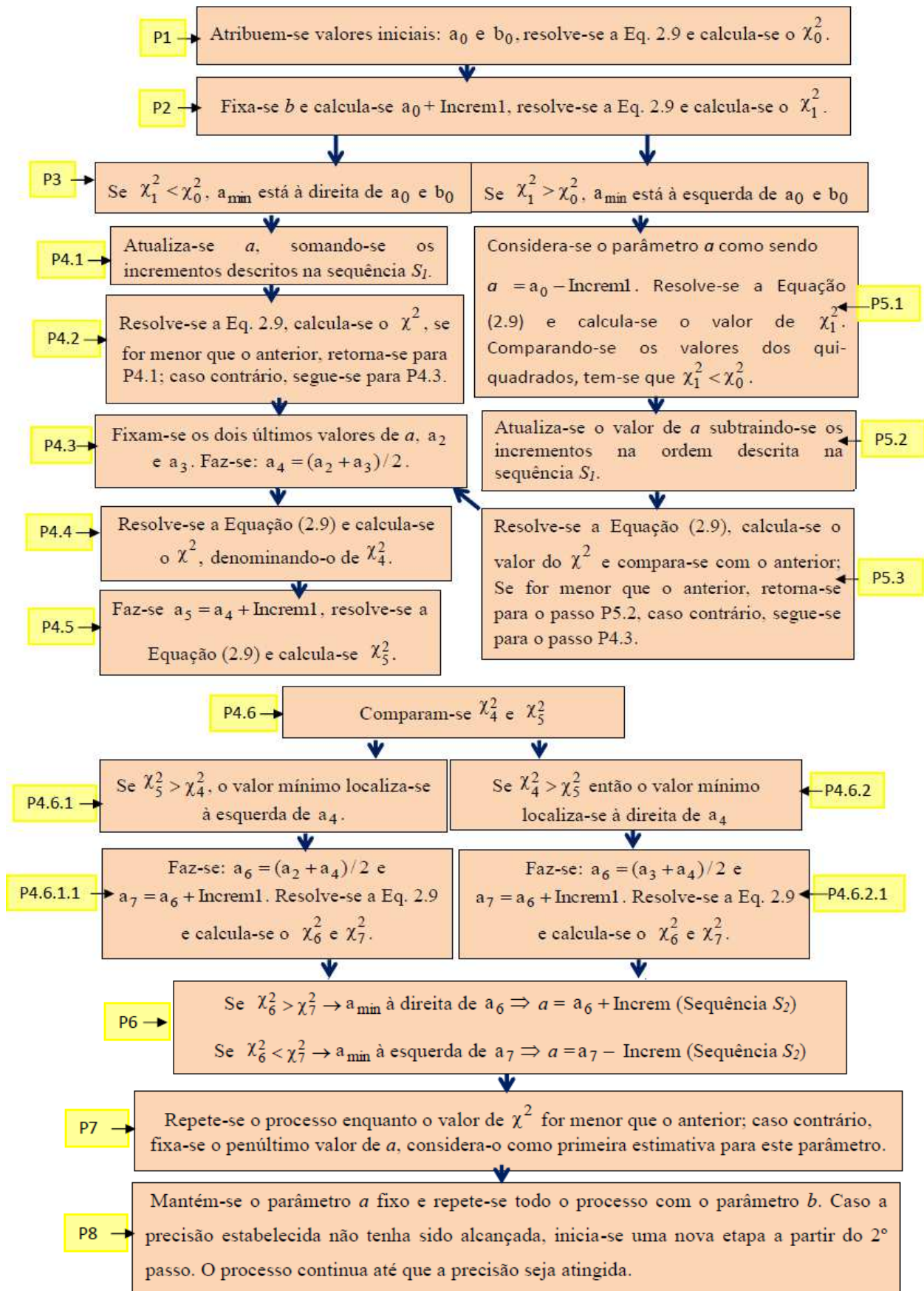


Figura 3.19: Diagrama explicativo do algoritmo otimizador.

3.3. Metodologia experimental

Nesta seção apresenta-se a metodologia referente aos experimentos de desidratação osmótica e de secagem convectiva.

3.3.1. Equipamentos utilizados

Todos os experimentos foram realizados no Laboratório de Medidas Físicas e de Fenômenos de Transporte do curso de Engenharia de Alimentos da UFCG, campus Campina Grande-PB, Brasil.

Os principais equipamentos utilizados nos experimentos são listados a seguir.

- Estufa de secagem e esterilização FANEM, modelo 315 SE, usada na obtenção da massa seca das amostras; estufa bacteriológica MARCONI MA032, utilizada na desidratação osmótica.



(a)



(b)

Figura 3.20: (a) Estufa de secagem e esterilização; (b) Estufa bacteriológica.

- Balança digital AAKER com precisão de 0,001g, utilizada na aferição das massas de cada amostra; balança digital GEHAKA com precisão de 0,1g, usada na medição da massa da solução osmótica.

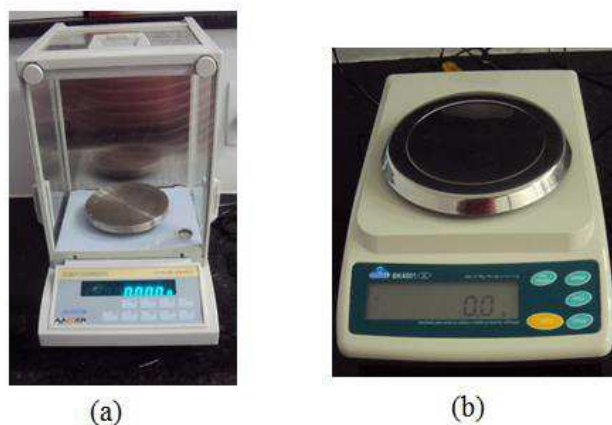


Figura 3.21: Balança digital: (a) AAKER; (b) GEHAKA.

- Paquímetro digital DIGIMESS, usado na medição das dimensões dos pedaços de maçã; refratômetro INSTRUTHERM, modelo TR-280, utilizado para medir a concentração da solução osmótica.



Figura 3.22: (a) Paquímetro digital; (b) Refratômetro digital.

- Dessecador com sílica gel, onde as amostras são colocadas após serem retiradas da estufa e permanecem até atingirem a temperatura ambiente; termômetro digital, usado para aferir a temperatura da solução osmótica.

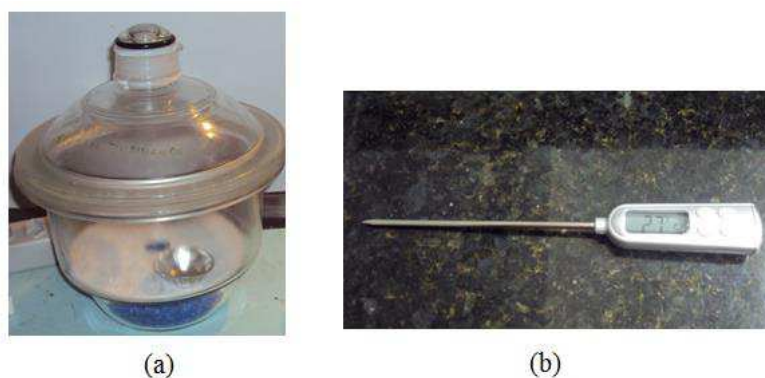


Figura 3.23: (a) Dessecador; (b) Termômetro digital.

- Termo Anemômetro digital MDA-II, usado para medir a velocidade do ar dentro da estufa durante a secagem convectiva; higrômetro EQUITHERM, utilizado para medir a umidade relativa do ar.



(a)



(b)

Figura 3.24: (a) Anemômetro digital; (b) Higrômetro digital.

- Estufa com circulação e renovação de ar MARCONI, modelo MA 035, utilizada durante a secagem convectiva.



Figura 3.25: Estufa com circulação e renovação de ar.

3.3.2. Matéria-prima

A matéria-prima utilizada foi a maçã, cultivar Gala (*Malus doméstica* Bork), adquirida em um supermercado da cidade de Campina Grande-PB, Brasil.

Os frutos escolhidos estavam em boas condições físicas, sem apresentarem machucados ou falhas aparentes em seu tecido e com grau de maturação semelhante. A Figura 3.26 mostra um exemplar de uma maçã utilizada nos experimentos.



Figura 3.26: Exemplar de maçã Gala utilizada nos experimentos.

As maçãs foram higienizadas em água corrente e em seguida, ficaram imersas por cinco minutos em uma mistura de água e hipoclorito de sódio, como mostra a Figura 3.27. Decorrido este período, foram lavadas novamente em água corrente e enxugadas com papel toalha absorvente.



Figura 3.27: Maçãs imersas em hipoclorito de sódio.

Com o auxílio de um cortador de legumes da marca Colombo e de uma faca comum, as frutas foram cortadas em forma de um paralelepípedo com arestas medindo aproximadamente 1,0 cm, 1,0 cm e 2,0 cm, como mostra a Figura 3.28.

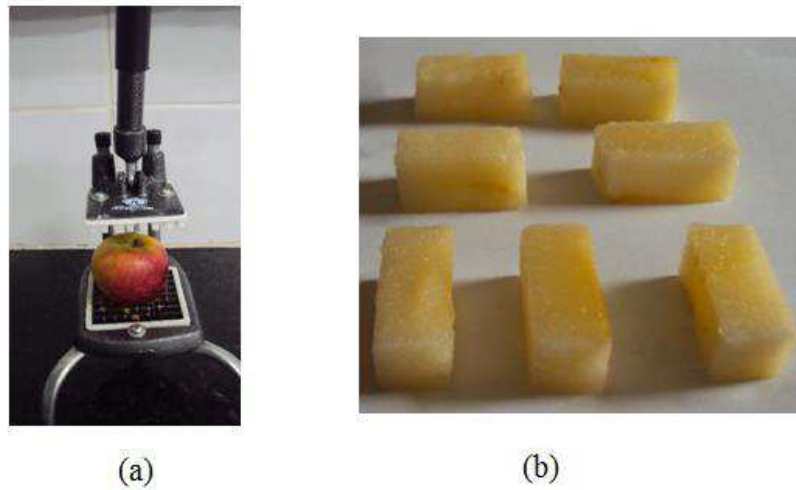


Figura 3.28: (a) Cortador de legumes; (b) Maças em forma de paralelepípedo.

A aferição das dimensões e da massa das amostras foi realizada com um paquímetro e balança digitais, respectivamente.

Uma amostra *in natura* em triplicata foi pesada e levada a uma estufa com temperatura de 105 °C, por vinte e quatro horas, visando à obtenção da quantidade de água e das massas secas no início do processo, como mostra a Figura 3.29.



Figura 3.29: Amostra *in natura* em triplicata.

Decorrido o tempo previsto, as amostras foram retiradas e colocadas em um dessecador contendo sílica gel por trinta minutos, para que atingissem a temperatura ambiente antes de serem pesadas. Em seguida, foram novamente pesadas e a sua massa seca inicial foi obtida.

3.3.3. A desidratação osmótica

A desidratação osmótica (DO) foi realizada com solução formada por sacarose e água destilada, em duas concentrações diferentes: 40 e 60 °Brix. A concentração foi medida com refratômetro e a proporção utilizada de fruto para solução foi 1:15. As temperaturas utilizadas foram 40 e 60 °C, sendo gerados, portanto, quatro experimentos distintos:

- Experimento 1: 40 °Brix e 40 °C;
- Experimento 2: 60 °Brix e 40 °C;
- Experimento 3: 40 °Brix e 60 °C;
- Experimento 4: 60 °Brix e 60 °C.

Durante os experimentos, a umidade relativa do ar foi aferida com um higrômetro e o valor médio, bem como o desvio padrão é dado por $(60 \pm 3) \%$.

Em cada experimento, foram colocadas 11 amostras em triplicatas, organizadas em cestas teladas contendo, em média, 12 gramas de maçã. Foram numeradas de 1 a 11, com as seguintes identificações $A_{1,1}$, $A_{1,2}$, $A_{1,3}$, $A_{2,1}$, $A_{2,2}$, $A_{2,3}$, ..., $A_{11,1}$, $A_{11,2}$, $A_{11,3}$. As cestas foram imersas na solução pré-aquecida e, em seguida, colocadas na estufa para a manutenção da temperatura, como mostra a Figura 3.30.



Figura 3.30: (a) Cestas teladas; (b) Recipientes na estufa com as cestas imersas na solução osmótica.

Com o intuito de simplificar a descrição, cada amostra será nomeada apenas por A_i , com i variando de 1 a 11. Como já foi mencionado, os experimentos foram realizados em triplicatas, ou seja, para cada i tem-se $A_{i,1}$, $A_{i,2}$ e $A_{i,3}$.

Para cada período de imersão t_i , dados em minutos, foi fixada uma amostra A_i . Foram considerados os períodos de imersão $t_1 = 10$, $t_2 = 30$, $t_3 = 60$, $t_4 = 90$, $t_5 = 120$, $t_6 = 150$, $t_7 = 180$, $t_8 = 210$, $t_9 = 240$, $t_{10} = 1440$ e $t_{11} = 1800$.

A metodologia utilizada está descrita a seguir.

1º) Antes de serem imersas na solução osmótica, cada amostra A_i , teve sua massa inicial $m_0(A_i)$, determinada;

2º) Após os 10 minutos, a amostra A_1 foi retirada da solução, lavada com água destilada, enxugada levemente com papel absorvente e sua massa foi aferida em balança digital. Logo após, foi levada para a estufa a 105 °C, onde permaneceu por 24 horas, visando à obtenção de sua matéria seca;

3º) O procedimento do passo 2 foi repetido para cada amostra A_i , correspondente ao tempo t_i até a retirada da última amostra, A_{11} , correspondente ao período de 1800 minutos.

A Figura 3.31 ilustra amostras de maçã após o processo de desidratação osmótica a 40 °Brix e 60 °C.



Figura 3.31: Amostras de maçã após DO a 40 °Brix e 60 °C.

Com o procedimento descrito, foi possível determinar as massas de água e de sacarose contidas na amostra A_{11} em todos os instantes t_i , a partir das massas de água e de sacarose das amostras A_i , como exposto a seguir.

- No instante inicial.

Para se determinar a massa seca de A_{11} no início do processo, $MS_0(A_{11})$, utilizou-se a massa seca obtida com a amostra *in natura*, denotada por $MS(A_{in})$, através da regra de três:

$$\begin{aligned} m_0(A_{in}) &\rightarrow MS(A_{in}) \\ m_0(A_{11}) &\rightarrow MS_0(A_{11}) \end{aligned} \quad (3.37)$$

que resultou na relação

$$MS_0(A_{11}) = \frac{m_0(A_{11}) \cdot MS(A_{in})}{m_0(A_{in})} \quad (3.38)$$

A massa de água $MA_0(A_{11})$ foi obtida por:

$$MA_0(A_{11}) = m_0(A_{11}) - MS_0(A_{11}) \quad (3.39)$$

- Para um instante t_i , com $i = 1, 2, 3, \dots, 10$.

De uma forma geral, associando cada instante t_i a amostra A_i , tem-se:

➤ Na obtenção da massa $m_{t_i}(A_{11})$, a regra de três foi construída utilizando-se a massa de

A_i no instante t_i :

$$\begin{aligned} m_0(A_i) &\rightarrow m_{t_i}(A_i) \\ m_0(A_{11}) &\rightarrow m_{t_i}(A_{11}) \end{aligned} \quad (3.40)$$

obtendo-se a relação:

$$m_{t_i}(A_{11}) = \frac{m_0(A_{11}) \cdot m_{t_i}(A_i)}{m_0(A_i)} \quad (3.41)$$

➤ A massa seca $MS_{t_i}(A_{11})$ foi obtida por:

$$\begin{aligned} m_{t_i}(A_i) &\rightarrow MS_{t_i}(A_i) \\ m_{t_i}(A_{11}) &\rightarrow MS_{t_i}(A_{11}) \end{aligned} \quad (3.42)$$

originando a expressão:

$$MS_{t_i}(A_{11}) = \frac{m_{t_i}(A_{11}) \cdot MS_{t_i}(A_i)}{m_{t_i}(A_i)} \quad (3.43)$$

➤ A massa de água, $MA_{t_i}(A_{11})$, foi determinada por:

$$MA_{t_i}(A_{11}) = m_{t_i}(A_{11}) - MS_{t_i}(A_{11}) \quad (3.44)$$

➤ O ganho de sacarose, $SG_{t_i}(A_{11})$, por sua vez, foi encontrado pela diferença entre as massas secas no instante t_i e no instante inicial:

$$SG_{t_i}(A_{11}) = MS_{t_i}(A_{11}) - MS_0(A_{11}). \quad (3.45)$$

Nas Equações (3.37)–(3.41), m_0 indica a massa inicial; nas Equações (3.40)–(3.44), m_{t_i} representa a massa total no instante t_i ; nas Equações (3.37)–(3.39) e (3.45), MS_0 denota a massa seca inicial, sem a incorporação de sacarose; MS_{t_i} nas Equações (3.42)–(3.45) indica a massa seca no instante t_i , quando já existe incorporação de sacarose.

Para o instante $t_{11} = 1800$ min, a massa da amostra A_{11} foi aferida em balança digital e sua massa seca foi obtida através do peso da amostra após vinte e quatro horas na

estufa, como usualmente. Os cálculos da massa de água e do ganho de sacarose, neste instante, foram obtidos através das Equações (3.44) e (3.45), respectivamente.

No presente trabalho, as análises também foram feitas em termos de quantidade relativa de água (QA) e quantidade relativa de sacarose (QS) existente nas amostras de maçãs ao longo do processo de desidratação osmótica. Estes parâmetros foram definidos segundo as Equações (3.46) e (3.47), respectivamente, apresentados em forma percentual.

$$QA_{t_i}(A_{11}) = \frac{MA_{t_i}(A_{11})}{MA_0(A_{11})} \times 100 \quad (3.46)$$

$$QS_{t_i}(A_{11}) = \frac{SG_{t_i}(A_{11})}{MS_0(A_{11})} \times 100 \quad (3.47)$$

O procedimento descrito foi adotado para todas as amostras $A_{i,1}$, $A_{i,2}$ e $A_{i,3}$, com i variando de 1 a 11. Tendo em vista que os experimentos foram realizados em triplicatas, foram utilizadas as médias aritméticas dos valores obtidos para as grandezas de interesse em cada experimento.

3.3.3.1. O encolhimento durante a DO

Para cada um dos quatro experimentos, foram colocadas amostras, juntamente com as demais, visando analisar o encolhimento ao longo do processo. As amostras foram marcadas com marcador de tinta permanente ao longo de suas arestas para que as aferições fossem feitas sempre no mesmo local, como mostra a Figura 3.32.



Figura 3.32: Amostras usadas na cinética do encolhimento na DO.

As amostras foram pesadas, suas dimensões medidas com um paquímetro, em seguida, colocadas em cestas teladas e imersas na solução osmótica, juntamente com as demais. Nos mesmos instantes já citados na seção anterior, as massas e as dimensões de cada amostra foram aferidas.

Os resultados foram analisados para cada instante, utilizando-se a média aritmética entre os três valores encontrados para a massa e para as dimensões L_x , L_y e L_z .

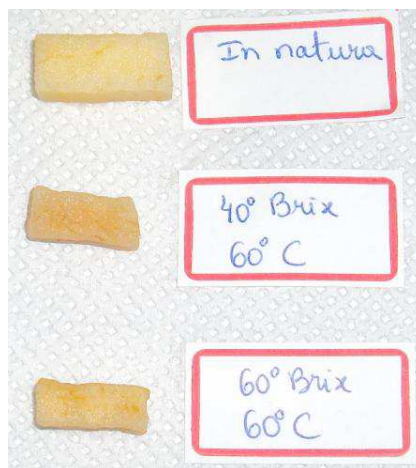


Figura 3.33: Amostras *in natura* e osmoticamente desidratadas a 60 °C por 1800 minutos.

3.3.4. A secagem

A secagem foi realizada em uma estufa com circulação e renovação de ar (Figura 3.25) com direção do fluxo transversal. A velocidade do ar no seu interior foi medida periodicamente com um anemômetro digital e variou em torno de 2,5 m/s. A umidade relativa do ar foi aferida com um higrômetro, com valor médio em torno de 60%.

Inicialmente, as amostras de maçãs previamente desidratadas por osmose foram pesadas em balança digital, com o objetivo de se determinar as suas massas iniciais m_0 . Em seguida, foram distribuídas em cestas de arame, com uma média de 15 g de fruta por cesta.

As temperaturas utilizadas foram 40 e 60 °C, totalizando quatro experimentos. Para cada temperatura de secagem, foram selecionadas amostras de maçãs osmoticamente desidratadas, todas em triplicatas, nas condições mostradas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Condições operacionais da secagem.

Temperatura (°C) de secagem	Condições das amostras
40	DO: 40 °Brix e 40 °C
	DO: 60 °Brix e 40 °C
60	DO: 40 °Brix e 60 °C
	DO: 60 °Brix e 60 °C

A Figura 3.34 ilustra amostras de maçãs desidratadas, antes da secagem.

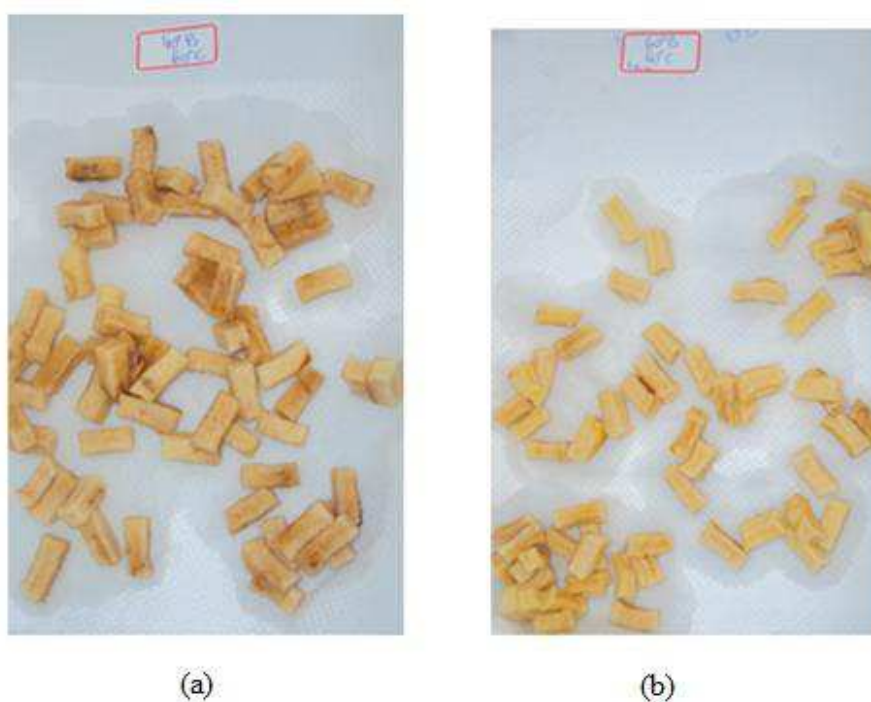


Figura 3.34: Maçãs osmoticamente desidratadas a: (a) 40 °Brix e 60 °C; (b) 60 °Brix e 60 °C .

Os instantes analisados, em minutos, foram: 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 120, 140, 170, 200, 230, 290, 350, 410, 470,...., e continuaram com intervalos de 60 minutos, com términos distintos para cada uma das situações. O fim da secagem foi determinado pela ausência de variação no peso das amostras, que caracteriza o estado de equilíbrio.

A Figura 3.35 ilustra algumas amostras de maçãs após o término da secagem a temperatura de 40 °C.

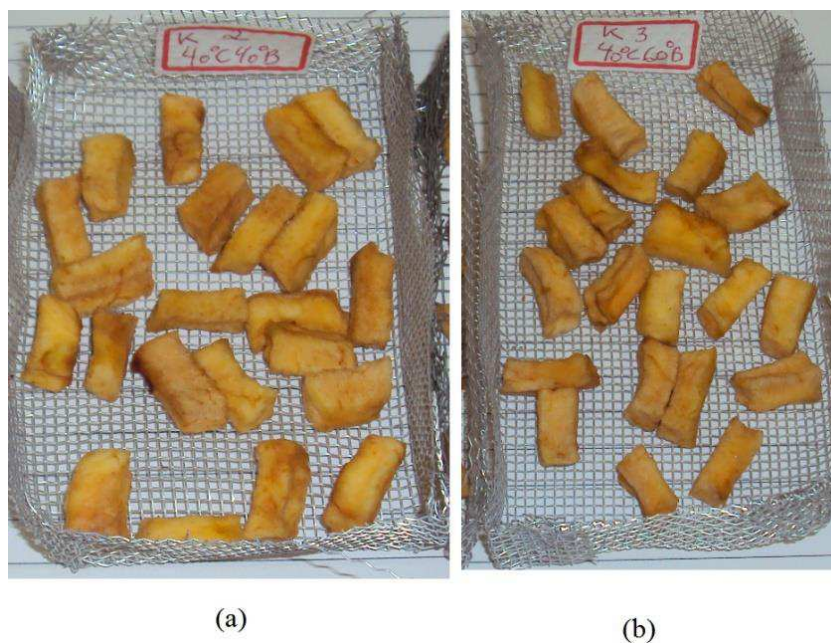


Figura 3.35: Amostras após secagem a 40 °C: (a) DO: 40 °Brix e 40 °C; (b) DO: 60 °Brix e 40 °C.

As amostras foram conduzidas à estufa com temperatura de 105 °C, onde permaneceram por vinte e quatro horas. Em seguida, foram retiradas, colocadas no dessecador por 30 minutos e só então, suas massas secas (MS) foram determinadas através da pesagem.

Na análise dos resultados, os seguintes parâmetros foram considerados:

- A massa das amostras no instante t , denotada por m_t , determinada através da pesagem em balança digital, em cada instante t acima mencionado;
- A massa de água no tempo t , MA_t , definida pela diferença entre a massa total e a massa seca da maçã. Ou seja,

$$MA_t = m_t - MS \quad (3.48)$$

Em particular, a determinação da massa de água inicial ($t = 0$) é calculada através da relação:

$$MA_0 = m_0 - MS \quad (3.49)$$

- A massa de água de equilíbrio expressa pela diferença entre a massa de equilíbrio e a massa seca.

$$MA_{eq} = m_{eq} - MS \quad (3.50)$$

- O teor de umidade em base seca (b.s.) dado pelo quociente entre a massa de água no instante t e a massa seca. Isto é,

$$X_t(\text{b.s.}) = \frac{MA_t}{MS}. \quad (3.51)$$

O teor de umidade inicial é obtido fazendo-se $t = 0$ na Equação (3.51), ou seja,

$$X_0(\text{b.s.}) = \frac{MA_0}{MS}. \quad (3.52)$$

Como consequência da Equação (3.51), tem-se o teor de umidade de equilíbrio, obtido pela relação:

$$X_{eq}(\text{b.s.}) = \frac{MA_{eq}}{MS}. \quad (3.53)$$

- O teor de umidade X_t^* em cada instante t, adimensional, definido por:

$$X_t^*(\text{b.s.}) = \frac{X_t(\text{b.s.}) - X_{eq}(\text{b.s.})}{X_0(\text{b.s.}) - X_{eq}(\text{b.s.})}. \quad (3.54)$$

3.3.4.1. O encolhimento durante a secagem

Durante a secagem o encolhimento da maçã também foi monitorado juntamente com as demais amostras, seguindo o mesmo roteiro mostrado na Tabela 3.3.

Uma amostra de cada combinação foi retirada das porções das frutas já desidratadas e marcadas com caneta permanente, destacando-se as arestas L_x , L_y e L_z . No início do processo, foram pesadas e suas dimensões medidas. Obedecendo aos mesmos instantes da cinética de secagem, as demais amostras tiveram suas massas e a dimensões aferidas, até que atingiram o estado de equilíbrio.

A Figura 3.36 apresenta amostras osmoticamente desidratadas usadas na cinética do encolhimento na secagem a 60 °C.

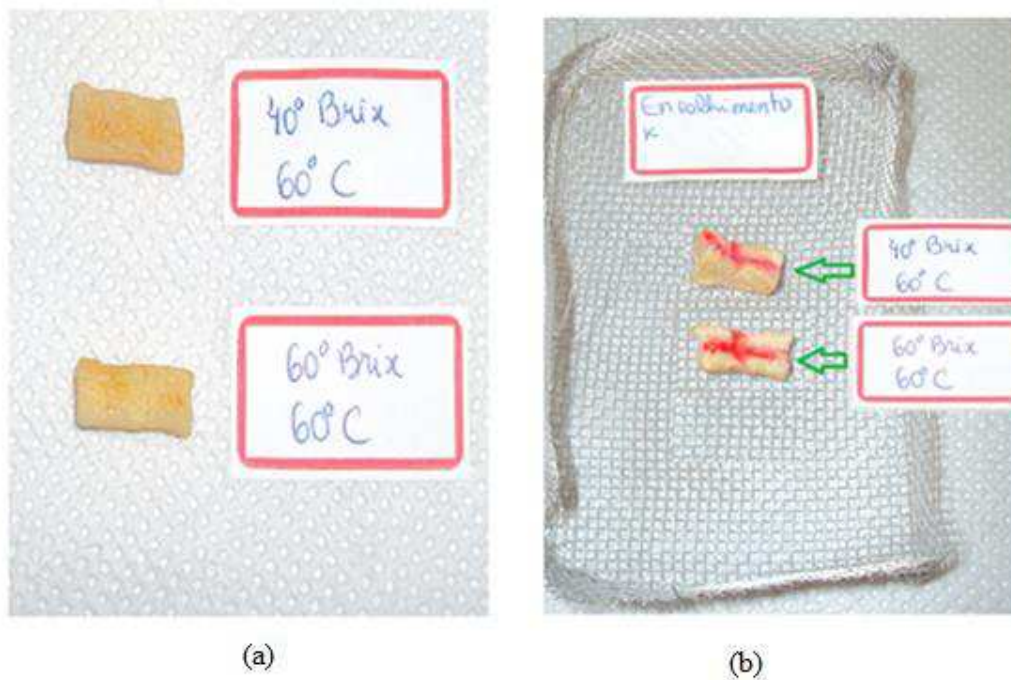


Figura 3.36: Amostras usadas na cinética do encolhimento durante a secagem com temperatura de 60 °C: (a) antes da secagem; (b) após a secagem.

3.4. Metodologia computacional

O programa computacional foi desenvolvido na linguagem FORTRAN (FORMula TRANslation) com a opção de programação QuickWin Application, que possibilita o desenvolvimento de um *software* com interface gráfica para a plataforma Windows. O código desenvolvido inclui um algoritmo de otimização acoplado ao programa que fornece a solução numérica tridimensional da equação de difusão. Este programa possibilita a simulação de

processos difusivos quando são conhecidos os seus parâmetros, independentemente do otimizador. Para a sua execução são necessárias informações sobre a definição da malha, dimensões do sólido, número de passos no tempo, tempo de execução, tolerância, difusividade, número máximo de iterações e condições iniciais e de equilíbrio. Todas estas informações são inseridas em um arquivo de texto, denominado de “Dados_Iniciais”, o qual é lido e interpretado pelo programa. Além dos requisitos mencionados, faz-se necessário a escolha das expressões para representarem as dimensões do sólido e a difusividade. Após serem fornecidas as informações necessárias e o programa ser executado, são gerados arquivos com os resultados.

Para a execução do código desenvolvido para o otimizador, também são necessárias informações referentes às dimensões do sólido, condições iniciais e de equilíbrio, tempo de execução, número de passos de tempo, definição da malha, tolerância, além de, um conjunto de dados experimentais. Ao término de cada simulação, são concebidos arquivos com os resultados.

Nas simulações realizadas com o otimizador, este funciona como o programa principal do *software*, enquanto que o programa que fornece a solução numérica da equação de difusão é transformado em uma sub-rotina.

Capítulo 4: Resultados e discussão

Para descrever o processo de desidratação osmótica e de secagem convectiva complementar de maçãs cortadas em forma de paralelepípedo, objetivo principal desta pesquisa, foi proposto um modelo difusivo numérico. Neste sentido, a solução numérica da equação de difusão foi obtida por meio do método dos volumes finitos, com condição de contorno de primeiro tipo e com formulação totalmente implícita. O código computacional desenvolvido inclui um algoritmo de otimização acoplado ao programa que fornece a solução numérica tridimensional, com interface gráfica para viabilizar a comunicação com o usuário. Para validar o referido programa, alguns testes foram realizados. Neste capítulo, são apresentados a interface gráfica, os testes de validação, os resultados obtidos nos experimentos de desidratação osmótica e secagem, como também, os modelos matemáticos encontrados por meio da otimização para descrever os processos de desidratação osmótica e secagem convectiva. Além disso, análises e discussões são feitas acerca das etapas desenvolvidas nesta pesquisa.

4.1. A interface gráfica do software desenvolvido

A interface gráfica é composta por dois menus, denotados por “Arquivo” e “Resultados”. A comunicação com o usuário é feita através de arquivos de texto e caixas de diálogo. A Figura 4.1 mostra a tela inicial da referida interface.



Figura 4.1: Tela inicial da interface gráfica.

4.1.1. O menu “Arquivo”

No menu Arquivo, o usuário pode escolher as opções “Simulação sem simetria”, “Simulação com simetria”, “Otimização” ou “Sair”, como mostra a Figura 4.2.

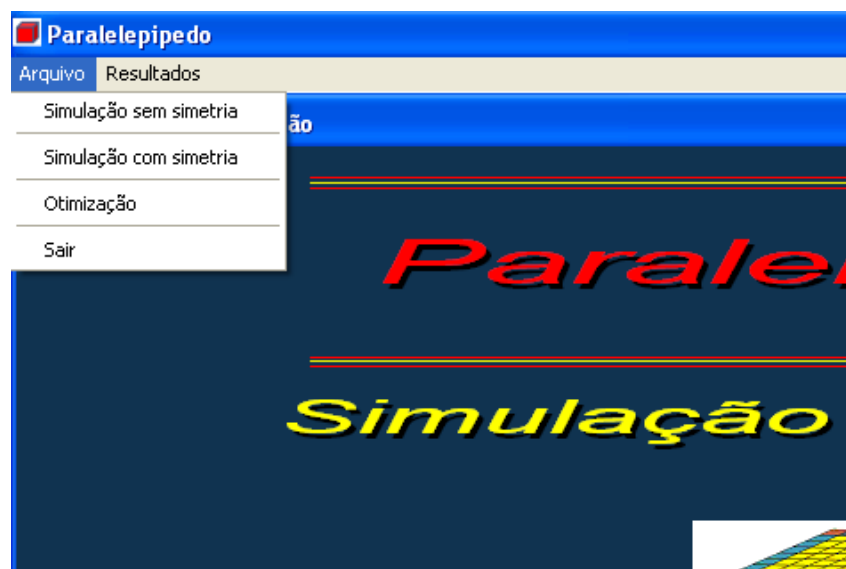


Figura 4.2: Tela inicial da interface com destaque para o menu Arquivo.

4.1.1.1. As simulações

Os diálogos a seguir são idênticos para as opções “Simulação sem simetria” e “Simulação com simetria”. Para a opção “simulação com simetria” os dados iniciais e os referentes às dimensões do sólido são inseridos de forma idêntica à opção “simulação sem simetria”. O próprio programa realiza as alterações necessárias, a exemplo da consideração do fluxo nulo nas faces adequadas e da divisão por dois das dimensões L_x , L_y e L_z .

Um arquivo de texto é aberto para que o usuário insira informações concernentes aos dados iniciais, como mostra a Figura 4.3.

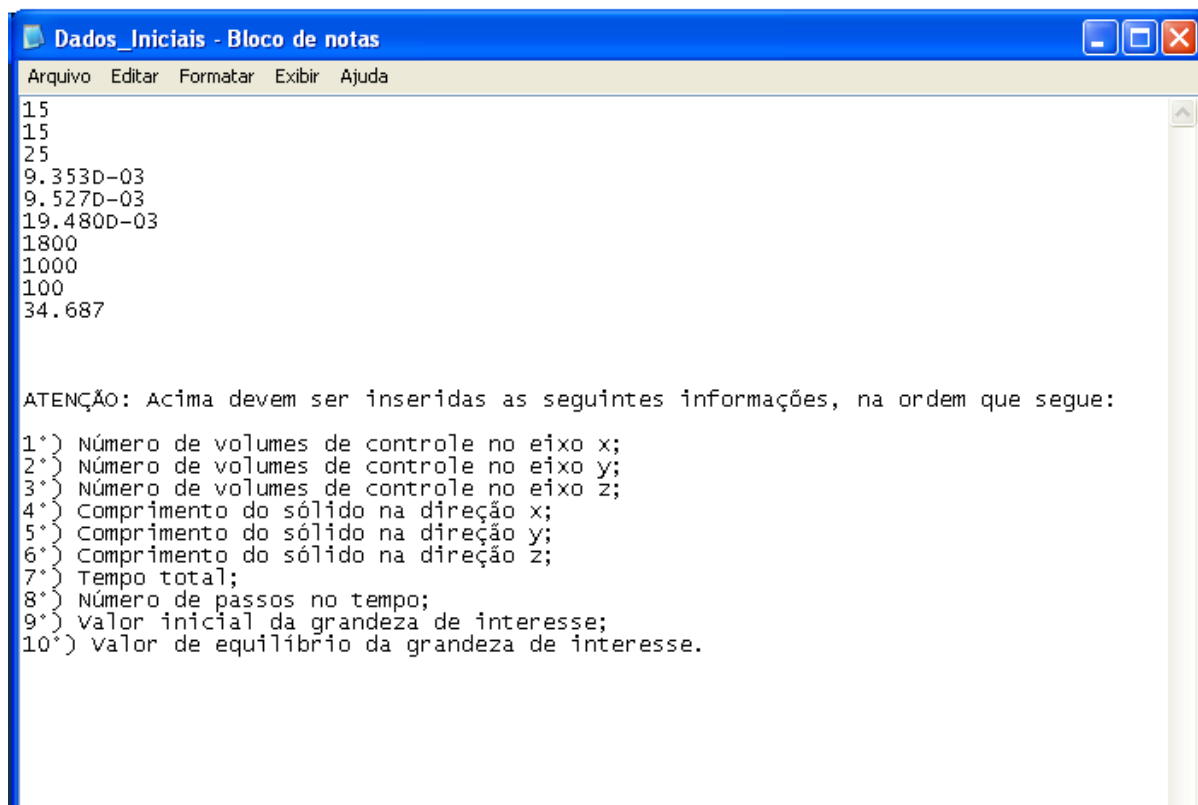


Figura 4.3: Arquivo de texto no qual são inseridos os dados iniciais.

Uma caixa de diálogo é aberta para que o usuário escolha a expressão para as dimensões do sólido, dentre vinte e quatro opções. Em seguida, outra caixa é aberta para que os parâmetros da referida expressão sejam escritos, como mostra a Figura 4.4.

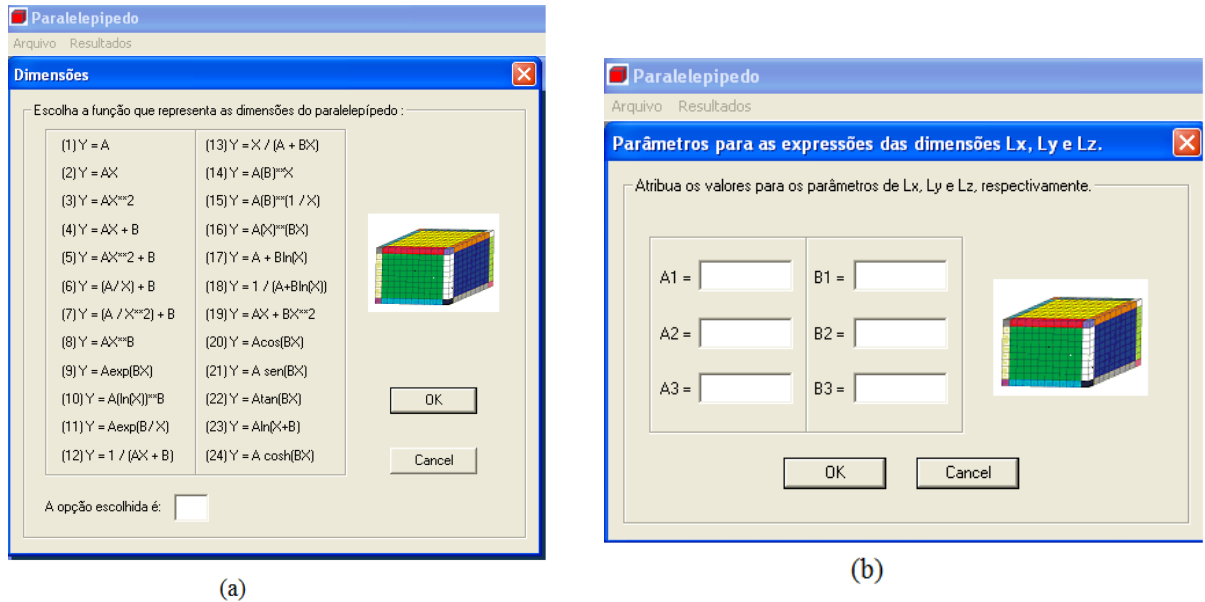


Figura 4.4: Caixa de diálogo na qual é possível o usuário: (a) optar pela expressão para as dimensões do sólido; (b) inserir os valores dos parâmetros das referidas expressões.

A Figura 4.5 mostra as caixas de diálogo nas quais a função que representa a difusividade e os seus respectivos parâmetros devem ser escolhidos.

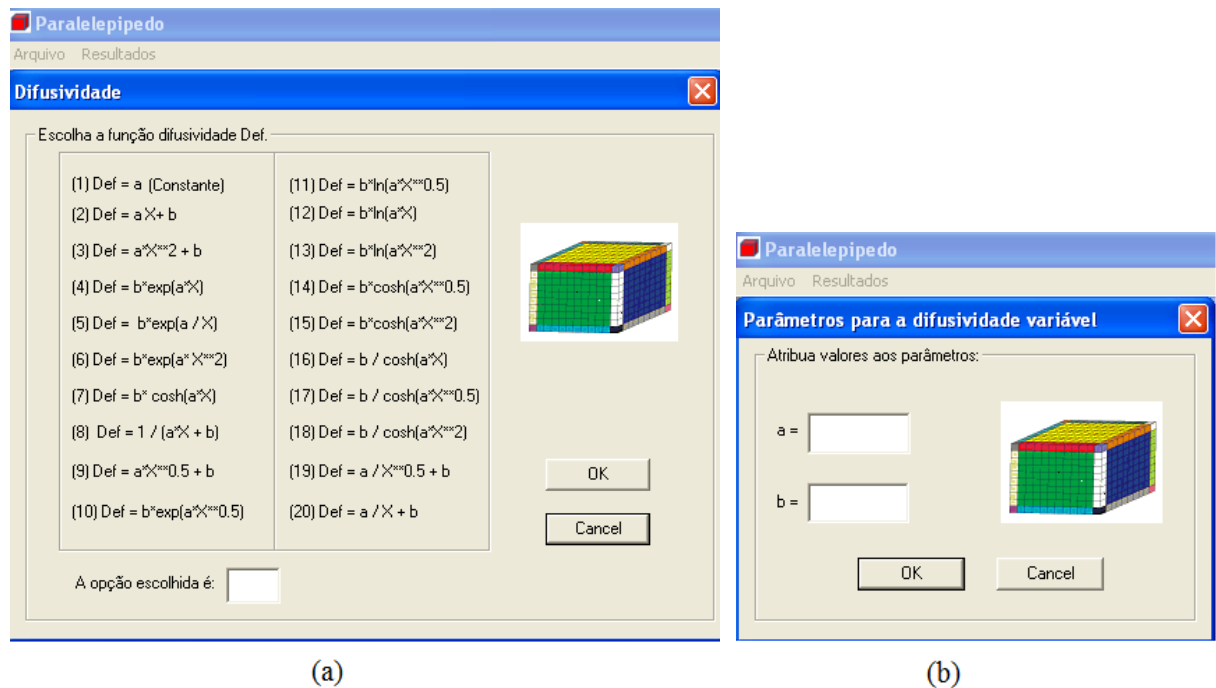


Figura 4.5: Caixa de diálogo na qual é possível o usuário: (a) optar pela função difusividade; (b) inserir os parâmetros da função difusividade.

A Figura 4.6 (a) mostra a tela na qual o usuário pode optar por obter a cinética para um volume de controle específico. Caso a opção seja 1 (Sim), a caixa de diálogo onde as coordenadas referentes à posição devem ser inseridas é aberta, como mostra o ítem (b) da referida figura.

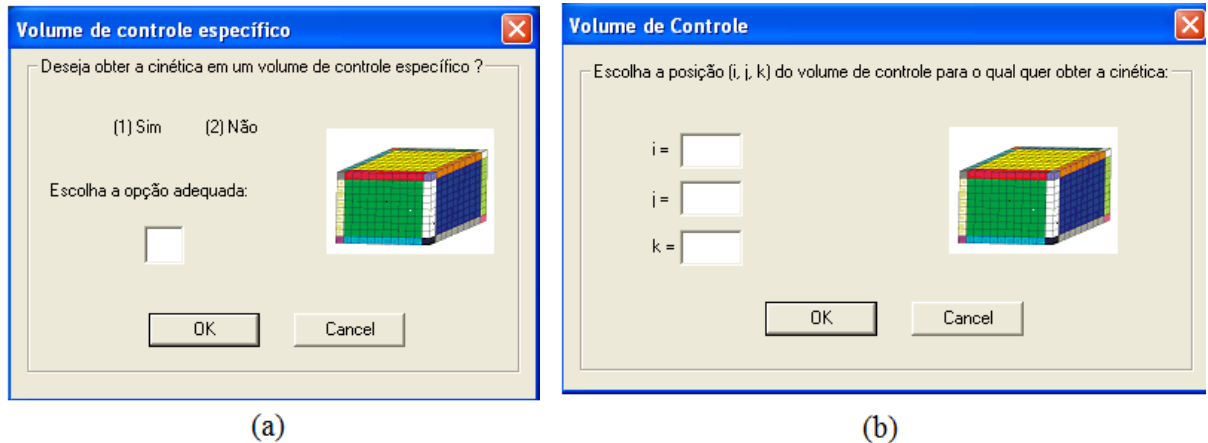


Figura 4.6: Caixa de diálogo na qual é possível o usuário: (a) decidir se quer obter a cinética para um volume de controle específico; (b) determinar a posição do volume de controle, caso a resposta do ítem (a) seja positiva.

É possível obter os arquivos necessários para a análise da distribuição da grandeza de interesse em um determinado plano. A opção é feita através da caixa de diálogo mostrada na Figura 4.7(a). Caso seja positiva, abre-se outra tela onde são escolhidos o plano k e seis instantes de tempo ao longo do processo, como mostra o ítem (b) da mencionada figura.

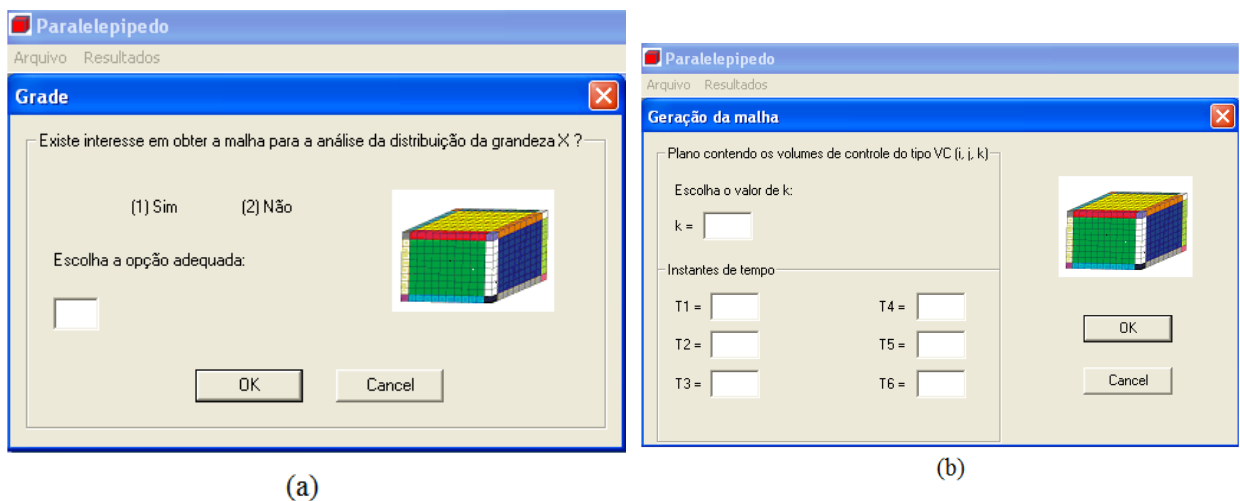


Figura 4.7: Caixa de diálogo na qual é possível o usuário: (a) decidir se quer gerar a malha para a obtenção da distribuição da grandeza de interesse; (b) escolher o plano e seis instantes de tempo.

O programa viabiliza a obtenção da cinética em volumes de controle específicos do plano escolhido na caixa de diálogo apresentada na Figura 4.7(b). Se a opção for “Sim”, podem ser escolhidos quatro volumes de controle, como mostra a Figura 4.8.

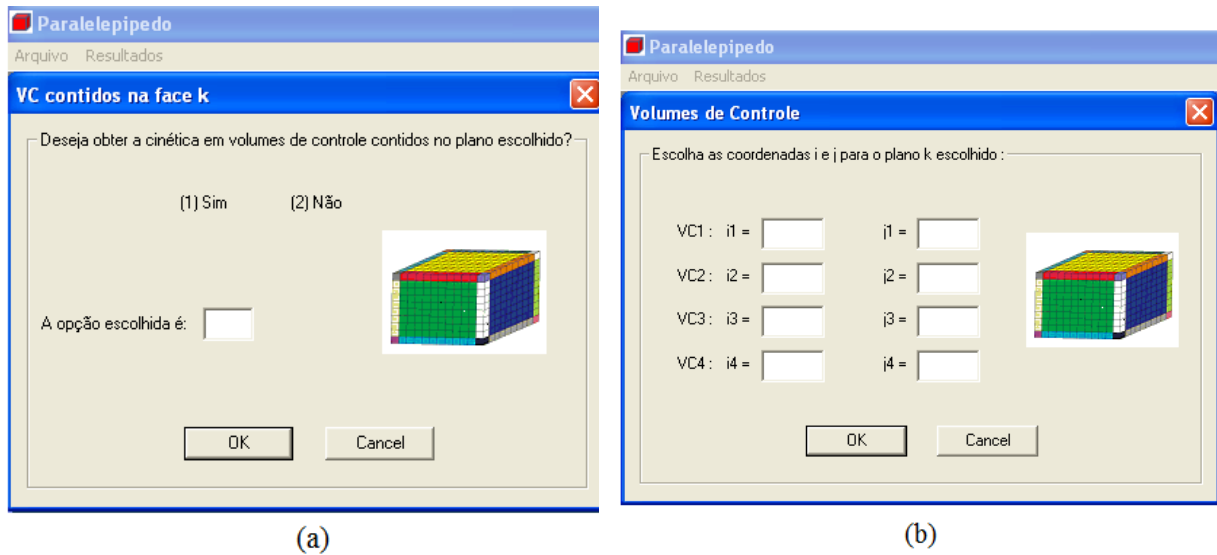


Figura 4.8: Caixa de diálogo na qual é possível o usuário: (a) optar pela obtenção da cinética em volumes de controle contidos no plano k escolhido; (b) escolher os volumes de controle.

Em seguida o programa realiza a simulação e fornece os resultados solicitados, os quais são obtidos no menu “Resultados”.

4.1.1.2. A otimização

Para a opção “Otimização”, os dados iniciais devem ser inseridos como mostra a Figura 4.3. O usuário deve fazer as opções relativas às dimensões do sólido, bem como, à função difusividade, de forma análoga ao que foi mostrado no item que envolve as simulações.

Para minimizar o tempo de execução no processo de otimização, o programa acoplado para a resolução da equação de difusão tridimensional faz uso da simetria. Além disso, não são oferecidas opções em relação à obtenção de outros arquivos, a exemplo de cinéticas de volumes de controle ou malhas para o estudo da distribuição da grandeza de interesse, como são apresentados no item envolvendo as simulações.

Os dados experimentais devem ser escritos em um arquivo de texto, de acordo com a Figura 4.9.

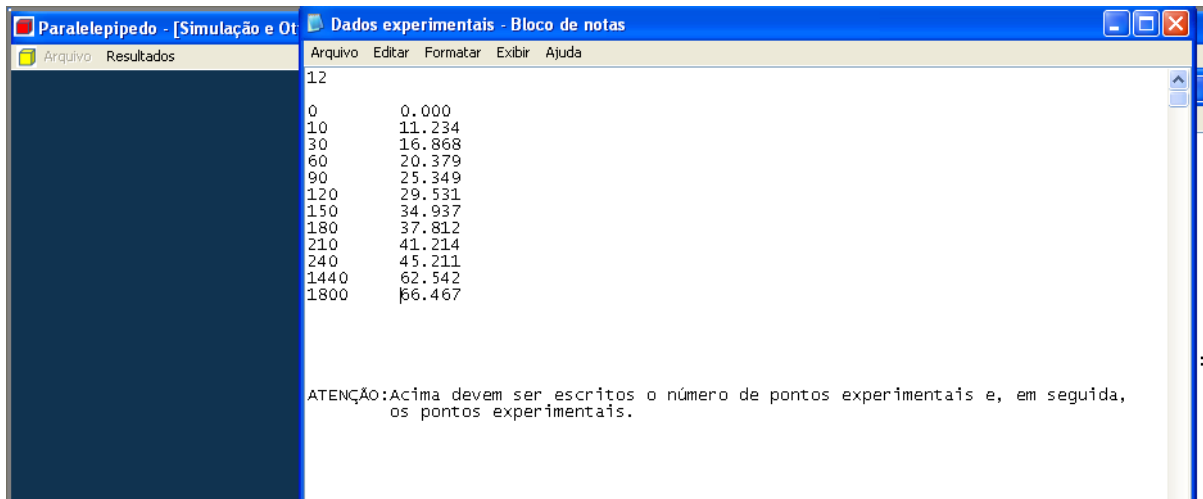


Figura 4.9: Tela na qual os dados experimentais são inseridos.

Os resultados obtidos no presente menu são apresentados em “Resultados”.

4.1.2. O menu “Resultados”

Os resultados obtidos através das solicitações feitas no menu “Arquivo” são apresentadas em forma de arquivos de texto e caixa de diálogo, os quais podem ser salvos em diretórios escolhidos pelo usuário.

A Figura 4.10 mostra a tela inicial com o menu “Resultados” em destaque.

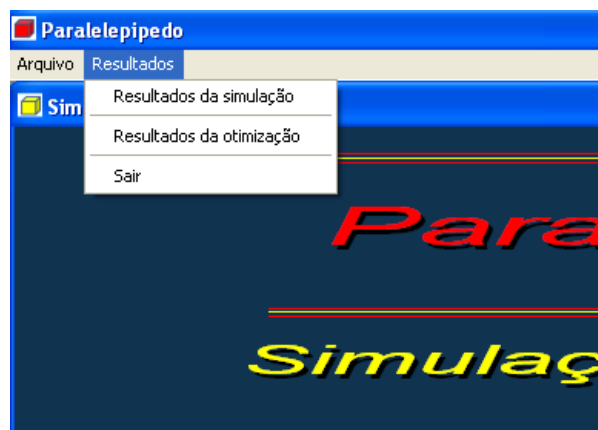


Figura 4.10: Tela inicial da interface gráfica com o menu “Resultados” em destaque.

4.1.2.1. Resultados da simulação

As simulações geram resultados semelhantes. A Figura 4.11 mostra o resultado de uma simulação, onde é apresentado o transiente médio relativo à quantidade de água na desidratação osmótica de maçã.

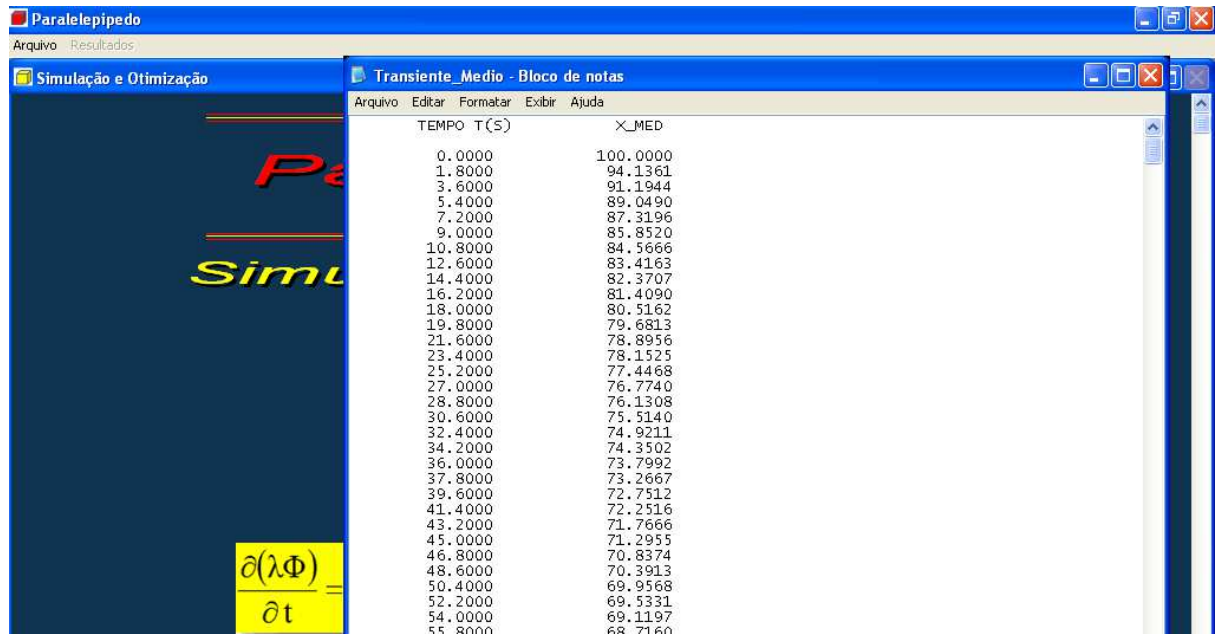


Figura 4.11: Arquivo de texto com o resultado de uma simulação.

Caso o usuário solicite a obtenção da malha para viabilizar o estudo da distribuição da grandeza de interesse, como mostra a Figuras 4.7, são gerados arquivos nomeados de Grid.txt, Phi0.txt, Phi1.txt, Phi2.txt, Phi3.txt, Phi4.txt, Phi5.txt e Phi6.txt. A opção por nomeá-los desta forma é para que os mesmos possam ser utilizados pelo *software* Contour Plot (Silva, 2010) para a obtenção das imagens.

O arquivo Grid.txt fornece as coordenadas da malha utilizada, enquanto que, os demais arquivos citados, concedem o valor da grandeza de interesse em todos os volumes de controle na face escolhida, no instante inicial e nos demais instantes escolhidos pelo usuário através da caixa de diálogo mostrada na Figura 4.7(b). A Figura 4.12 mostra um exemplo de um arquivo Grid.txt.

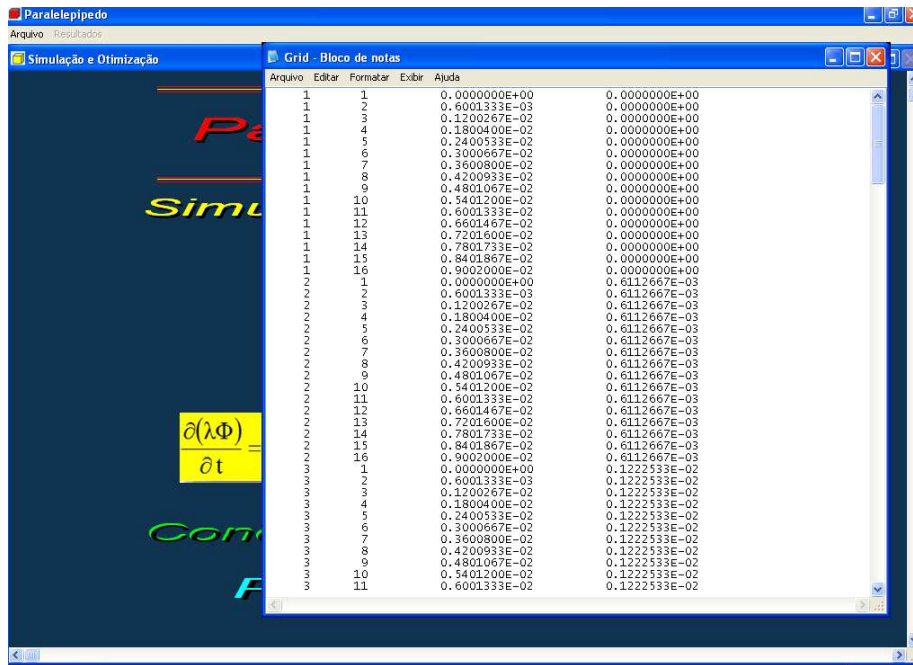


Figura 4.12: Exemplo de um arquivo de texto “Grid.txt”.

4.1.2.2. Resultados da otimização

Ao final do processo de otimização uma caixa de diálogo é aberta com os resultados obtidos: a função difusividade utilizada, os valores dos parâmetros da difusividade, o qui-quadrado, o coeficiente de determinação e o erro, como mostra a Figura 4.13.

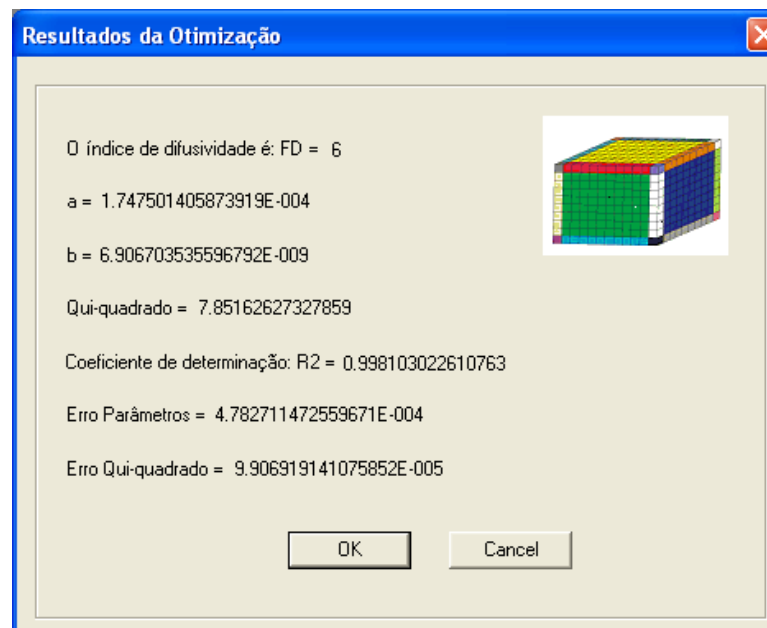


Figura 4.13: Caixa de diálogo com os resultados obtidos através de uma otimização.

Além da caixa de diálogo (Figura 4.13), um arquivo de texto através do qual são fornecidos os resultados já mencionados na referida caixa e a cinética do processo, fica disponibilizado para o usuário, como mostra a Figura 4.14.

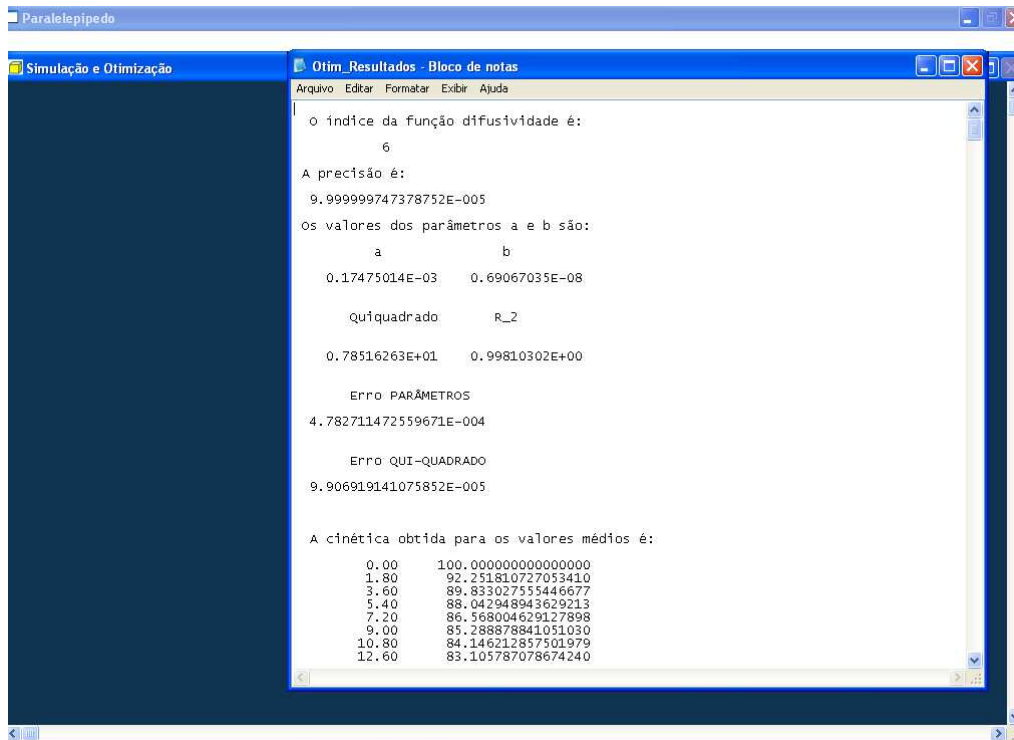


Figura 4.14: Arquivo com o resultado de uma otimização.

4.2. Validação do programa computacional

Para assegurar a eficiência do programa desenvolvido, a sua validação foi realizada através de testes de comparação com a solução analítica da equação de difusão tridimensional, testes de consistência, de coerência e de simetria. A validação do otimizador foi realizada considerando-se três precisões distintas, bem como, valores iniciais atribuídos significativamente diferentes. Os procedimentos adotados basearam-se em trabalhos encontrados na literatura (SILVA, 2007; FARIAS, 2011; SILVA C., 2012, SILVA, L., 2012, AIRES, 2015).

Para a realização dos referidos testes, foram feitas algumas considerações iniciais:

- ✓ O domínio em questão é isotrópico e homogêneo;

- ✓ A transferência de massa ocorre exclusivamente por difusão e em temperatura constante;
- ✓ A distribuição inicial da grandeza de interesse é uniforme em todo domínio;
- ✓ As difusões de água e sacarose são analisadas independentes uma da outra.

Todos os gráficos exibidos neste Capítulo foram obtidos através do programa “LAB Fit Curve Fitting Software” (Silva e Silva, 2009a).

4.2.1. Uso de soluções analíticas da equação de difusão tridimensional na validação do programa desenvolvido

Neste caso específico, a grandeza $\bar{\Phi}$ representa o valor médio da quantidade de água, \bar{QA} , ou da quantidade de sacarose \bar{QS} ; Γ^Φ é a difusividade efetiva de água (D_A) ou de sacarose (D_S), dependendo do contexto.

Para a validação do código computacional por meio de soluções analíticas, foram utilizados os dados obtidos por Silva et al. (2014b), referentes a quantidade de água e de sacarose na desidratação osmótica de goiaba, cortada em forma de paralelepípedo, para a condição experimental de 40 °Brix de concentração do meio osmótico e temperatura de operação de 30 °C, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros físicos usados na simulação da solução numérica.

L_x (metros)	L_y (metros)	L_z (metros)	\bar{QA}_0 (%)	\bar{QA}_{eq} (%)	\bar{QS}_0 (%)	\bar{QS}_{eq} (%)
$9,56 \times 10^{-3}$	$20,03 \times 10^{-3}$	$30,29 \times 10^{-3}$	100	33,8	0	72

Na Tabela 4.1, L_x , L_y e L_z representam as dimensões do paralelepípedo, dadas em metros; \bar{QA}_0 é a quantidade média inicial de água; \bar{QA}_{eq} é a quantidade média de água de equilíbrio; \bar{QS}_0 é a quantidade média inicial de sacarose e \bar{QS}_{eq} é a quantidade de sacarose de equilíbrio.

Utilizando-se o *software* “xyExtract Graph Digitizer”, desenvolvido por Silva e Silva (2011), foram extraídos dados do gráfico que ilustra a quantidade média de água, em percentual, obtidos por Silva et al.(2014b) na desidratação osmótica de goiaba. A Tabela 4.2 mostra os referidos valores.

Tabela 4.2: Dados referentes à quantidade de água em função do tempo (SILVA et al., 2014b).

t (min)	\overline{QA} (%)
$0,198359 \times 10^2$	$0,895865 \times 10^2$
$0,350461 \times 10^2$	$0,836360 \times 10^2$
$0,667189 \times 10^2$	$0,794210 \times 10^2$
$0,983109 \times 10^2$	$0,747101 \times 10^2$
$0,124590 \times 10^3$	$0,704951 \times 10^2$
$0,150749 \times 10^3$	$0,655363 \times 10^2$
$0,188340 \times 10^3$	$0,645446 \times 10^2$
$0,214054 \times 10^3$	$0,568584 \times 10^2$
$0,246050 \times 10^3$	$0,546270 \times 10^2$
$0,143461 \times 10^4$	$0,340479 \times 10^2$

O mesmo procedimento foi adotado para se obter os dados referentes ao ganho de sacarose. A Tabela 4.3 revela estes valores.

Para a simulação do processo, os valores ilustrados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, foram inseridos no *software* “Prescribed Adsorption-Desorption 2.2”, desenvolvido por Silva e Silva (2009b). Este programa simula o processo utilizando soluções analíticas da equação de difusão, com condição de contorno de primeiro tipo, além de estimar os parâmetros de processo por otimização.

Tabela 4.3: Dados da quantidade média de sacarose em função do tempo.

t (min)	\overline{QS} (%)
$0,652032 \times 10$	$0,148337 \times 10^2$
$0,290596 \times 10^2$	$0,288604 \times 10^2$
$0,618221 \times 10^2$	$0,358777 \times 10^2$
$0,889498 \times 10^2$	$0,393884 \times 10^2$
$0,116198 \times 10^3$	$0,445171 \times 10^2$
$0,148900 \times 10^3$	$0,507255 \times 10^2$
$0,181643 \times 10^3$	$0,574732 \times 10^2$
$0,214124 \times 10^3$	$0,607152 \times 10^2$
$0,235878 \times 10^3$	$0,642249 \times 10^2$
$0,144006 \times 10^4$	$0,722707 \times 10^2$

O valor da difusividade efetiva de massa de água, obtido pelo mencionado programa, foi $D_A = 1,405 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,98$ e $\chi^2 = 82,9$.

Foram encontrados também os valores médios da distribuição da quantidade de água em função do tempo t, que resultaram no gráfico da Figura 4.15.

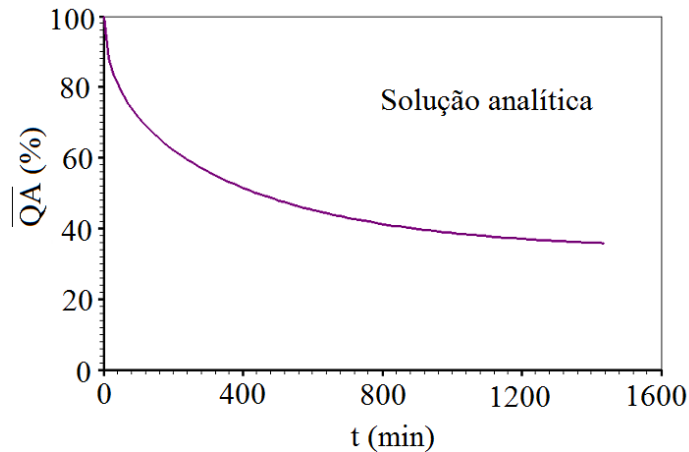


Figura 4.15: Cinética da quantidade média de água obtida por simulação através da solução analítica.

Em seguida, os valores mostrados na Tabela 4.1, juntamente com o valor de D_A , foram inseridos no programa computacional desenvolvido. Para este teste foi utilizada uma malha tridimensional uniforme e a discretização foi realizada dividindo-se o domínio em

30×30×30 volumes de controle, com 4014 passos no tempo e um intervalo de tempo $\Delta t = 0,358$ min. A Figura 4.16 ilustra o resultado da simulação.

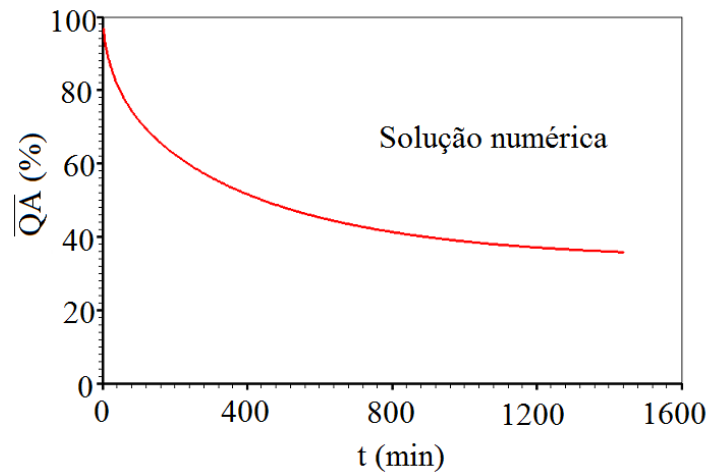


Figura 4.16: Cinética da quantidade média de água obtida por simulação através do programa desenvolvido.

A superposição dos gráficos confirma a concordância entre as soluções analítica e numérica, como mostra a Figura 4.17.

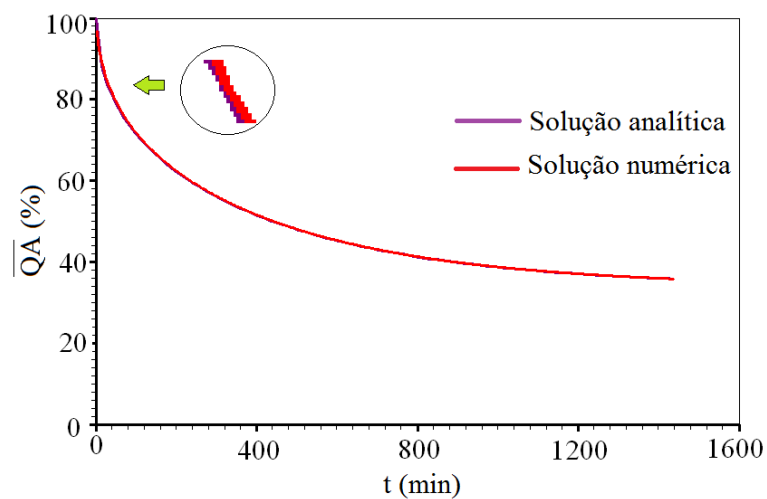


Figura 4.17: Superposição dos valores médios da quantidade de água obtidos através das soluções analítica e numérica.

Devido à impossibilidade de se apresentar todos os valores da cinética da quantidade média de água obtidos através das soluções analítica e numérica, são destacados apenas oito

instantes distintos, escolhidos de forma aleatória. A Tabela 4.4 apresenta os referidos valores médios, bem como, o erro relativo.

Tabela 4.4: Valores médios da quantidade média de água obtidos através das soluções analítica e numérica.

t (min)	\overline{QA} (%) Analítica	\overline{QA} (%) Numérica	Erro relativo (%)
14,34610	88,11045	89,518718	1,598
100,4227	71,40977	71,789323	0,53
200,8454	62,13397	62,345266	0,341
258,2298	58,35793	58,525279	0,286
875,1121	40,15593	40,192819	0,092
1032,919	38,37618	38,406772	0,0797
1319,841	36,33397	36,351766	0,0489
1405,918	35,92450	35,939687	0,0423

Os resultados exibidos através da Figura 4.17 e da Tabela 4.4, atestam a concordância entre as soluções analítica e numérica. Dos instantes selecionados aleatoriamente, o maior valor encontrado para o erro relativo foi 1,598%.

Procedendo-se de forma análoga, a quantidade média de sacarose foi analisada e os seus valores médios foram obtidos. A Figura 4.18 ilustra os gráficos das referidas cinéticas.

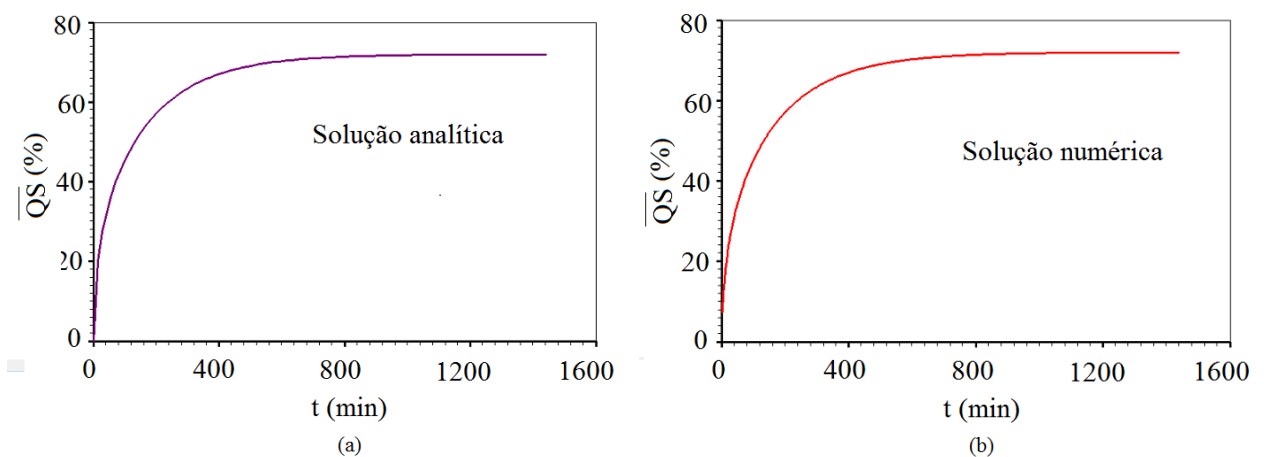


Figura 4.18: Valores médios da quantidade de sacarose obtidos por meio da: (a) solução analítica; (b) solução numérica.

A difusividade efetiva de sacarose encontrada foi $D_S = 3,617 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,978$ e $\chi^2 = 63,22$.

Plotando-se os dois gráficos em um mesmo sistema de eixos percebe-se que há uma nítida superposição, como mostra a Figura 4.19.

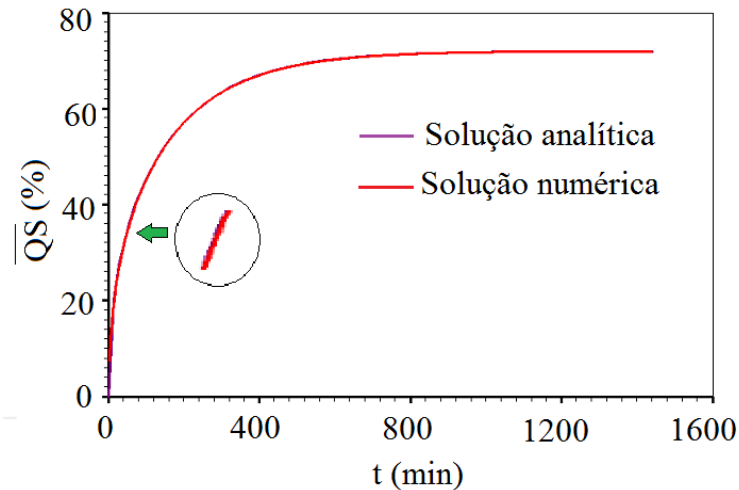


Figura 4.19: Superposição dos gráficos dos valores médios da quantidade de sacarose.

A Tabela 4.5 mostra os valores médios encontrados para a quantidade de sacarose, obtidos através das soluções analítica e numérica, em oito instantes distintos, escolhidos de forma aleatória.

Tabela 4.5: Valores médios da quantidade de sacarose obtidos através das soluções analítica e numérica.

t (min)	\overline{QS} (%) Analítica	\overline{QS} (%) Numérica	Erro relativo (%)
28,80	27,31177	26,43966	3,19
187,21	55,99155	55,87959	0,199
388,82	66,68246	66,64033	0,058
720,03	71,07189	71,06197	0,014
950,43	71,72084	71,71723	0,005
1065,64	71,84667	71,84451	0,003
1281,65	71,95008	71,94926	0,001
1440,06	71,97806	71,97767	0,0005

A Figura 4.19 e a Tabela 4.5, mostram boa consonância entre os resultados obtidos através das soluções analítica e numérica, consistindo em um importante meio de validação do programa desenvolvido.

4.2.2. Testes de consistência para a solução numérica

O domínio computacional para estes testes é um paralelepípedo cujas arestas L_x , L_y e L_z foram divididas em sete, cinco e três volumes de controle, respectivamente, como indica a Figura 4.20, que não está em escala.

A consistência do programa desenvolvido foi analisada considerando-se a cinética da grandeza de interesse em determinados volumes de controle simetricamente localizados. Tendo em vista que a condição de contorno é a mesma em todas as faces e considerando-se a regularidade da geometria juntamente com a simetria inerente ao paralelepípedo, espera-se que haja uma correspondência entre os resultados obtidos nestes volumes de controle.

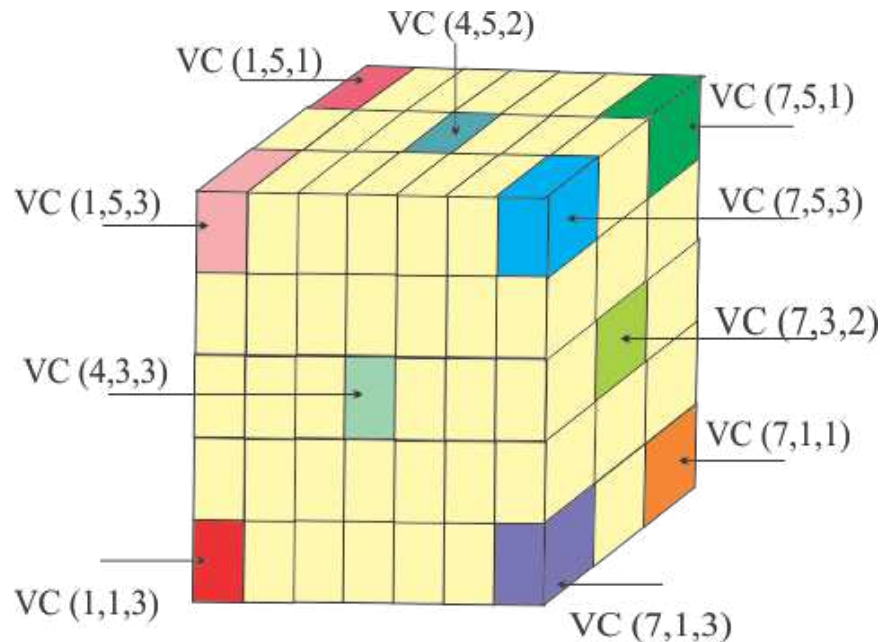


Figura 4.20: Paralelepípedo discretizado – Malha dividida em 7 x 5 x 3 volumes de controle.

Para alcançar o objetivo, o programa foi executado em duas etapas: considerando-se os parâmetros físicos constantes e variáveis.

4.2.2.1. Teste de consistência: parâmetros constantes

Os parâmetros físicos e as dimensões do sólido foram extraídas do artigo de Silva et al. (2014a) sobre desidratação osmótica de abacaxi, expostos na Tabela 4.6. A simulação foi realizada considerando-se um tempo total de 6 h, com 5000 passos no tempo e supondo-se condição de contorno de primeiro tipo.

Tabela 4.6: Parâmetros físicos usados na simulação para o teste de consistência.

L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)	\bar{X}_0 (g/g)	\bar{X}_{eq} (g/g)	D_A (m ² /h)
15×10^{-3}	15×10^{-3}	15×10^{-3}	5,67	2,35	$2,656 \times 10^{-6}$

Na Tabela 4.6, \bar{X}_0 é o teor de umidade médio inicial, \bar{X}_{eq} é o teor médio de umidade de equilíbrio e D_A representa a difusividade efetiva de água.

Inicialmente foram considerados os volumes de controle localizados nos vértices inferiores, nomeados de acordo com a Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Volumes de controle localizados nos vértices inferiores do paralelepípedo.

Face	Volume de Controle
Sul – atrás – oeste	VC (1,1,1)
Sul – atrás – leste	VC (7,1,1)
Sul – frente – oeste	VC (1,1,3)
Sul – frente – leste	VC (7,1,3)

A Figura 4.21 ilustra os resultados da simulação para cada volume de controle.

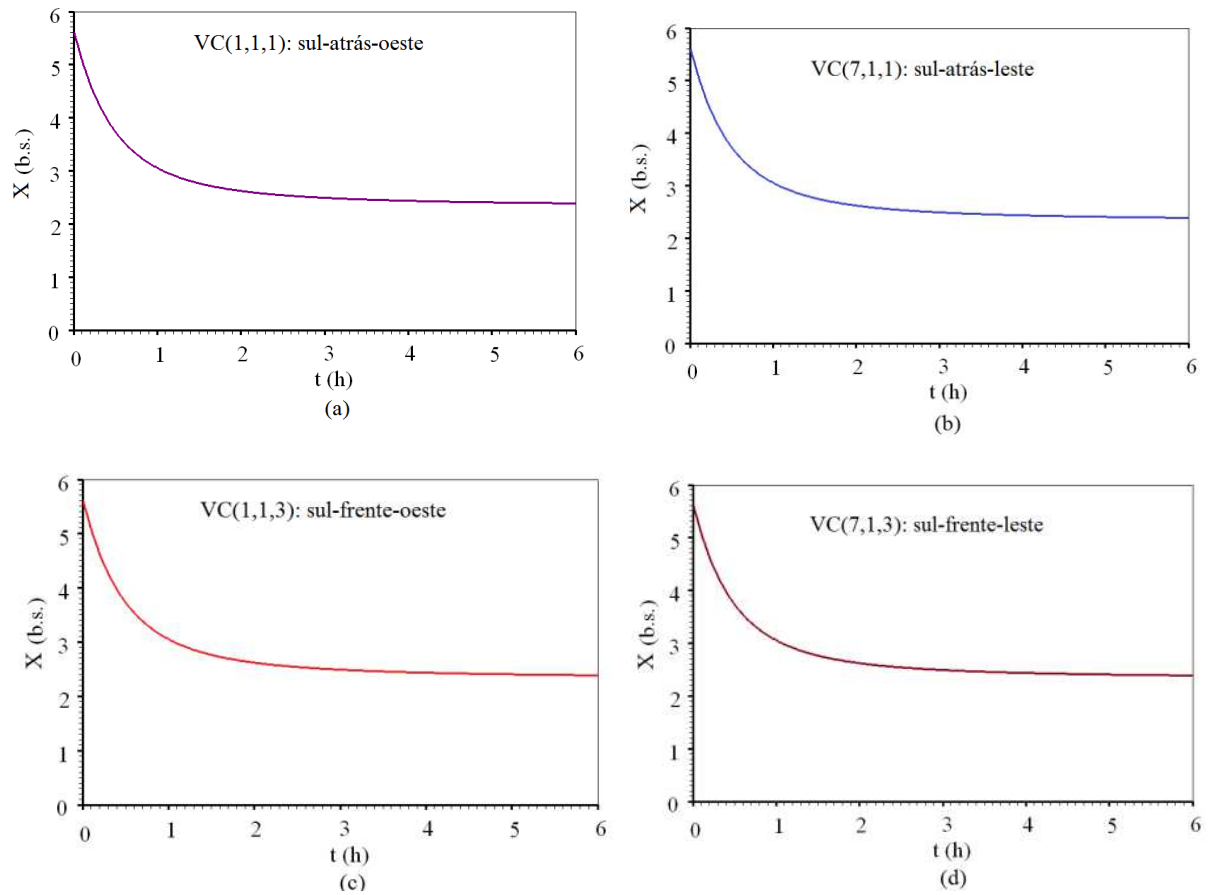


Figura 4.21: Cinética do teor de umidade X nos volumes de controle: (a) VC (1,1,1); (b) VC (7,1,1); (c) VC (1,1,3); (d) VC (7,1,3).

Plotando-se estes valores em um mesmo sistema de eixos obtém-se uma boa concordância entre os gráficos mostrados nas Figuras 4.21, como mostra a Figura 4.22.

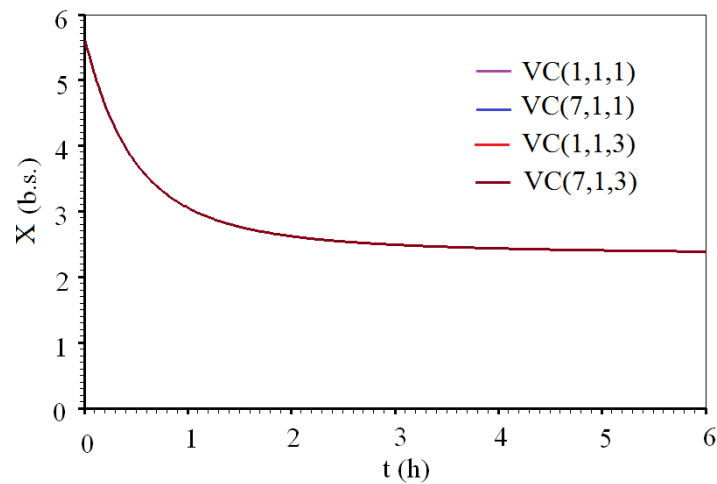


Figura 4.22: Superposição dos transientes do teor de umidade nos volumes de controle localizados nos vértices inferiores.

Tendo em vista a inviabilidade de se apresentar todos os valores do teor de umidade calculados nos 5000 instantes através do programa, são destacados apenas seis momentos distintos, escolhidos de forma aleatória. Estes valores estão na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Cinética do teor de umidade X nos volumes de controle dos vértices inferiores em seis instantes distintos.

Tempo t (h)	X (g/g) VC (1,1,1)	X (g/g) VC (1,1,3)	X (g/g) VC (7,1,1)	X (g/g) VC (7,1,3)
$3,6 \times 10^{-3}$	5,64671	5,64671	5,64671	5,64671
$2,4 \times 10^{-2}$	5,51847	5,51847	5,51847	5,51847
1,6404	2,71420	2,71420	2,71420	2,71420
2,4960	2,54141	2,54141	2,54141	2,54141
4,5504	2,41717	2,41717	2,41717	2,41717
6,0	2,38781	2,38781	2,38781	2,38781

A Figura 4.22 e a Tabela 4.8 mostram uma perfeita concordância entre os valores obtidos para o perfil de umidade nos vértices inferiores do paralelepípedo.

O mesmo procedimento foi adotado para os vértices superiores, denotados de acordo com a Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Volumes de controle localizados nos vértices superiores do paralelepípedo.

Face	Volume de Controle
Norte – atrás – oeste	VC (1,5,1)
Norte – atrás – leste	VC (7,5,1)
Norte – frente – oeste	VC (1,5,3)
Norte – frente – leste	VC (7,5,3)

Os gráficos de cada cinética estão expostos na Figura 4.23.

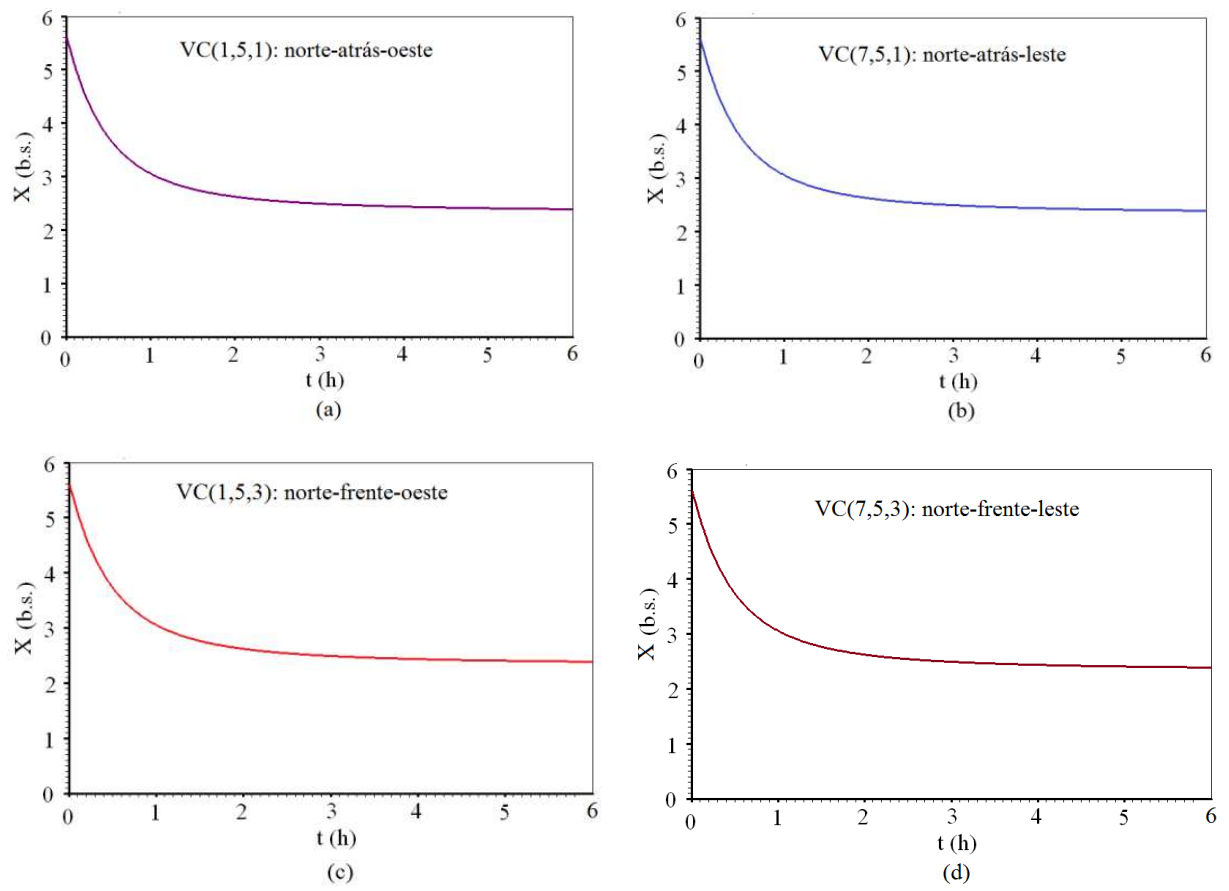


Figura 4.23: Cinéticas do teor de unidade X nos volumes de controle: (a) VC(1,5,1); (b) VC(7,5,1); (c) VC(1,5,3); (d) VC(7,5,3).

A Figura 4.24 ilustra a superposição dos gráficos apresentados na Figura 4.23. Percebe-se uma boa uniformidade entre os mesmos.

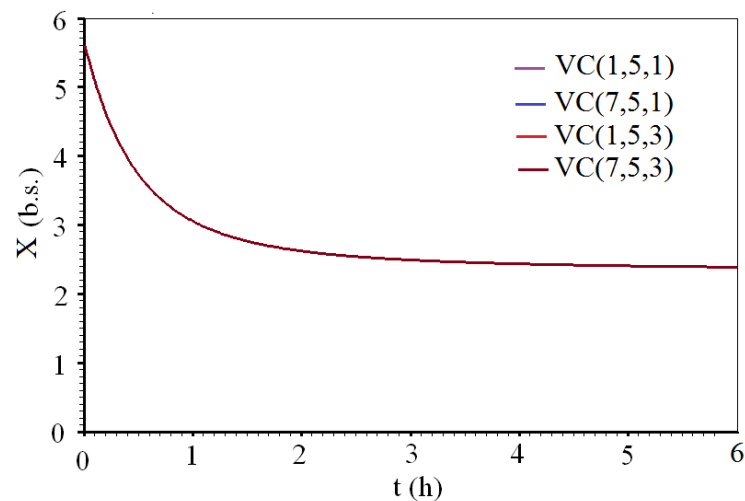


Figura 4.24: Superposição das cinéticas do teor de unidade nos volumes de controle localizados nos vértices superiores.

A Tabela 4.10 apresenta os valores obtidos para X nos volumes de controle localizados nos vértices superiores, em seis instantes distintos escolhidos aleatoriamente.

Tabela 4.10: Valores de X nos volumes de controle dos vértices superiores em seis instantes.

Tempo t	X	X	X	X
(h)	VC (1,5,1)	VC (7,5,1)	VC (1,5,3)	VC (7,5,3)
$3,6 \times 10^{-3}$	5,646713	5,646713	5,64671	5,64671
$2,4 \times 10^{-2}$	5,51847	5,51847	5,51847	5,51847
1,6404	2,714205	2,714205	2,714205	2,714205
2,4960	2,541410	2,541410	2,541410	2,541410
4,5504	2,417171	2,417171	2,417171	2,417171
6,0	2,387811	2,387811	2,387811	2,387811

Como pode ser observado pela Figura 4.24 e a Tabela 4.10, as cinéticas do teor de umidade X para os volumes de controle localizados nos vértices superiores apresentaram uma perfeita concordância.

4.2.2.2. Teste de consistência: parâmetros variáveis

Para este caso, foram considerados os parâmetros físicos obtidos através da desidratação osmótica de goiaba, em solução de sacarose a 50 °Brix de concentração e 40 °C de temperatura (SILVA et al., 2014c). A Tabela 4.11 mostra os parâmetros de processo, na qual QS_0 representa a quantidade de sacarose inicial, \overline{QS}_{eq} o seu valor de equilíbrio, L_{x_0} , L_{y_0} e L_{z_0} , são as dimensões iniciais dos pedaços de goiaba, cortados em forma de paralelepípedo.

Tabela 4.11: Parâmetros físicos obtidos na DO de goiaba (SILVA et al., 2014c).

L_{x_0} (m)	L_{y_0} (m)	L_{z_0} (m)	QS_0 (%)	\overline{QS}_{eq} (%)
$9,56 \times 10^{-3}$	$20,03 \times 10^{-3}$	$30,29 \times 10^{-3}$	0	74,2

A difusividade efetiva de massa de sacarose foi considerada variável e dependente da quantidade de sacarose local. Sua expressão foi obtida por meio de otimização e é representada pela Equação (4.1).

$$D_S = 2,39 \times 10^{-7} \cdot \exp(-0,2\sqrt{QS}) \quad (4.1)$$

No referido artigo, foi utilizada a solução numérica unidimensional para o paralelepípedo considerado como uma placa infinita. Neste contexto, as dimensões do paralelepípedo foram representadas por uma única expressão L, obtida por meio de ajuste de curvas, a qual representa a espessura da placa, como mostra a Equação (4.2).

$$L = L_x = -3,64 \times 10^{-5} \cdot \overline{QS} + 9,56 \times 10^{-3} \quad (4.2)$$

Normalizando a Equação (4.2), obtém-se a Equação (4.3).

$$\frac{L_x}{L_{x_0}} = -3,81 \times 10^{-3} \cdot \overline{QS} + 1,00 \quad (4.3)$$

Para este teste, foi suposto que as expressões normalizadas para as demais dimensões do paralelepípedo são iguais à Equação (4.3), como mostra a Equação (4.4).

$$\frac{L_y}{L_{y_0}} = \frac{L_z}{L_{z_0}} = -3,81 \times 10^{-3} \cdot \overline{QS} + 1,00 \quad (4.4)$$

Substituindo-se os valores das dimensões iniciais do sólido, mostradas na Tabela 4.11, na Equação (4.4), obtém-se as expressões para L_y e L_z , como funções da quantidade média de sacarose.

Portanto, as dimensões do paralelepípedo são representadas pelas Equações (4.5a – c).

$$L_x = -3,64 \times 10^{-5} \cdot \overline{QS} + 9,56 \times 10^{-3} \quad (4.5a)$$

$$L_y = -7,63 \times 10^{-5} \cdot \overline{QS} + 2,00 \times 10^{-2} \quad (4.5b)$$

$$L_z = -1,15 \times 10^{-4} \cdot \overline{QS} + 3,02 \times 10^{-2} \quad (4.5c)$$

Para assegurar a consistência do programa desenvolvido, foi analisado o ganho de sacarose nos volumes de controle localizados no centro de cada face, denotados segundo a Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Volumes de controle localizados no centro de cada face.

Face	Volume de Controle
Norte	VC (4, 5, 2)
Sul	VC (4, 1, 2)
Leste	VC (7, 3, 2)
Oeste	VC (1, 3, 2)
Frente	VC (4, 3, 3)
Atrás	VC (4, 3, 1)

Neste caso, a análise foi realizada aos pares: norte-sul, leste-oeste e frente-atrás, tendo em vista a simetria de suas posições.

Para os volumes de controle centrais das faces norte e sul, as cinéticas da quantidade de sacarose QS apresentaram uma nítida adequação, como pode ser comprovado através da Figura 4.25.

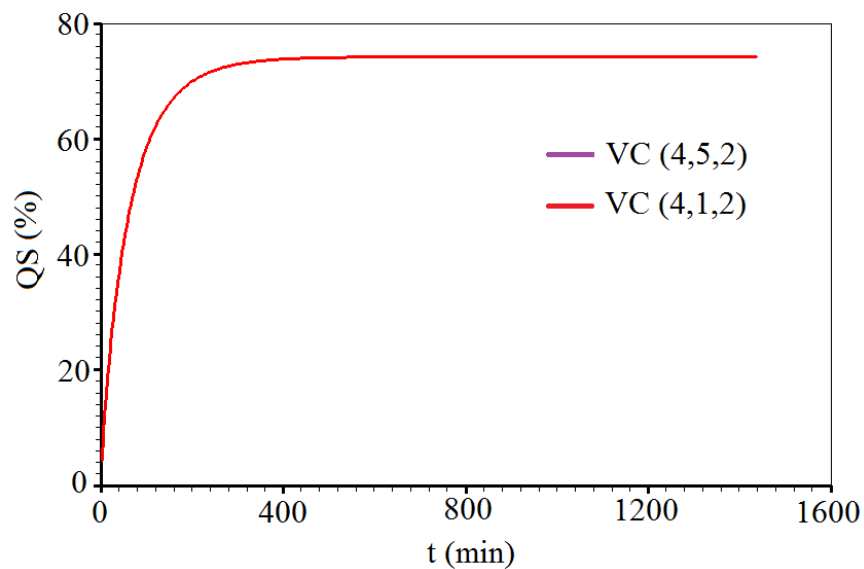


Figura 4.25: Superposição da quantidade de sacarose nos volumes de controle localizados no centro das faces norte e sul.

A Tabela 4.13 expõe os valores do ganho de sacarose em seis instantes distintos, escolhidos de forma aleatória.

Tabela 4.13: Quantidade de sacarose nos volumes de controle centrais das faces norte e sul.

Tempo t (min)	QS (%) VC (4, 5, 2)	QS (%) VC (4, 1, 2)
1,44	2,63723180	2,6372318
87,84	55,44253181	55,44253181
508,32	74,0866038	74,0866038
786,24	74,1953276	74,1953276
900,0	74,19873764	74,19873764
1440,0	74,19999752	74,19999752

Para os volumes de controle localizados nos centros das faces oeste e leste, a superposição dos gráficos que representam a cinética da quantidade de sacarose QS, é mostrada na Figura 4.26.

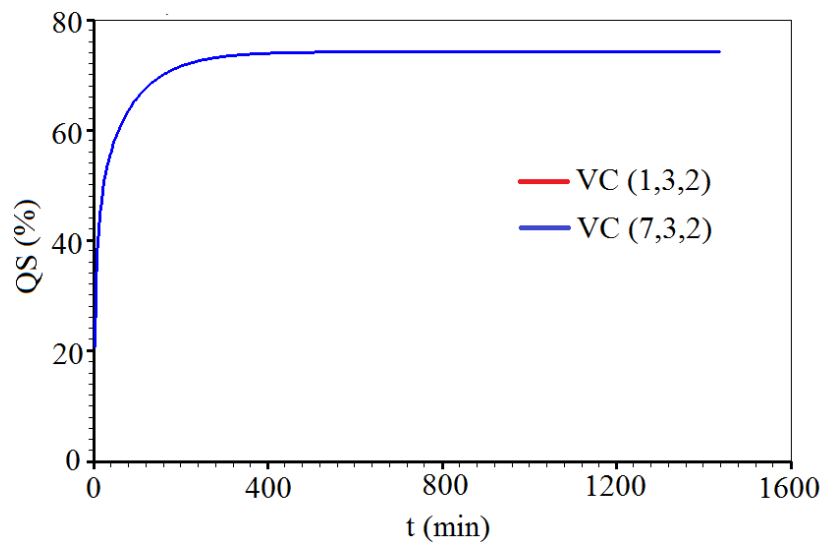


Figura 4.26: Superposição dos gráficos da quantidade de sacarose QS nos centros das faces oeste e leste.

A concordância dos valores obtidos é confirmada pela Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Quantidade de sacarose nos volumes de controle centrais das faces oeste e leste em seis instantes distintos.

Tempo t (min)	QS (%) VC (1, 3, 2)	QS (%) VC (7, 3, 2)
1,44	14,49800903	14,49800903
87,84	64,47843793	64,47843793
508,32	74,1192183	74,1192183
786,24	74,19663774	74,19663774
900,0	74,19909117	74,19909117
1440,0	74,19999821	74,19999821

A análise da cinética da quantidade de sacarose QS realizada nos volumes de controle centrais das faces frente e atrás, resultou nos gráficos ilustrados na Figura 4.27.

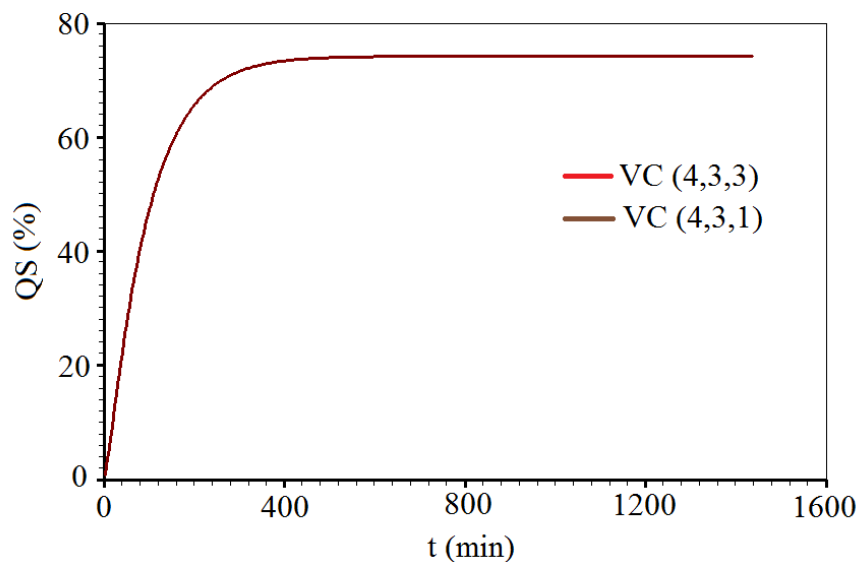


Figura 4.27: Superposição dos valores da quantidade de sacarose QS nos volumes de controle dos centros das faces atrás e frente.

Os valores de QS nestes volumes de controle também são concordantes e isto pode ser comprovado através da Tabela 4.15, que apresenta os referidos valores em seis instantes distintos.

Tabela 4.15: Quantidade de sacarose nos centros das faces atrás e frente em seis instantes distintos.

Tempo t (min)	QS (%)	QS (%)
	VC (4, 3, 1)	VC (4, 3, 3)
1,44	0,48624325	0,48624325
87,84	43,13475555	43,13475555
508,32	73,97466011	73,97466011
786,24	74,19154686	74,19154686
900,0	74,19777571	74,19777571
1440	74,19999589	74,19999589

Para complementar os testes de consistência, foram analisados os valores da quantidade de sacarose QS em dois volumes de controle localizados na parte interna do paralelepípedo, em posições simétricas em relação ao plano vertical que passa pelo centro do sólido. São eles: VC(3,4,2) e VC(5,4,2) . A superposição dos seus gráficos está ilustrada na Figura 4.28.

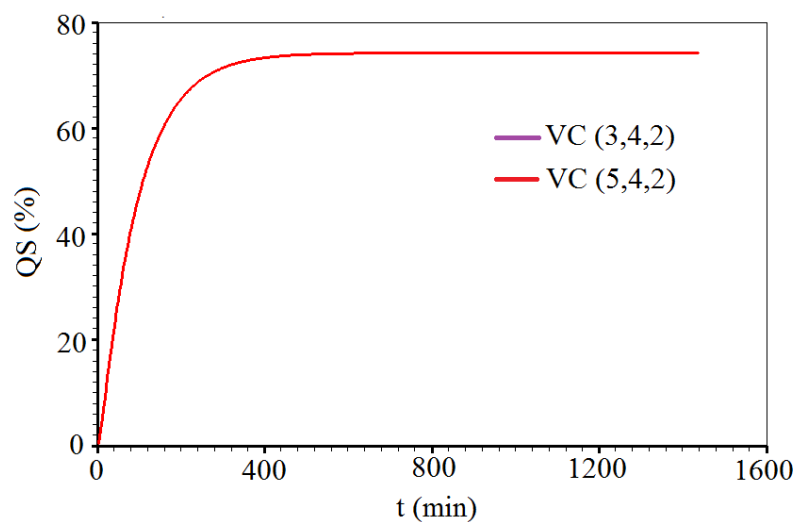


Figura 4.28: Superposição dos valores de QS nos volumes de controle VC(3,4,2) e VC(5,4,2).

A cinética da quantidade de sacarose foi analisada ao longo da simulação realizada pelo programa desenvolvido. São destacados apenas seis instantes diferentes, mostrados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Quantidade de sacarose nos VC(3,4,2) e VC(5,4,2) em seis instantes.

Tempo (min)	QS (%) VC (3, 4, 2)	QS (%) VC (5, 4, 2)
1,44	0,12730500	0,12730500
87,84	43,41979433	43,41979433
508,32	73,93463396	73,93463396
786,24	74,18898417	74,18898417
900,0	74,19702281	74,19702281
1440	74,19999415	74,19999415

A título de informação, foi observada a simulação da variação do volume V do paralelepípedo em função do valor médio do teor de sacarose, ao longo do processo, em que V , dado em m^3 , é obtido pela relação:

$$V = L_x \times L_y \times L_z \quad (4.6)$$

e L_x , L_y e L_z estão definidas nas Equações (4.5a – c).

A Figura 4.29 ilustra a variação volumétrica do paralelepípedo ao longo do processo.

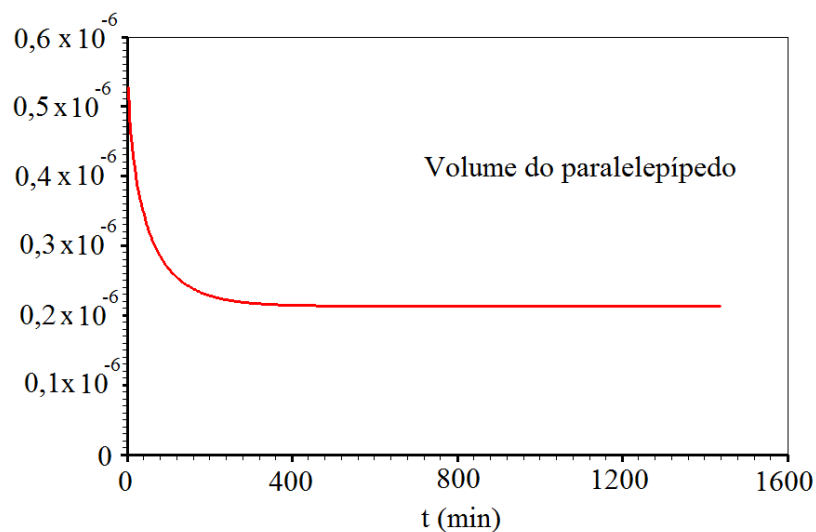


Figura 4.29: Volume do paralelepípedo obtido por simulação.

Observa-se que a variação volumétrica do paralelepípedo obtida através da simulação, é condizente com o encolhimento inerente ao processo de difusão.

A Tabela 4.17 destaca valores de V nos seis instantes usados durante este teste.

Tabela 4.17: Valores de V em seis instantes distintos.

Tempo (min)	V (m³)
1,44	$5,46304 \times 10^{-6}$
87,84	$2,77644 \times 10^{-6}$
508,32	$2,13480 \times 10^{-6}$
786,24	$2,13109 \times 10^{-6}$
900,0	$2,13098 \times 10^{-6}$
1440	$2,13094 \times 10^{-6}$

Diante do exposto, percebe-se que a cinética da quantidade de sacarose nos volumes de controle simetricamente localizados apresentou excelente concordância, como era esperado, devido às condições físicas semelhantes nestes volumes de controle e à simetria inerente ao paralelepípedo. Pode-se afirmar que o programa desenvolvido para a obtenção da solução numérica apresenta consistência satisfatória.

4.2.3. Teste de coerência para a solução numérica

Para verificar a coerência dos resultados referentes ao programa computacional, foram usados os dados do artigo de Silva et al. (2014a), presentes na Tabela 4.6. O domínio físico foi dividido $20 \times 20 \times 20$ volumes de controle.

A análise foi realizada em três volumes de controle específicos, nomeados de acordo com a Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Volumes de controle usados no teste de coerência.

Notação	Volume de Controle
1	VC (10, 10, 10)
2	VC (15, 10, 12)
3	VC (20, 12, 8)

O volume de controle 1 localiza-se mais próximo ao centro do paralelepípedo do que os demais; o volume 2 está em uma posição intermediária; o volume de controle 3, por sua vez, está inserido na face leste do sólido e, portanto, em contato com o meio externo.

Os valores do teor de umidade X obtidos através das simulações geraram os gráficos representados pela Figura 4.30.

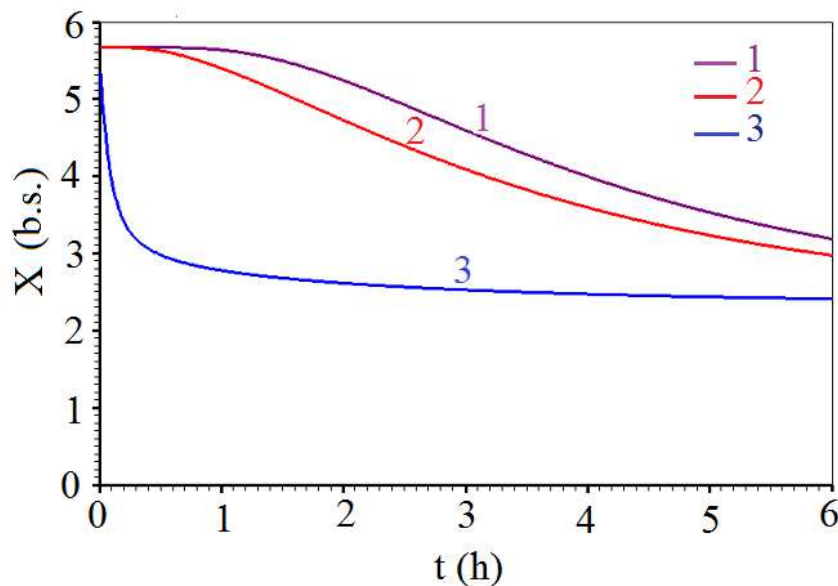


Figura 4.30: Comportamento do teor de umidade X nos volumes de controle 1, 2 e 3 .

Os resultados encontrados revelam que a perda de água é maior à medida que o volume de controle localiza-se mais próximo do meio externo. O volume de controle 2, que se situa em uma posição de transição em relação aos volumes 1 e 3, tem seu teor de umidade também com valores intermediários em relação aos outros dois.

A Tabela 4.19 mostra os valores do teor de umidade em seis instantes distintos, escolhidos aleatoriamente, nos três volumes de controle destacados.

Tabela 4.19: Valores de X nos volumes de controle 1, 2 e 3.

t (h)	1	2	3
	VC (10, 10, 10)	VC (15, 10, 12)	VC (20, 12, 8)
$7,2 \times 10^{-3}$	5,6700	5,6699	5,4570
0,6720	5,6657	5,5653	2,8849
1,8408	5,3298	4,8342	2,6320
3,1008	4,5284	4,0316	2,5199
4,9920	3,5320	3,2352	2,4355
6,0	3,1869	2,9742	2,4099

Diante dos resultados encontrados, pode-se afirmar que o programa apresenta uma coerência física adequada.

4.2.4. Teste de simetria

Como já relatado na Seção 3.1.8, é interessante fazer uso da simetria do paralelepípedo na elaboração do programa, uma vez que se pode reduzir o uso de memória e de tempo de execução. Para tal, o domínio físico original foi reduzido à oitava parte, como já mostrado nas Figuras 3.10 e 3.11.

Para este teste, os valores iniciais para os parâmetros físicos podem ser encontrados em Silva et al. (2014c), sobre desidratação osmótica de goiaba realizada a 50 °Brix e 40 °C, mostrados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20: Parâmetros físicos usados na simulação para o teste de simetria.

L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)	QA_0 (%)	$\overline{QA_{eq}}$ (%)
$9,56 \times 10^{-3}$	$20,03 \times 10^{-3}$	$30,29 \times 10^{-3}$	100	25

A difusividade efetiva de massa de água, em $m^2 \text{ min}^{-1}$, varia ao longo do fenômeno e depende da grandeza QA nos pontos nodais de acordo com a expressão:

$$D_A = 1,62 \times 10^{-8} \cosh(3,25 \times 10^{-4} \cdot QA^2) \quad (4.7)$$

A primeira simulação foi realizada com uma malha uniforme dividida em $20 \times 20 \times 20$ volumes de controle, considerando o fenômeno com tempo total de 1440 minutos, com 5000 passos no tempo, resultando em um intervalo $\Delta t = 0,288$ min.

O tempo de execução da simulação, neste caso, foi de 39,79 segundos. O resultado obtido encontra-se na Figura 4.31.

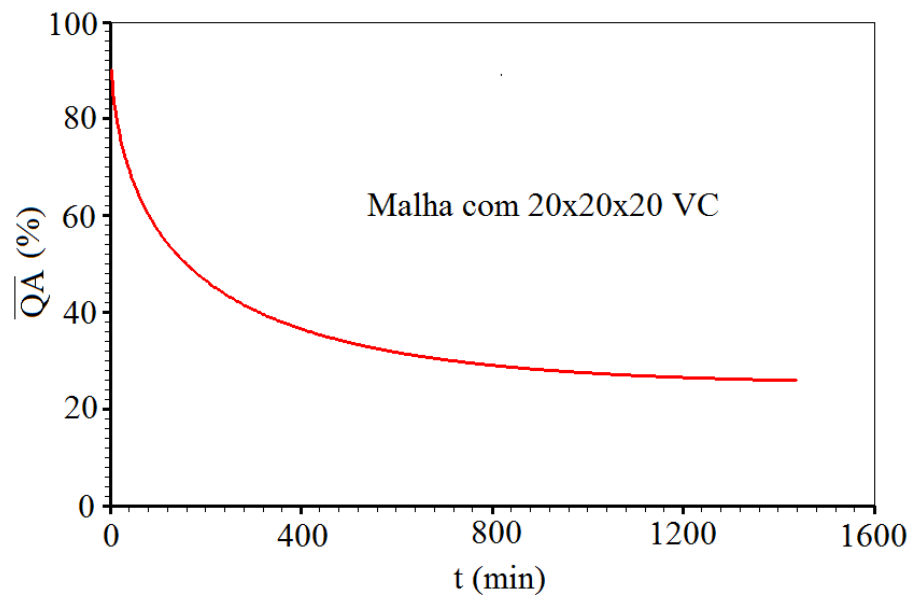


Figura 4.31: Cinética da quantidade de água obtida com o paralelepípedo inteiro.

Fazendo-se uso da simetria, a malha foi dividida em $10 \times 10 \times 10$ volumes de controle e as dimensões utilizadas foram $L_x / 2 = 4,78 \times 10^{-3}$ m, $L_y / 2 = 10,015 \times 10^{-3}$ m e $L_z / 2 = 15,145 \times 10^{-3}$ m. Foi considerado um domínio correspondente a um oitavo do domínio original, como foi descrito na Seção 3.1.8. Nos volumes de controle do novo domínio que fazem fronteira com as faces oeste, atrás e sul, o fluxo da grandeza de interesse foi considerado nulo. Os demais valores foram os mesmos da primeira simulação, ilustrados na Tabela 4.20.

O tempo de execução da segunda simulação foi de 5,29 segundos e o gráfico obtido para a quantidade de água está representado na Figura 4.32.

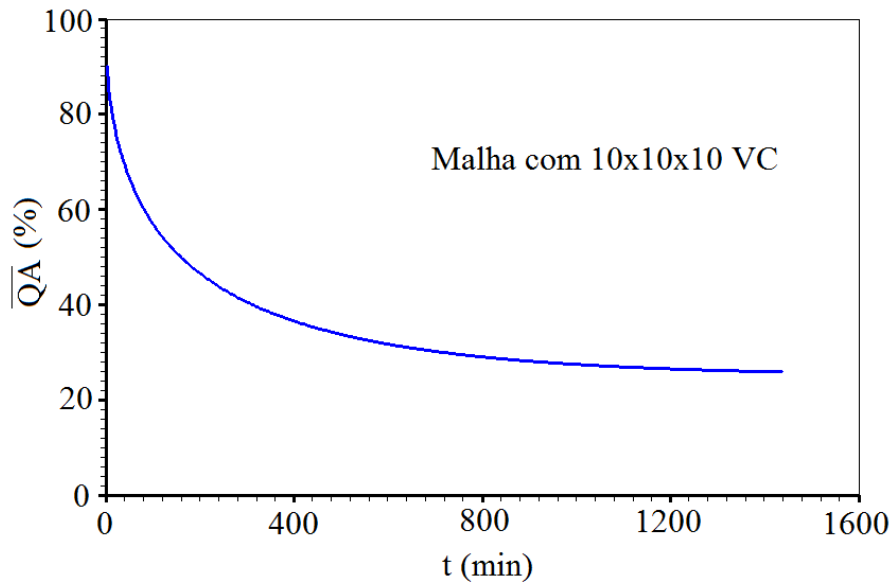


Figura 4.32: Cinética da quantidade de água obtida com o uso da simetria.

Observando-se os valores dos encontrados para a quantidade de água, percebe-se que existe concordância entre eles. Isto se reflete na ilustração dos dois gráficos quando colocados em um mesmo sistema de eixos, como mostra a Figura 4.33.

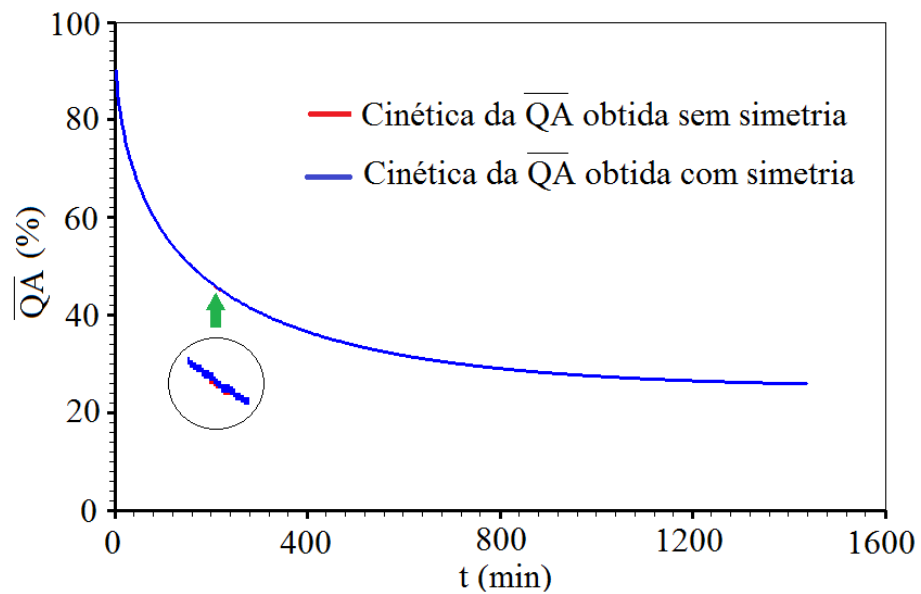


Figura 4.33: Superposição das cinéticas da quantidade de água obtidas sem e com o uso da simetria.

A Tabela 4.21 mostra os valores da quantidade de água em seis instantes distintos, escolhidos de forma aleatória, como também, apresenta o erro relativo referente a estes valores.

Tabela 4.21: Valores da quantidade média de água obtidos em seis instantes distintos.

t (min)	\overline{QA} (%) (Malha 20x20x20 VC)	\overline{QA} (%) (Malha 10x10x10 VC)	Erro relativo (%)
5,76	86,095124	86,096842	0,001995
187,20	47,524011	47,524471	0,000967
406,08	36,328892	36,329110	0,000600
865,44	28,404357	28,404427	0,000246
1012,32	27,367935	27,367985	0,000182
1440	25,839734	25,839753	0,000073

Comparando-se os resultados encontrados nas simulações e observando-se o erro relativo mostrado na Tabela 4.21, percebe-se que há uma nítida concordância entre os seus valores. Por outro lado, o tempo de execução da simulação com o uso da simetria é cerca de oito vezes menor, o que demonstra a economia de tempo de operação computacional.

4.2.5. Validação do otimizador

Para ratificar a eficiência do otimizador, foram realizados diversos testes, cujo roteiro foi inspirado no trabalho de Silva (2007).

Tendo em vista a necessidade de um conjunto de dados experimentais para a aplicação do otimizador, foram realizadas simulações de problemas difusivos adequados existentes na literatura, através do programa computacional desenvolvido para a obtenção da solução numérica da equação de difusão, fazendo o uso da simetria do paralelepípedo. Em cada simulação, foram gerados 2000 pontos da forma $(t_i, \overline{\Phi}_i)$. Deste total, foram escolhidos, aleatoriamente, 50 pontos para serem utilizados como dados experimentais hipotéticos no otimizador. O único critério adotado na escolha destes pontos foi um menor espaçamento entre eles nos instantes iniciais do processo, uma vez que já é sabido que é neste período onde ocorre uma maior transferência de massa. Quando os pontos experimentais são inseridos no

otimizador, atribuem-se valores iniciais aos parâmetros a e b da função difusividade, que no presente trabalho é da forma $f(\Phi, a, b)$. Os valores fornecidos pelo otimizador para estes parâmetros devem tornar a função f condizente com a expressão da difusividade utilizada na simulação que gerou os pontos experimentais hipotéticos. Caso a difusividade seja considerada constante, a sua expressão é do tipo $f(\Phi, a)$, ou seja, dependente apenas de um parâmetro.

Os testes foram divididos em duas etapas: considerando-se a difusividade constante e variável, como pode ser visto a seguir.

4.2.5.1. Difusividade constante

Para este caso, foram utilizados os dados referentes ao teor de sacarose local na desidratação osmótica de abacaxi, realizada em solução de sacarose com 70 °Brix de concentração e 30 °C de temperatura (SILVA et al., 2014a), como mostra a Tabela 4.22.

Tabela 4.22: Dados obtidos na DO de abacaxi.

$L_x / 2$ (m)	$L_y / 2$ (m)	$L_z / 2$ (m)	S_0 (g/g)	S_{eq} (g/g)	D_S (m ² min ⁻¹)
$7,5 \times 10^{-3}$	$7,5 \times 10^{-3}$	$7,5 \times 10^{-3}$	1,0	2,45	$3,48 \times 10^{-8}$

Na simulação realizada com os dados presentes na Tabela 4.22, foi considerada a malha uniforme, dividida em $15 \times 15 \times 15$ volumes de controle (o que equivale a $30 \times 30 \times 30$ volumes de controle no programa sem simetria), com 2000 passos no tempo, durante 360 minutos.

A Tabela 4.23 mostra os 50 pontos escolhidos como pontos experimentais fictícios. Os referidos pontos foram inseridos como pontos experimentais no código computacional composto pelo otimizador. Foram estabelecidas três precisões distintas que geraram três simulações, onde foram adotadas a mesma malha ($15 \times 15 \times 15$ volumes de controle) e o mesmo número de estepes de tempo (2000) da etapa anterior. O valor inicial para a difusividade de massa de sacarose foi considerado $D_{S_0} = 7,2 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$.

Tabela 4.23: Pontos escolhidos aleatoriamente da cinética do ganho de sacarose na simulação da DO de abacaxi.

t (min)	\bar{S} (g/g)	t (min)	\bar{S} (g/g)	t (min)	\bar{S} (g/g)
0,00	1,000000000000	38,70	1,628018936544	194,58	2,121646190824
0,30	1,026802466525	43,20	1,657433696032	206,46	2,140338327934
0,72	1,051004935494	48,06	1,686754734789	211,50	2,147889253315
1,44	1,093025004269	52,74	1,712947287496	221,04	2,161606277371
2,88	1,158624865046	57,96	1,740135078246	235,44	2,180986020997
3,42	1,178727200171	62,10	1,760368612256	250,02	2,199130263209
4,50	1,213812615255	67,86	1,786805993261	266,40	2,217919128372
5,76	1,248364410109	73,26	1,809990151156	272,88	2,224923581074
7,56	1,289659955245	84,06	1,852399894281	280,98	2,233359613209
10,08	1,337256526580	99,72	1,906262841978	292,68	2,244951465884
12,78	1,379893029366	110,52	1,939175794189	306,90	2,258158316325
15,84	1,421381921080	118,44	1,961478927343	194,58	2,121646190824
18,90	1,457771456056	127,80	1,986086215943	206,46	2,140338327934
20,70	1,477344990771	138,06	2,011127100219	211,50	2,147889253315
26,10	1,529861406011	156,60	2,051975064920	221,04	2,161606277373
30,78	1,569586738543	164,34	2,067565712840	235,44	2,180986020997
33,66	1,591959084981	183,78	2,103476140117		

A Tabela 4.24 mostra os resultados obtidos nas três simulações realizadas.

Tabela 4.24: Parâmetros obtidos nas simulações realizadas com o otimizador acoplado à solução numérica da equação de difusão tridimensional.

Precisão	$D_S \times 10^8$ (m²min⁻¹)	R²	χ^2	Erro (%)
1×10^{-4}	3,4800717473	0,9999999995537	$1,7099 \times 10^{-10}$	$2,062 \times 10^{-3}$
1×10^{-5}	3,4799961500	0,9999999999986	$4,1311 \times 10^{-12}$	$1,106 \times 10^{-4}$
1×10^{-6}	3,4800001654	0,9999999999987	$3,2122 \times 10^{-14}$	$4,755 \times 10^{-6}$

Observando-se os valores da Tabela 4.24, percebe-se que à medida que a precisão é aumentada, os indicadores estatísticos melhoram e o erro calculado em relação à difusividade mostrada na Tabela 4.22, decresce.

A Figura 4.34 mostra a superposição dos gráficos utilizando-se os pontos experimentais fictícios e os simulados através do otimizador, com a precisão 1×10^{-4} .

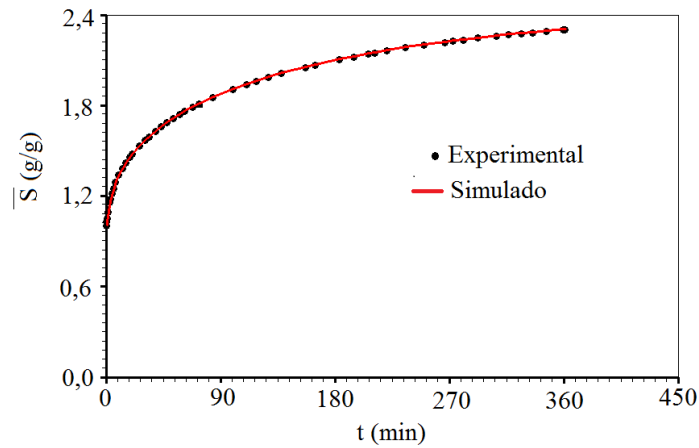


Figura 4.34: Superposição dos gráficos das cinéticas obtidas através dos pontos experimentais e os resultados simulados pelo otimizador.

A Figura 4.34 revela uma nítida superposição entre os gráficos. Vale salientar que os valores simulados foram obtidos com a menor precisão, cujos indicadores estatísticos foram menos favoráveis que as demais precisões avaliadas, atestando a concordância entre os resultados encontrados.

Objetivando complementar este teste, foi atribuído um valor inicial para a difusividade de $D_{S_0} = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$, isto é, superior na ordem de 10.000 vezes em relação ao valor atribuído anteriormente. A Tabela 4.25 mostra os resultados encontrados.

Tabela 4.25: Parâmetros obtidos pelo otimizador com valor inicial $D_{S_0} = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$.

Precisão	$D_S \times 10^8 \text{ (m}^2 \text{ min}^{-1})$	R^2	χ^2	Erro (%)
1×10^{-4}	3,4799813781	0,9999999999848	$9,6651 \times 10^{-11}$	$5,351 \times 10^{-4}$

Os resultados mostrados nas Tabelas 4.24 e 4.25 demonstram que os valores encontrados para a difusividade são coerentes, independente dos parâmetros iniciais atribuídos.

Neste sentido, foi realizado mais um teste, baseado no artigo de Silva et al. (2012), sobre a absorção de água em materiais compósitos. Neste trabalho, os autores utilizaram a solução numérica unidimensional da equação de difusão considerando-se a difusividade variável. Os mesmos dados iniciais (materiais compósitos) já tinham sido utilizados na pesquisa de Silva et al. (2011). Na ocasião, os autores fizeram uma comparação dos resultados encontrados através da solução analítica da equação de difusão utilizando-se diferentes geometrias. Em Silva et al. (2012) foi realizada uma validação do otimizador desenvolvido por Silva (2007), considerando-se a difusividade constante e utilizando-se os resultados obtidos em

Silva et al. (2011) com a geometria unidimensional, com valores iniciais significativamente distintos. A Tabela 4.26 mostra os parâmetros utilizados na validação, obtidos de Silva et al. (2012).

Tabela 4.26: Parâmetros obtidos na absorção de água de materiais compósitos.

$L_x / 2$ (m)	$L_y / 2$ (m)	$L_z / 2$ (m)	X_0	X_{eq}	D_A (m^2h^{-1})
$1,41 \times 10^{-3}$	$10,0 \times 10^{-3}$	$10,0 \times 10^{-3}$	0,0	1,0	$7,433 \times 10^{-9}$

Nesta validação, foram atribuídos os valores iniciais para a difusividade, dadas em m^2h^{-1} : 1×10^{-11} , 5×10^{-11} , 1×10^{-10} , 5×10^{-10} , 1×10^{-9} , 5×10^{-9} e 1×10^{-8} . Segundo os autores, o otimizador forneceu, em todos os casos, o valor de $D_A = 7,433 \times 10^{-9} m^2h^{-1}$, ou seja, condizente com o valor que consta na Tabela 4.26.

Utilizando-se os dados da Tabela 4.26, foi realizada uma simulação numérica com $10 \times 20 \times 20$ volumes de controle, por 1249 horas. Da cinética obtida com 2000 pontos, foram escolhidos 50 pontos, aleatoriamente, como mostra a Tabela 4.27.

Tabela 4.27: Pontos escolhidos aleatoriamente usados como pontos experimentais hipotéticos na absorção de água em materiais compósitos, com difusividade constante.

t (h)	\bar{X}	t (h)	\bar{X}	t (h)	\bar{X}
0,0000	0,00000	197,9665	0,901245	710,0565	0,9993391
0,6245	0,03694	229,8160	0,92809	745,0285	0,9995287
2,4980	0,10830	251,0490	0,94175	766,2615	0,9996161
8,7430	0,23024	282,2740	0,95723	800,6090	0,9997244
10,6165	0,25594	306,6295	0,96636	886,7900	0,9998800
14,9880	0,30715	330,9850	0,97353	908,6475	0,99990276
21,8575	0,37195	374,7000	0,982764	960,4810	0,99994095
30,6005	0,43812	400,3045	0,98659	988,5835	0,99995493
40,5925	0,50026	420,9130	0,98903	1000,4490	0,9999598
51,2090	0,55598	468,3750	0,99310	1030,4250	0,9999699
79,3115	0,67070	493,3550	0,99459	1063,5235	0,9999781
90,5525	0,70699	510,2165	0,99541	1127,2225	0,9999881
102,4180	0,74072	556,4295	0,99707	1166,5660	0,9999918
118,0305	0,77901	584,5320	0,99777	1204,6605	0,99999430
134,8920	0,81382	609,5120	0,99825	1220,2730	0,99999509
150,5045	0,84101	655,1005	0,99888	1249,000	0,99999627
160,4965	0,85624	688,8235	0,99919		

Os pontos da Tabela 4.27 foram inseridos no otimizador como pontos experimentais, com a precisão de 1×10^{-4} . Os valores iniciais para a difusividade foram os mesmos utilizados em Silva et al.(2012). A Tabela 4.28 mostra os resultados obtidos.

Tabela 4.28: Parâmetros obtidos pelo otimizador para cada valor inicial atribuído.

Valor inicial	$D_A \times 10^9 \text{ (m}^2\text{h}^{-1}\text{)}$	R^2	χ^2	Erro (%)
1×10^{-11}	7,433025294	0,9999999999802	$1,02567 \times 10^{-12}$	$3,403 \times 10^{-4}$
5×10^{-11}	7,432852985	0,9999999969005	$3,33419 \times 10^{-10}$	$1,978 \times 10^{-3}$
1×10^{-10}	7,433012532	0,9999999999988	$1,47165 \times 10^{-12}$	$1,686 \times 10^{-4}$
5×10^{-10}	7,432963931	0,999999999195	$2,00691 \times 10^{-11}$	$4,852 \times 10^{-4}$
1×10^{-9}	7,433034292	0,999999999324	$7,03201 \times 10^{-12}$	$4,613 \times 10^{-4}$
1×10^{-8}	7,433061266	0,999999996182	$4,70046 \times 10^{-13}$	$8,242 \times 10^{-4}$

Observando-se a Tabela 4.28, percebe-se que os resultados estatísticos menos favoráveis ocorreram para o valor inicial 5×10^{-11} . A Figura 4.35 mostra a superposição dos gráficos obtidos pelos valores experimentais fictícios e os simulados, para este valor inicial.

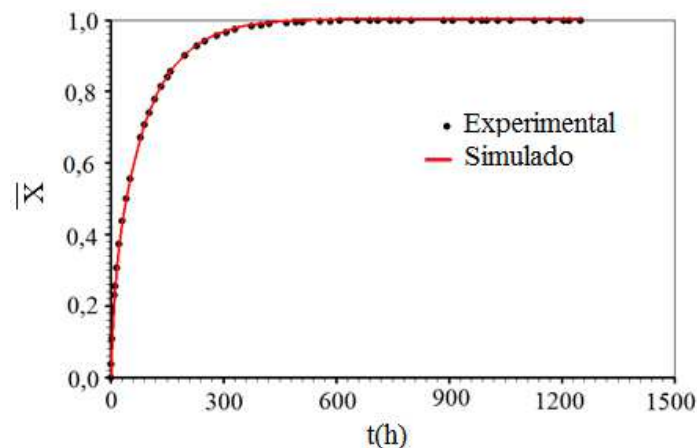


Figura 4.35: Superposição entre os gráficos obtidos através dos pontos experimentais e os resultados simulados na absorção de água em materiais compósitos, com difusividade constante.

A Figura 4.35 mostra uma boa concordância entre os valores experimentais e simulados, apesar da simulação ter sido feita com o valor inicial que forneceu os indicadores estatísticos menos favoráveis.

4.2.5.2. Difusividade variável

Para a difusividade variável, foi considerado o trabalho de Silva et al. (2012) sobre o estudo da absorção de água em materiais compósitos, utilizando-se a solução numérica da equação de difusão unidimensional. Os referidos autores utilizaram a difusividade variável e realizaram testes com diversas funções distintas. A função que forneceu os melhores resultados pode ser representada por $D_A = b \exp(aX^*)$, em que X^* representa o teor de umidade adimensional nos pontos nodais, $a = -2,9914$ e $b = 5,7385 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{h}^{-1}$.

Inserindo os dados da Tabela 4.26 juntamente com a expressão da difusividade variável obtida pelos autores no programa computacional, obteve-se a cinética da absorção de água. A Tabela 4.29 mostra os 50 pontos selecionados de forma aleatória.

Tabela 4.29: Pontos escolhidos aleatoriamente para pontos experimentais hipotéticos na absorção de água em materiais compósitos, com difusividade variável.

t (h)	\bar{X}	t (h)	\bar{X}	t (h)	\bar{X}
0,000	0,00000	142,386	0,80947	579,536	0,97610
0,625	0,14424	174,236	0,84289	610,761	0,97896
2,498	0,20516	184,852	0,85220	636,366	0,98104
6,245	0,28216	200,465	0,86458	688,824	0,98465
9,992	0,33783	229,816	0,88437	710,681	0,98593
15,613	0,40194	241,682	0,89130	763,764	0,98860
20,609	0,44718	255,421	0,89867	786,246	0,98957
29,352	0,50994	280,401	0,91054	818,720	0,99082
36,846	0,55266	306,005	0,92098	859,312	0,99217
52,458	0,62120	331,610	0,92999	904,276	0,99342
60,577	0,64942	382,194	0,94446	999,200	0,99544
67,446	0,67044	399,056	0,94849	1041,666	0,99613
76,189	0,69415	409,048	0,950723	1093,499	0,99683
83,059	0,71080	428,407	0,95474	1135,341	0,99730
100,545	0,74699	487,110	0,964847	1225,269	0,99808
112,410	0,76759	524,580	0,96998	1249	0,99825
130,521	0,79436	551,434	0,97316		

Os pontos da Tabela 4.29 foram inseridos no otimizador como pontos experimentais fictícios, o domínio foi dividido em $10 \times 20 \times 20$ volumes de controle, considerando-se o tempo de processo de 1249 minutos. Foram realizadas três simulações com valores iniciais notadamente distintos. A Tabela 4.30 mostra os resultados encontrados, em que b e b_0 são dados em $m^2 h^{-1}$.

Tabela 4.30: Parâmetros obtidos para a absorção de água em materiais compósitos com difusividade variável.

Valores iniciais	Valores obtidos	R^2	χ^2	Erro (%)
$a_0 = -4$ $b_0 = 1 \times 10^{-8}$	$a = -2,99136$ $b = 5,7386 \times 10^{-8}$	0,99995016	$5,135 \times 10^{-8}$	(a) $1,337 \times 10^{-3}$ (b) $1,743 \times 10^{-3}$
$a_0 = 5$ $b_0 = 5 \times 10^{-10}$	$a = -2,99137$ $b = 5,7381 \times 10^{-8}$	0,99995900	$4,238 \times 10^{-8}$	(a) $1,003 \times 10^{-3}$ (b) $6,970 \times 10^{-3}$
$a_0 = -16$ $b_0 = 2,2 \times 10^{-7}$	$a = -2,99142$ $b = 5,73852 \times 10^{-8}$	0,99999913	$9,007 \times 10^{-9}$	(a) $6,686 \times 10^{-4}$ (b) $3,485 \times 10^{-4}$

Para as duas primeiras simulações realizadas, a precisão adotada foi de 1×10^{-4} , enquanto que, a terceira simulação foi feita considerando a precisão de 1×10^{-5} . Vale ressaltar que o processo de otimização só foi concluído quando a precisão estabelecida foi alcançada por ambos os parâmetros “a” e “b”. Uma inspeção na Tabela 4.30 mostra que os indicadores estatísticos foram superiores com o aumento da precisão. Por outro lado, observa-se que os valores dos parâmetros encontrados foram condizentes com os resultados mostrados por Silva et al. (2012). Os referidos pesquisadores adotaram a geometria unidimensional, enquanto que neste trabalho, a geometria adotada é sempre a tridimensional.

Mais um teste foi conduzido com o intuito de complementar a validação do otimizador considerando-se a difusividade variável.

Foram usados os dados obtidos na desidratação osmótica de goiaba, realizada a 50 °Brix e 40 °C, mostradas na Tabela 4.20, presente na Seção 4.2.4. Neste trabalho, a difusividade efetiva de massa de água, em $m^2 \text{ min}^{-1}$, foi considerada variável ao longo do fenômeno e dependente da quantidade de água QA nos pontos nodais, de acordo com a expressão

$D_A = b \cosh(a \cdot QA^2)$. Através de otimização, os autores encontraram os valores dos parâmetros a e b , como sendo $3,25 \times 10^{-4}$ e $1,62 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$, respectivamente.

Uma simulação foi realizada com estes dados, onde o domínio foi dividido em $10 \times 15 \times 20$ volumes de controle, por 1440 minutos. A Tabela 4.31 mostra os 50 pontos escolhidos de forma aleatória.

Tabela 4.31: Pontos escolhidos aleatoriamente para pontos experimentais fictícios na DO de goiaba.

t (min)	\overline{QA}	t (min)	\overline{QA}	t (min)	\overline{QA}
0,00	100,00	200,88	46,37796	775,44	29,25542
0,72	91,66288	234,72	44,03868	817,92	28,82449
5,04	85,88474	274,32	41,73954	850,32	28,52691
10,08	81,94563	306,00	40,16532	885,60	28,23038
15,12	78,94750	335,52	38,86946	954,00	27,72731
21,60	75,81417	377,28	37,26789	979,92	27,55861
30,24	72,40214	398,88	36,52980	1000,08	27,43489
36,72	70,22859	419,76	35,86717	1046,88	27,17097
42,48	68,50082	469,44	34,46518	1084,32	26,98116
50,40	66,37204	494,64	33,83579	1125,36	26,79258
59,04	64,30929	511,92	33,43214	1174,32	26,59146
71,28	61,74679	548,64	32,64239	1208,88	26,46352
80,64	60,01244	584,64	31,94828	1265,76	26,27534
92,16	58,09163	607,68	31,54109	1323,36	26,10981
106,56	55,95941	651,60	30,83584	1373,76	25,98295
140,40	51,81869	698,40	30,17457	1440	25,83826
170,64	48,85406	735,12	29,71243		

Os pontos da Tabela 4.31 foram inseridos como pontos experimentais fictícios no otimizador, juntamente com as condições iniciais para os parâmetros a e b da função difusividade, dados por: $a_0 = 4,2 \times 10^{-5}$ e $b_0 = 2,41 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$. A Tabela 4.32 exhibe os resultados encontrados, juntamente com as precisões analisadas.

Tabela 4.32: Parâmetros obtidos na otimização com difusividade variável na DO de goiaba.

Precisão	$a \times 10^4$	$b \times 10^8$ ($\text{m}^2 \text{min}^{-1}$)	R^2	χ^2	Erro (a) (%)	Erro (b) (%)
1×10^{-4}	3,2503	1,61991	0,999945	$5,361 \times 10^{-5}$	$9,231 \times 10^{-3}$	$5,555 \times 10^{-3}$
1×10^{-5}	3,25002	1,619994	0,999999	$1,340 \times 10^{-7}$	$6,154 \times 10^{-4}$	$3,704 \times 10^{-4}$
1×10^{-6}	3,250001	1,619999	0,999999	$1,043 \times 10^{-8}$	$3,077 \times 10^{-5}$	$6,173 \times 10^{-5}$

Percebe-se que à medida que a precisão aumenta, os indicadores estatísticos apresentam resultados superiores.

O gráfico representando os pontos experimentais e os simulados, obtidos com a precisão 1×10^{-4} , está representado na Figura 4.36.

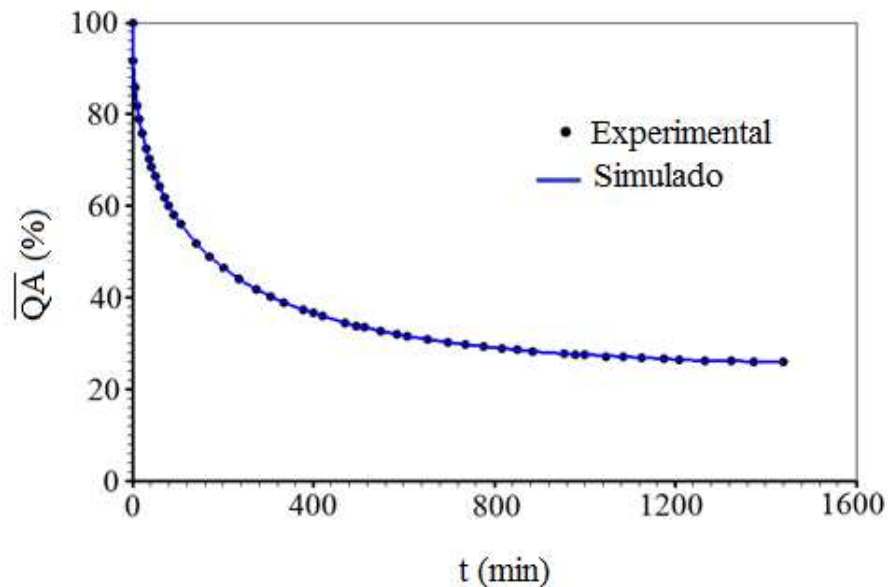


Figura 4.36: Superposição dos gráficos obtidos através dos pontos experimentais e os resultados simulados pelo otimizador na desidratação osmótica de goiaba.

Os resultados mostrados na Tabela 4.32 e na Figura 4.36, atestam a concordância entre os valores obtidos através do otimizador, ratificando a sua eficiência na recuperação dos parâmetros da função difusividade.

Foram realizados diversos testes com o otimizador utilizando-se a difusividade tanto constante como variável, seguindo o mesmo roteiro apresentado nesta seção. No sentido de evitar repetições, não foram acrescentados a este trabalho. Entretanto, os resultados

apresentados foram sempre coerentes e condizentes com os artigos originais, mostrando a viabilidade de sua aplicação.

Diante dos testes implementados, é possível afirmar que o programa desenvolvido atendeu às expectativas quanto à consistência, coerência, ao uso da simetria, à comparação com resultados encontrados através de soluções analíticas, bem como, à eficácia do algoritmo otimizador.

4.3. A desidratação osmótica: resultados, análises e discussão

Os experimentos de desidratação osmótica de maçã, cortada em forma de paralelepípedo, foram realizados de acordo com a metodologia e as condições operacionais descritas na Seção 3.3.3.

A Tabela 4.33 mostra as dimensões médias iniciais dos pedaços de maçã, a quantidade de água inicial (\overline{QA}_0), a quantidade de água de equilíbrio (\overline{QA}_{eq}), a quantidade de sacarose inicial (\overline{QS}_0) e a quantidade de sacarose de equilíbrio (\overline{QS}_{eq}), referentes a cada um dos experimentos realizados.

Tabela 4.33: Dados referentes aos experimentos de desidratação osmótica de maçã.

Condições experimentais	$L_{x_0} \times 10^3$ (m)	$L_{y_0} \times 10^3$ (m)	$L_{z_0} \times 10^3$ (m)	\overline{QA}_0 (%)	\overline{QA}_{eq} (%)	\overline{QS}_0 (%)	\overline{QS}_{eq} (%)
40 °Brix-40 °C	9,630	9,047	20,867	100,0	55,332	0,0	66,467
60 °Brix-40 °C	9,353	9,527	19,480	100,0	34,687	0,0	72,111
40 °Brix-60 °C	9,163	9,343	20,840	100,0	40,281	0,0	73,814
60 °Brix-60 °C	9,307	9,023	19,660	100,0	19,501	0,0	86,888

Os valores de equilíbrio mostrados na Tabela 4.33 demonstram coerência com outros resultados encontrados na literatura. Em sua pesquisa sobre desidratação osmótica de maçã, Azuara et al. (2009) utilizaram maçãs cortadas ao meio, as quais foram desidratadas a uma temperatura de processo de 40 °C e concentração de 60 °Brix. Após uma hora de imersão, as frutas perderam 37% de água e incorporaram 30% de sacarose. Considerando-se o tempo reduzido de processo e a diferença entre os volumes das amostras, percebe-se que o valor de equilíbrio mostrado na Tabela 4.33, para a mesma condição operacional, é satisfatório. Por

outro lado, Borsato et al. (2010) utilizando a temperatura de 20 °C e concentração de 58,5 % de sacarose, desidrataram osmoticamente cilindros de maçã, com 14,5 mm de diâmetro e 25 mm de comprimento, por trinta e três horas. Ao final do processo, os frutos perderam 55% da água inicial e incorporaram cerca de 58% de sacarose nas extremidades. Vale salientar que a temperatura utilizada foi mais baixa do que as utilizadas na presente pesquisa. Sabe-se que temperaturas mais altas contribuem para uma maior transferência de massa na maioria dos casos (LAZARIDES e MAVROUDIS, 1996; MOREIRA e SERENO, 2003; SILVA JUNIOR, 2015). O tamanho das amostras também influencia na perda de água e captação de sacarose. Ruiz-López et al. (2010) quando desidrataram abacaxi cortados de tamanhos diferentes, encontraram que os pedaços menores absorveram mais sacarose e perderam mais água do que as amostras maiores.

Nas Figuras 4.37 e 4.38 estão representadas superfícies de respostas obtidas a partir dos valores apresentados na Tabela 4.33, através do *software* “LAB Fit Curve Fitting Software” (Silva e Silva, 2009a). Os gráficos mostram o efeito da concentração da solução osmótica e da temperatura de processo sobre as quantidades médias de equilíbrio de água e sacarose, respectivamente, em que X_1 representa a concentração do meio osmótico e X_2 , a temperatura de processo. Nas referidas figuras estão destacados os eixos referentes às variáveis independentes, concentração e temperatura, bem como, da variável dependente, \overline{QA}_{eq} ou \overline{QS}_{eq} , respecti

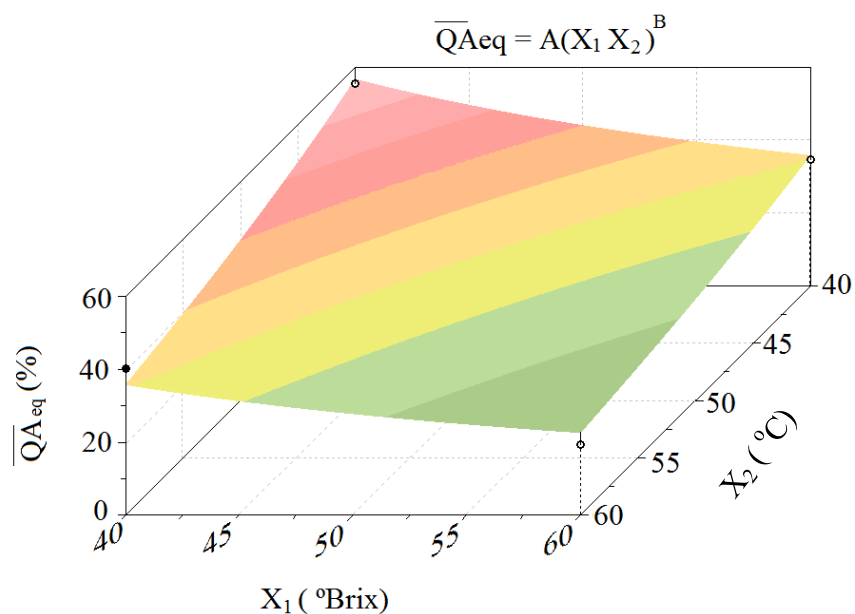


Figura 4.37: Efeito da concentração da solução osmótica e da temperatura sobre a quantidade média final de água ($A = 2,501 \times 10^5$ e $B = -1,138$).

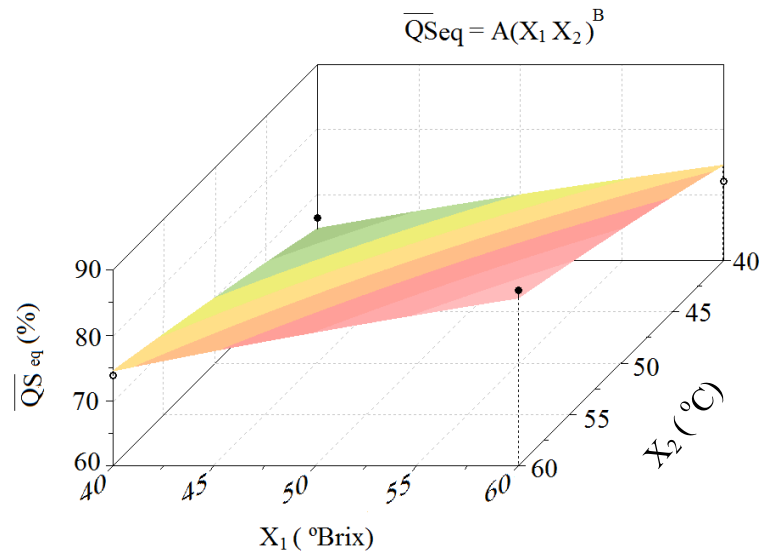


Figura 4.38: Efeito da concentração da solução osmótica e da temperatura sobre a quantidade média final de sacarose ($A = 5,117$ e $B = 0,344$).

Uma análise nas Figuras 4.37 e 4.38 permite realizar previsões das quantidades de água ou de sacarose para quaisquer combinações do tipo (X_1, X_2) , com X_1 pertencente ao intervalo de 40 a 60 °Brix, e X_2 , no intervalo de 40 a 60 °C. Obviamente, devido ao baixo número de experimentos, tais previsões devem ser interpretadas apenas como estimativas preliminares.

Os dados das cinéticas e a evolução das dimensões dos pedaços de maçã, obtidas em cada um dos experimentos ao longo do processo, encontram-se na Seção A do Apêndice deste trabalho.

As Figuras 4.39 – 4.42 mostram os gráficos das cinéticas das quantidades médias de água e de sacarose obtidos através dos Experimentos 1, 2, 3 e 4.

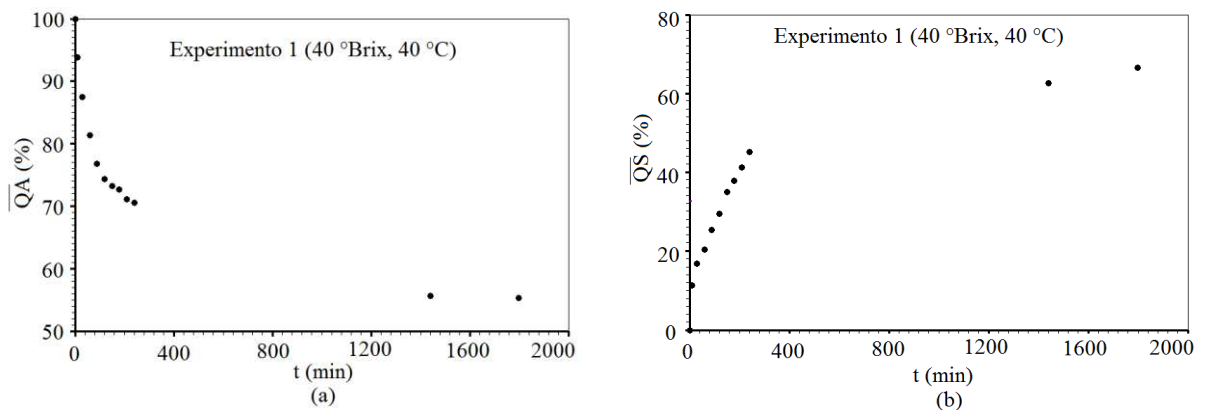


Figura 4.39: Cinéticas referentes à quantidade de: (a) água, (b) sacarose, obtidas através do Experimento 1.

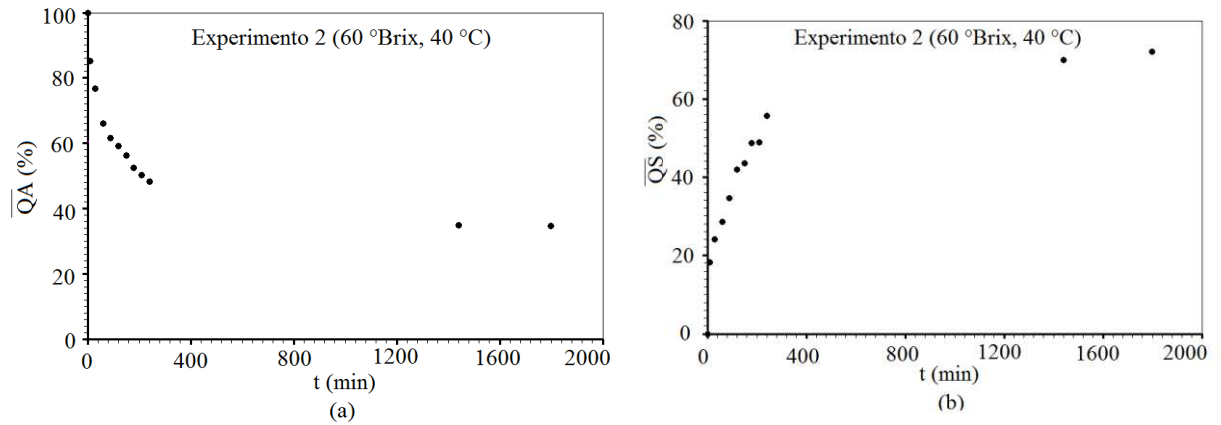


Figura 4.40: Cinéticas referentes à quantidade de: (a) água, (b) sacarose, obtidas através do Experimento 2.

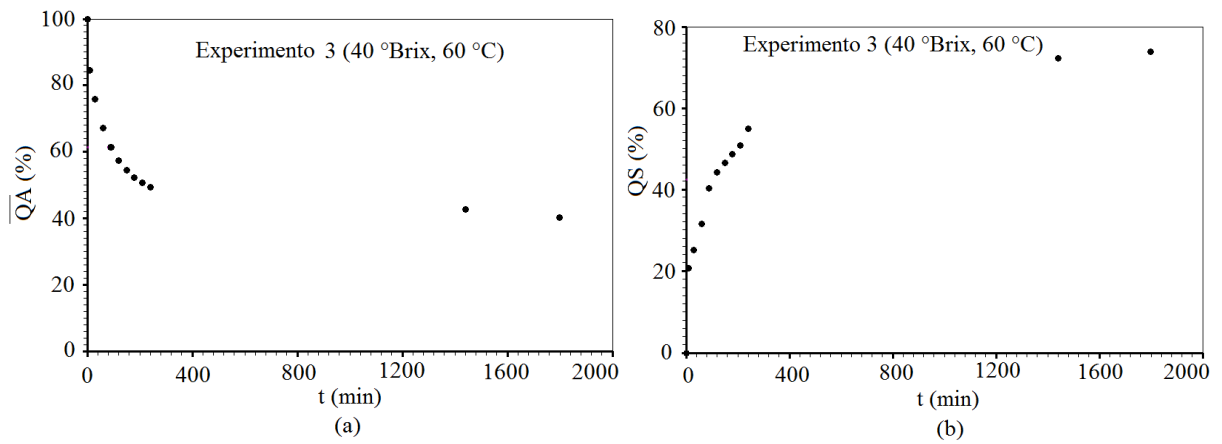


Figura 4.41: Cinéticas referentes à quantidade de: (a) água, (b) sacarose, obtidas através do Experimento 3.

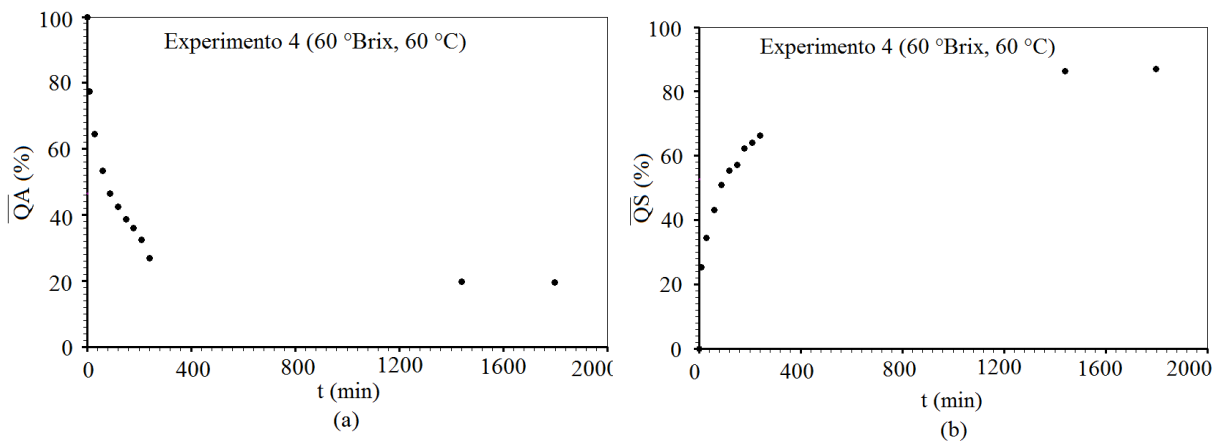


Figura 4.42: Cinéticas referentes à quantidade de: (a) água, (b) sacarose, obtidas através do Experimento 4.

4.3.1. A escolha da condição de contorno na DO

Foram realizadas simulações utilizando-se as cinéticas obtidas em cada experimento de desidratação osmótica, com o objetivo de definir qual a condição de contorno mais adequada a ser utilizada. As referidas simulações foram feitas por meio dos *softwares* “Prescribed Adsorption-Desorption 2.2” (Silva e Silva, 2009b) e “Convective Adsorption-Desorption 2.5” (Silva e Silva, 2009c), que fornecem a solução analítica da equação de difusão com as condições de contorno de primeiro e terceiro tipos, respectivamente, bem como, através do processo de otimização, são concedidos os parâmetros de processo. Embora os *softwares* utilizados forneçam soluções analíticas, podem ser usados, de forma satisfatória, para nortear a análise da condição de contorno em termos de solução numérica.

A Tabela 4.34 mostra os parâmetros encontrados, os indicadores estatísticos e o tempo de execução de cada simulação para a quantidade de água durante o processo.

Tabela 4.34: Parâmetros obtidos através das simulações com os *softwares* Prescribed e Convective para a quantidade de água.

Experimento	Condição de contorno	$D_A \times 10^8$ ($m^2 min^{-1}$)	R^2	χ^2	Biot	Tempo de execução
1 (40 °Brix e 40 °C)	1° tipo	1,075	0,9933	13,571	----	1min53s
	3° tipo	1,170	0,9936	12,463	87,5	7min15s
2 (60 °Brix e 40 °C)	1° tipo	1,688	0,9982	7,476	----	3min03s
	3° tipo	1,752	0,9987	8,479	200	9min11s
3 (40 °Brix e 60 °C)	1° tipo	2,257	0,9982	7,437	----	3min32s
	3° tipo	2,333	0,9983	7,451	200	9min50s
4 (60 °Brix e 60 °C)	1° tipo	2,382	0,9979	13,890	----	3min04s
	3° tipo	2,461	0,9976	16,633	200	10min10s

Com o objetivo de aprimorar a análise, os gráficos das cinéticas obtidas para cada experimento e condição de contorno, foram plotados em um mesmo sistema de eixos, como mostram as Figuras 4.43 e 4.44.

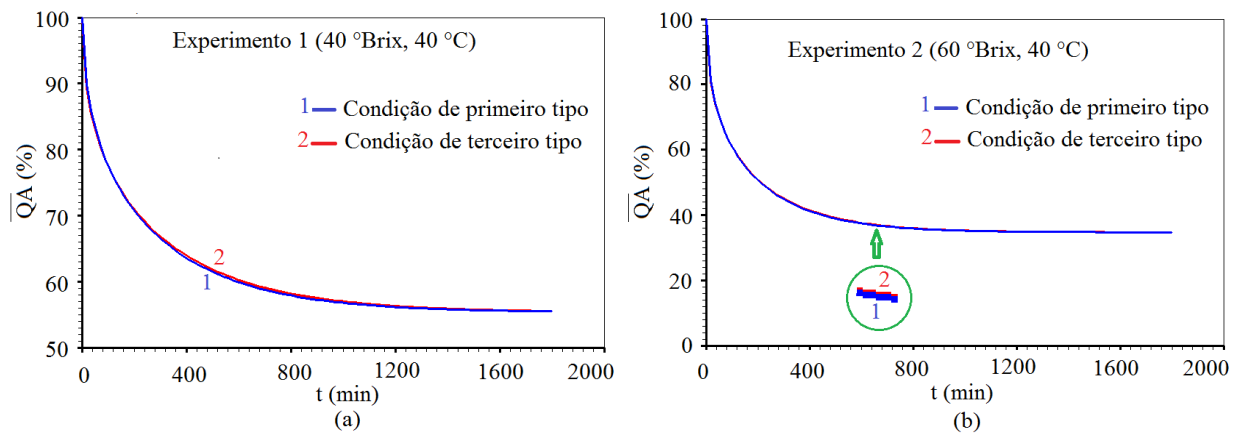


Figura 4.43: Cinéticas das quantidades de água considerando-se as condições de contorno de primeiro e terceiro tipos referentes ao: (a) Experimento 1; (b) Experimento 2.

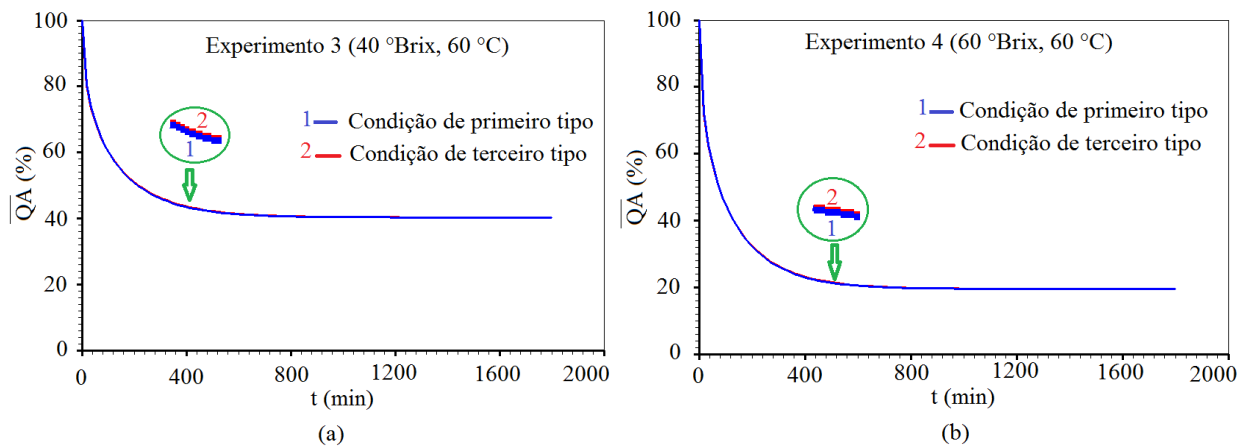


Figura 4.44: Cinéticas das quantidades de água considerando-se as condições de contorno de primeiro e terceiro tipos referentes ao: (a) Experimento 3; (b) Experimento 4.

Uma análise semelhante foi realizada considerando-se a quantidade de sacarose durante o processo de desidratação osmótica. A Tabela 4.35 mostra os resultados encontrados.

Tabela 4.35: Parâmetros obtidos através das simulações com os *softwares* Prescribed e Convective para a quantidade de sacarose.

Experimento	Condição de contorno	$D_S \times 10^8$ ($m^2 \text{min}^{-1}$)	R^2	χ^2	Biot	Tempo de execução
1 (40 °Brix e 40 °C)	1° tipo	0,7863	0,989	48,540	----	1min32s
	3° tipo	0,9326	0,990	43,071	46,0	6min50s
2 (60 °Brix e 40 °C)	1° tipo	1,259	0,990	49,381	----	2min10s
	3° tipo	1,312	0,989	53,515	200,0	8min31s
3 (40 °Brix e 60 °C)	1° tipo	1,336	0,993	44,785	----	2min18s
	3° tipo	1,390	0,982	54,022	200,0	8min40s
4 (60 °Brix e 60 °C)	1° tipo	1,577	0,994	58,837	----	3min04s
	3° tipo	1,638	0,993	74,157	200,0	9min12s

As Figuras 4.45 e 4.46 mostram a superposição entre as cinéticas obtidas, considerando-se as duas condições de contorno.

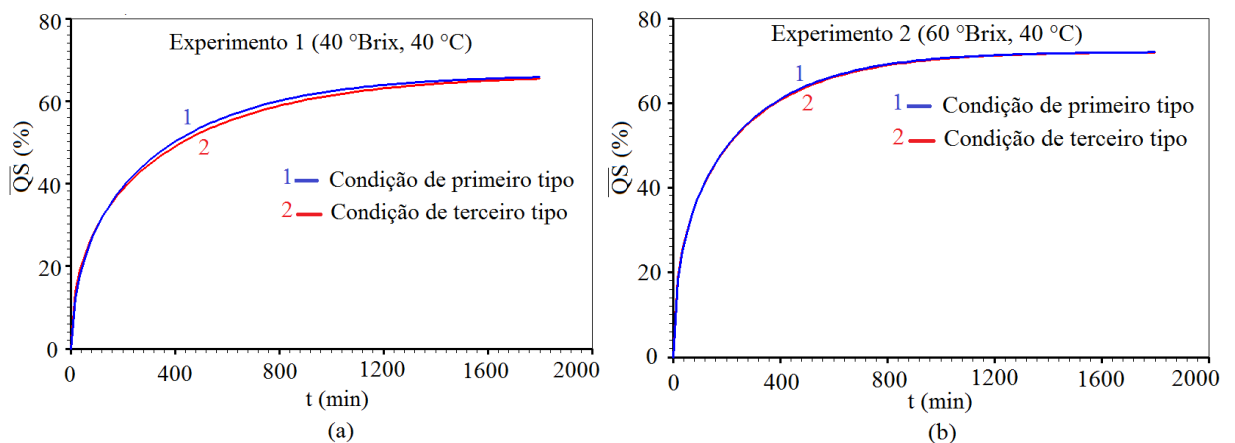


Figura 4.45: Cinéticas das quantidades de sacarose considerando-se as condições de contorno de primeiro e terceiro tipos referentes ao: (a) Experimento 1; (b) Experimento 2.

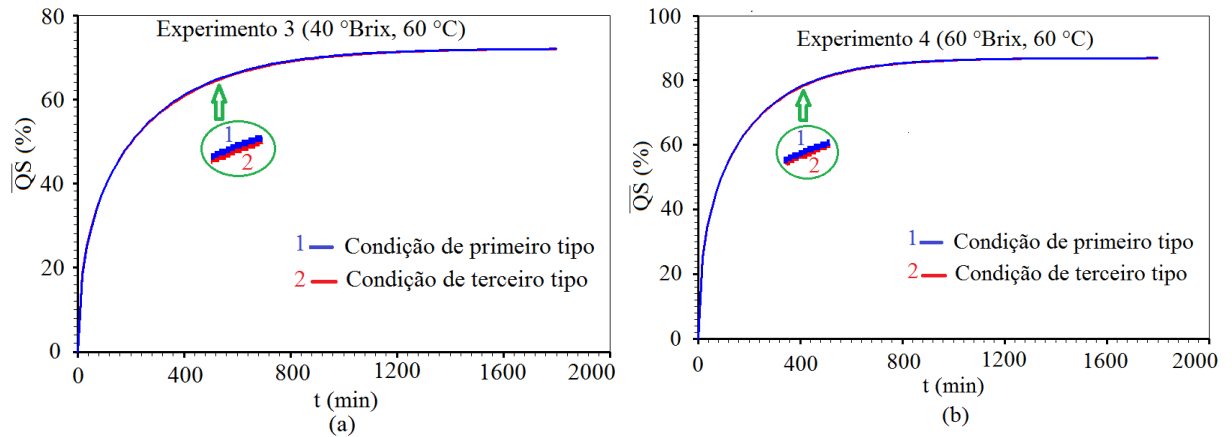


Figura 4.46: Cinéticas das quantidades de sacarose considerando-se as condições de contorno de primeiro e terceiro tipos referentes ao: (a) Experimento 3; (b) Experimento 4.

As Tabelas 4.34 e 4.35 e as Figuras 4.43(a) e 4.45(a) sugerem que para o Experimento 1, a condição de terceiro tipo poderia ser mais adequada, tendo em vista que as curvas 1 e 2 não são completamente coincidentes, embora sejam muito próximas. No entanto, as diferenças encontradas quando se comparam os indicadores estatísticos e os gráficos, para este e os demais casos, são ínfimas. Por outro lado, o tempo de execução quando a condição de contorno de primeiro tipo é utilizada é expressivamente menor. Sabe-se que no processo de otimização a equação de difusão é resolvida diversas vezes, desta forma, este ganho de tempo torna-se significativo. Para os Experimentos 2, 3 e 4, o número de Biot encontrado foi elevado, o que indica que a condição de contorno mais adequada é a do primeiro tipo.

Diante do exposto, a condição de contorno de primeiro tipo é considerada mais conveniente para o estudo da desidratação osmótica no presente trabalho.

4.3.2. Os modelos adotados na modelagem matemática da desidratação osmótica

A estimativa dos parâmetros foi realizada acoplando-se o algoritmo otimizador, descrito na Seção 3.2.4, à solução numérica da equação de difusão tridimensional, em coordenadas cartesianas, com a condição de contorno de primeiro tipo.

Para a modelagem matemática das quantidades de água e de sacarose durante o processo, foram utilizados dois modelos, baseados em outros trabalhos encontrados na literatura (SILVA et al., 2014c; AIRES, 2015), como pode ser visto a seguir.

- Modelo 1: Neste modelo, a solução numérica da equação de difusão com a condição de contorno de primeiro tipo foi obtida desconsiderando-se o encolhimento do produto e admitindo-se a difusividade efetiva de massa constante durante o processo.
- Modelo 2: Neste caso, a solução numérica da equação de difusão com a condição de contorno de primeiro tipo foi determinada pressupondo o encolhimento do produto, bem como, a variação da difusividade efetiva de massa.

4.3.3. Resultados obtidos através do modelo 1

Para o modelo 1, a malha foi dividida em $15 \times 15 \times 25$ volumes de controle, com 1000 estepes de tempo, com a precisão de 10^{-4} e fazendo-se o uso da simetria. A seguinte metodologia foi adotada:

- Para o Experimento 1 (40 °Brix e 40 °C), foi atribuído o valor inicial $D_{A0} = 2,8 \times 10^{-8}$ ($\text{m}^2 \text{min}^{-1}$), para a difusividade de água, e $D_{S0} = 1,912 \times 10^{-8}$ ($\text{m}^2 \text{min}^{-1}$) para a difusividade de sacarose, ambos encontrados por Aires (2015) em seu trabalho sobre desidratação osmótica de placas de maçã, nas mesmas condições operacionais.
- Os valores das difusividades obtidos no Experimento 1 foram usados como valores iniciais para o Experimento 2 (60 °Brix e 40 °C).
- Os valores das difusividades obtidos no Experimento 2 foram usados como valores iniciais para o Experimento 3 (40 °Brix e 60 °C).
- Os valores das difusividades obtidos no Experimento 3 foram usados como valores iniciais para o Experimento 4 (60 °Brix e 60 °C).

A Tabela 4.36 mostra os resultados obtidos para a quantidade de água com a aplicação do modelo 1.

Tabela 4.36: Parâmetros de processo relativos à quantidade de água com o uso do modelo 1.

Experimento	$D_A \times 10^8 \text{ (m}^2\text{min}^{-1}\text{)}$	χ^2	R^2
1 (40 °Brix e 40 °C)	1,098	11,390	0,9942
2 (60 °Brix e 40 °C)	1,721	8,733	0,9980
3 (40 °Brix e 60 °C)	2,301	7,724	0,9983
4 (60 °Brix e 60 °C)	2,429	17,780	0,9975

Os parâmetros encontrados para a quantidade de sacarose encontram-se na Tabela 4.37.

Tabela 4.37: Parâmetros de processo relativos à quantidade de sacarose com o uso do modelo 1.

Experimento	$D_S \times 10^8 \text{ (m}^2\text{min}^{-1}\text{)}$	χ^2	R^2
1 (40 °Brix e 40 °C)	0,806	48,611	0,9887
2 (60 °Brix e 40 °C)	1,287	59,257	0,9886
3 (40 °Brix e 60 °C)	1,365	60,355	0,9907
4 (60 °Brix e 60 °C)	1,596	61,240	0,9938

Com os parâmetros mostrados nas Tabelas 4.36 e 4.37 foram realizadas simulações relativas às quantidades de água e de sacarose durante o processo de desidratação osmótica, para cada um dos quatro experimentos.

A Figura 4.47 mostra as superposições entre a curva simulada e os pontos experimentais obtidos para o Experimento 1.

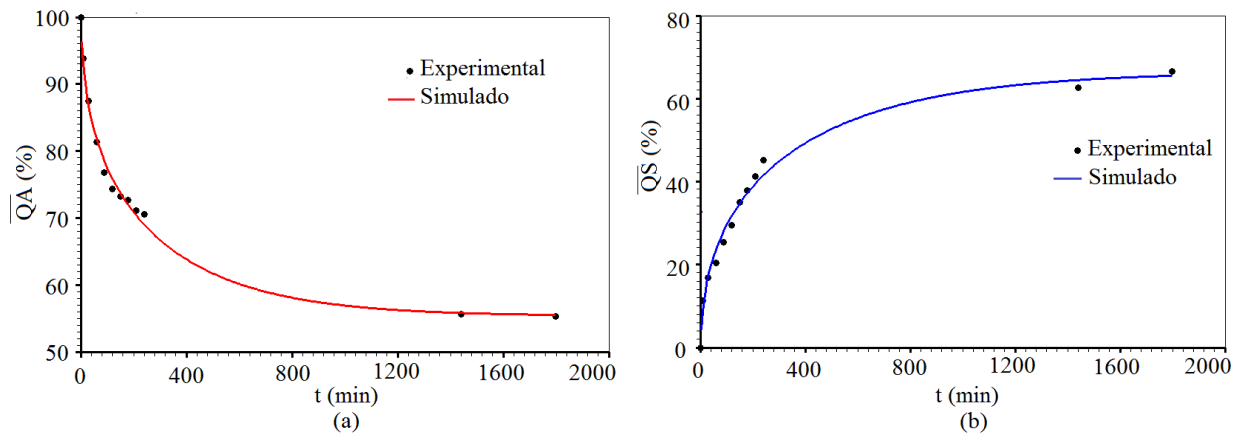


Figura 4.47: Superposição das cinéticas obtidas através dos dados experimentais e os resultados simulados para o Experimento 1 usando-se o modelo 1, referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

As superposições entre as cinéticas das quantidades de água e sacarose obtidas através do Experimento 2 são apresentadas na Figura 4.48.

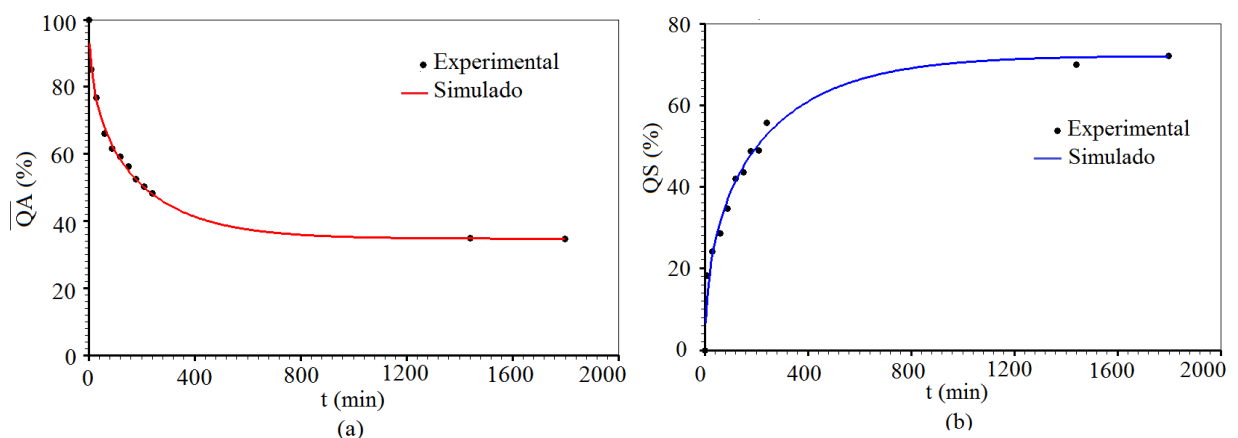


Figura 4.48: Superposição das cinéticas obtidas através dos dados experimentais e os resultados simulados para o Experimento 2 usando-se o modelo 1, referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

Para o Experimento 3, as superposições entre as cinéticas obtidas utilizando-se o modelo 1 encontram-se na Figura 4.49.

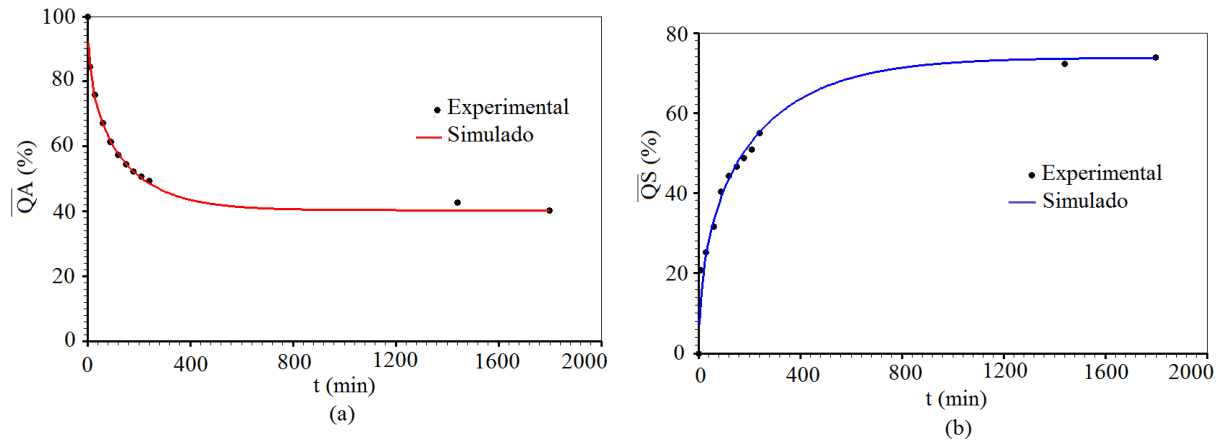


Figura 4.49: Superposição das cinéticas obtidas através dos dados experimentais e os resultados simulados para o Experimento 3 usando-se o modelo 1, referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

As superposições das cinéticas das quantidades de água e de sacarose para o Experimento 4, utilizando-se o modelo 1, são apresentadas na Figura 4.50.

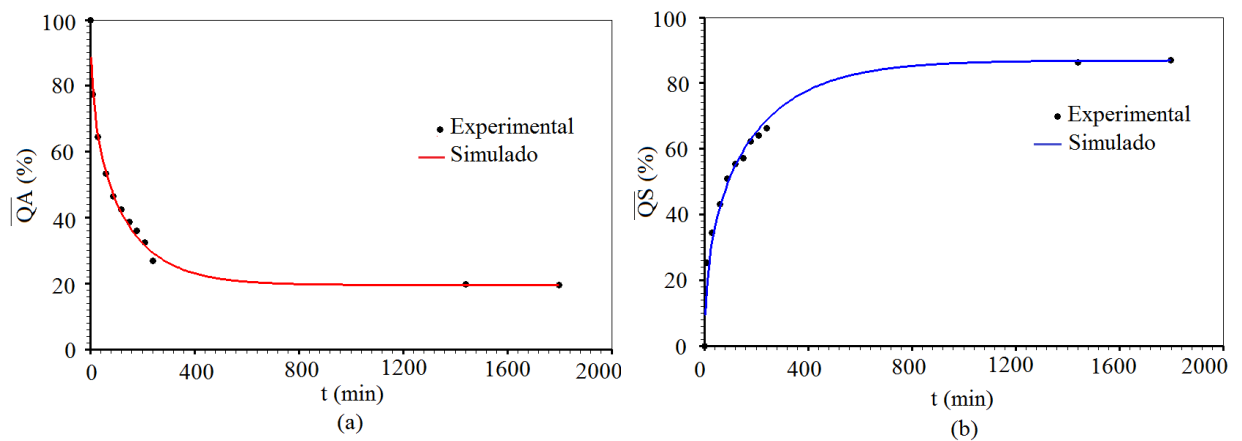


Figura 4.50: Superposição das cinéticas obtidas através dos dados experimentais e os resultados simulados para o Experimento 4 usando-se o modelo 1, referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

Observando-se as Tabelas 4.36 e 4.37 algumas conclusões podem ser feitas:

- A difusividade de água variou de $1,098 \times 10^{-8}$ a $2,429 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$, enquanto que, a difusividade de sacarose obteve resultados dentro do intervalo de $0,806 \times 10^{-8}$ a

$1,586 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Aires (2015), na desidração osmótica de placas de maçã, nas mesmas condições operacionais. O autor encontrou a difusividade de água variando de $2,88805 \times 10^{-8}$ a $6,68956 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$, enquanto que, a difusividade de sacarose variou dentro do intervalo de $1,91216 \times 10^{-8}$ a $6,37529 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$. Vale ressaltar que as placas de maçãs tinham tamanhos maiores do que as amostras do presente trabalho. Em adição a este fato, a condição de contorno adotada foi a de terceiro tipo. Silva Junior (2015), na desidratação osmótica de bananas, obteve a difusividade de água no intervalo de $1,479 \times 10^{-8}$ a $3,458 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ e a difusividade de sacarose de $1,401 \times 10^{-8}$ a $3,4138 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$. Souraki et al. (2014) na desidratação osmótica de placas de maçã, com condição experimental de 40 °Brix e 40 °C, sem considerar o encolhimento e admitindo a difusividade constante, encontraram a difusividade de água $D_A = 0,99 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$, enquanto que, a difusividade de sacarose obtida foi $D_S = 0,96 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$. Os valores obtidos por Rodrigues e Mauro (2008) para as difusividades na desidratação osmótica de fatias de maçã em solução osmótica com 40 °Brix de concentração e 27 °C de temperatura foram: $D_A = 2,156 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ e $D_S = 0,13 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$.

➤ Para cada um dos experimentos, o valor da difusividade de água é superior ao valor da difusividade de sacarose. Resultado semelhante pode ser encontrado em outros trabalhos da literatura (DEROSSI et al., 2008; MERCALI et al., 2011; SILVA et al., 2014a; AIRES, 2015).

➤ Os valores obtidos para as difusividades de massa de água e sacarose, apresentados nas Tabelas 4.36 e 4.37, respectivamente, são concordantes com os valores encontrados por meio da solução analítica da equação de difusão com condição de contorno de primeiro tipo, mostrados nas Tabelas 4.34 e 4.35. É um resultado esperado, tendo em vista que em ambas as situações, o encolhimento é desconsiderado e a difusividade é admitida constante.

➤ Fixando-se uma determinada temperatura, à medida que a concentração da solução osmótica aumenta, cresce o valor da difusividade, tanto de água como de sacarose. Este fato é atestado quando se comparam os Experimentos 1 e 2, ambos com temperatura a 40 °C e

concentrações de 40 °Brix e 60 °Brix, respectivamente. De forma análoga, analisando-se os Experimentos 3 e 4, com temperaturas de 60 °C e concentrações de 40 °Brix e 60 °Brix, respectivamente, tem-se um resultado semelhante. Desta forma, a influência da concentração da solução na transferência de massa é confirmada e é concordante com o que foi encontrado por Moreira e Sereno (2003) no estudo de desidratação osmótica de cilindros de maçã, em solução de sacarose. Os autores concluíram que o aumento da concentração resultou em uma maior perda de água e superior aquisição de solutos.

➤ Por outro lado, fixando-se uma determinada concentração do meio osmótico, à medida que se aumenta a temperatura, cresce a difusividade de massa para as duas grandezas, como pode ser visto comparando-se os Experimentos 1 e 3, ambos com concentração de 40° Brix e temperaturas de 40 °C e 60 °C, respectivamente. Examinando-se os Experimentos 2 e 4, tem-se resultado análogo. Efeito equivalente foi encontrado por Jain et al. (2011) na desidratação osmótica de cubos de mamão. Os pesquisadores concluíram que a temperatura teve um efeito significativo na transferência de massa e foi considerado como o fator mais determinante no processo osmótico.

De uma forma geral, o modelo 1 ajusta, de forma satisfatória, as cinéticas de transferência de massa do processo de desidratação osmótica. No entanto, o referido modelo não condiz com a realidade física, tendo em vista que desconsidera o encolhimento do produto e admite as difusividades de massa constantes.

4.3.4. Resultados obtidos através do modelo 2

Na aplicação do modelo 2, a difusividade de massa é admitida variável e o encolhimento do produto é considerado. Supõe-se que as medidas das arestas do paralelepípedo sofrem alterações, sem, no entanto, provocarem mudanças significativas na forma do sólido.

Durante os experimentos laboratoriais, cuja metodologia foi detalhada na Seção 3.3.3, a evolução das dimensões dos pedaços de maçã foi monitorada e apresentada na Seção A do Apêndice deste trabalho. Os valores adimensionais para cada uma das dimensões L_x , L_y e L_z , foram obtidos através das relações apresentadas nas Equações (4.8a – c), para cada instante analisado, e constam nas Tabelas A.2, A.4, A.6 e A.8.

$$L_x^* = \frac{L_x}{L_{x_0}} \quad (4.8a)$$

$$L_y^* = \frac{L_y}{L_{y_0}} \quad (4.8b)$$

$$L_z^* = \frac{L_z}{L_{z_0}} \quad (4.8c)$$

em que L_{x_0} , L_{y_0} e L_{z_0} denotam as dimensões iniciais dos pedaços de maçã.

Para se obter uma relação entre os valores adimensionais e as grandezas de interesse, quantidades de água e de sacarose, foi realizado um ajuste de curvas, através do programa LAB Fit Curve Fitting Software (Silva e Silva, 2009a), por meio da opção “Find”, o qual utilizou 208 funções para serem comparadas aos dados experimentais. Foram criados dois arquivos contendo os valores adimensionais L_x^* , L_y^* e L_z^* , obtidos nos quatro experimentos, em função das quantidades médias de água e de sacarose, gerando, portanto, 144 pontos em cada arquivo. A função linear se destacou entre as melhores no ajuste aos dados experimentais, tanto para a quantidade de água como para a quantidade de sacarose. Considerando-se que a referida função foi utilizada em outros trabalhos com a mesma finalidade (LAZARIDES e MAVROUDIS, 1996; MOREIRA e SERENO, 2003; SILVA et al., 2014c; AIRES, 2015), foi considerada mais adequada no presente trabalho.

Na Tabela 4.38, têm-se os valores dos parâmetros de ajuste da função linear aos valores adimensionais L_x^* , L_y^* e L_z^* , em função das quantidades de água e de sacarose.

Tabela 4.38: Parâmetros de ajuste da função linear aos valores adimensionais L_x^* , L_y^* e L_z^* em função das quantidades de água e sacarose.

Grandeza de interesse	Função linear	$a \times 10^2$	b	χ^2
Quantidade de água	$L_x^* = L_y^* = L_z^* = a\overline{QA} + b$	0,2727	0,6897	30,025
Quantidade de sacarose	$L_x^* = L_y^* = L_z^* = a\overline{QS} + b$	- 0,2860	0,9770	23,544

A Figura 4.51 apresenta a superposição entre os dados experimentais obtidos para as dimensões dos pedaços de maçã e a expressão linear, em função da quantidade de água, encontrada por meio de ajuste de curvas.

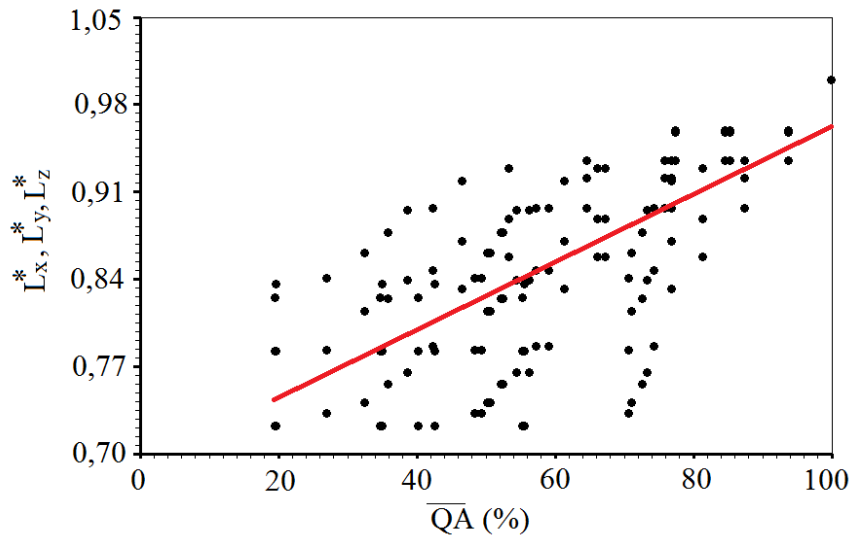


Figura 4.51: Ajuste da função linear às dimensões do sólido em função da quantidade de água.

Durante os experimentos percebeu-se que à medida que a quantidade de água do produto diminui, as suas dimensões decrescem ao longo do processo. A Figura 4.51 mostra uma função crescente, a qual traduz a situação física do fenômeno de forma coerente.

A superposição entre os dados experimentais obtidos para as dimensões do produto em função da quantidade de sacarose e a função linear encontrada, é representada pela Figura 4.52.

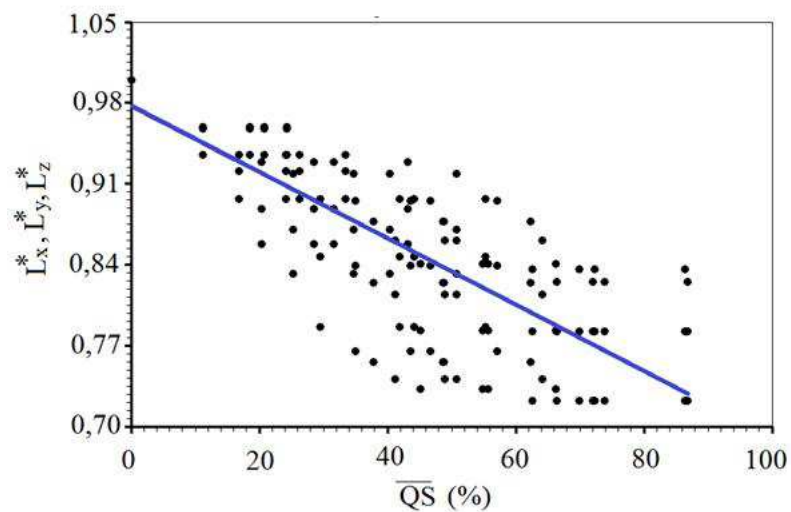


Figura 4.52: Ajuste da função linear às dimensões do sólido em função da quantidade de sacarose.

Uma análise acerca do comportamento da função obtida e dos dados experimentais mostrados na Figura 4.52, revela que há uma adequação satisfatória ao processo físico, tendo em vista que conforme o produto incorpora soluto, suas dimensões decrescem ao longo do fenômeno.

Os valores iniciais das dimensões dos pedaços de maçã obtidos em cada experimento, juntamente com as expressões encontradas a partir da expressão linear em função da quantidade de água e das Equações (4.8a – c), são mostrados na Tabela 4.39.

Tabela 4.39: Expressões lineares em função da quantidade de água para as dimensões do sólido.

Experimento	Dimensões iniciais (m)	Expressão linear em função da \overline{QA} (m)
1 (40 °Brix e 40 °C)	$L_{x_0} = 9,630 \times 10^{-3}$	$L_x = 2,626 \times 10^{-5} \overline{QA} + 6,642 \times 10^{-3}$
	$L_{y_0} = 9,047 \times 10^{-3}$	$L_y = 2,467 \times 10^{-5} \overline{QA} + 6,239 \times 10^{-3}$
	$L_{z_0} = 20,867 \times 10^{-3}$	$L_z = 5,690 \times 10^{-5} \overline{QA} + 1,439 \times 10^{-2}$
2 (60 °Brix e 40 °C)	$L_{x_0} = 9,353 \times 10^{-3}$	$L_x = 2,551 \times 10^{-5} \overline{QA} + 6,451 \times 10^{-3}$
	$L_{y_0} = 9,527 \times 10^{-3}$	$L_y = 2,598 \times 10^{-5} \overline{QA} + 6,571 \times 10^{-3}$
	$L_{z_0} = 19,480 \times 10^{-3}$	$L_z = 5,312 \times 10^{-5} \overline{QA} + 1,343 \times 10^{-2}$
3 (40 °Brix e 60 °C)	$L_{x_0} = 9,163 \times 10^{-3}$	$L_x = 2,499 \times 10^{-5} \overline{QA} + 6,320 \times 10^{-3}$
	$L_{y_0} = 9,343 \times 10^{-3}$	$L_y = 2,548 \times 10^{-5} \overline{QA} + 6,444 \times 10^{-3}$
	$L_{z_0} = 20,840 \times 10^{-3}$	$L_z = 5,683 \times 10^{-5} \overline{QA} + 1,437 \times 10^{-2}$
4 (60 °Brix e 60 °C)	$L_{x_0} = 9,307 \times 10^{-3}$	$L_x = 2,538 \times 10^{-5} \overline{QA} + 6,419 \times 10^{-3}$
	$L_{y_0} = 9,023 \times 10^{-3}$	$L_y = 2,460 \times 10^{-5} \overline{QA} + 6,223 \times 10^{-3}$
	$L_{z_0} = 19,660 \times 10^{-3}$	$L_z = 5,361 \times 10^{-5} \overline{QA} + 1,356 \times 10^{-2}$

Um procedimento semelhante foi adotado para a quantidade de sacarose. A Tabela 4.40 mostra os valores iniciais das dimensões dos sólidos, juntamente com as expressões lineares, em função da quantidade média de sacarose, obtidas a partir de ajuste de curvas e das Equações (4.8a – c).

Tabela 4.40: Expressões lineares em função da quantidade de sacarose para as dimensões do sólido.

Experimento	Dimensões iniciais (m)	Expressão linear em função da \overline{QS} (m)
1 (40 °Brix e 40 °C)	$L_{x_0} = 9,630 \times 10^{-3}$	$L_x = -2,754 \times 10^{-5} \overline{QS} + 9,408 \times 10^{-3}$
	$L_{y_0} = 9,047 \times 10^{-3}$	$L_y = -2,587 \times 10^{-5} \overline{QS} + 8,839 \times 10^{-3}$
	$L_{z_0} = 20,867 \times 10^{-3}$	$L_z = -5,968 \times 10^{-5} \overline{QS} + 2,038 \times 10^{-2}$
2 (60 °Brix e 40 °C)	$L_{x_0} = 9,353 \times 10^{-3}$	$L_x = -2,675 \times 10^{-5} \overline{QS} + 9,138 \times 10^{-3}$
	$L_{y_0} = 9,527 \times 10^{-3}$	$L_y = -2,725 \times 10^{-5} \overline{QS} + 9,308 \times 10^{-3}$
	$L_{z_0} = 19,480 \times 10^{-3}$	$L_z = -5,571 \times 10^{-5} \overline{QS} + 1,903 \times 10^{-2}$
3 (40 °Brix e 60 °C)	$L_{x_0} = 9,163 \times 10^{-3}$	$L_x = -2,621 \times 10^{-5} \overline{QS} + 8,952 \times 10^{-3}$
	$L_{y_0} = 9,343 \times 10^{-3}$	$L_y = -2,672 \times 10^{-5} \overline{QS} + 9,128 \times 10^{-3}$
	$L_{z_0} = 20,840 \times 10^{-3}$	$L_z = -5,960 \times 10^{-5} \overline{QS} + 2,036 \times 10^{-2}$
4 (60 °Brix e 60 °C)	$L_{x_0} = 9,307 \times 10^{-3}$	$L_x = -2,662 \times 10^{-5} \overline{QS} + 9,093 \times 10^{-3}$
	$L_{y_0} = 9,023 \times 10^{-3}$	$L_y = -2,581 \times 10^{-5} \overline{QS} + 8,815 \times 10^{-3}$
	$L_{z_0} = 19,660 \times 10^{-3}$	$L_z = -5,623 \times 10^{-5} \overline{QS} + 1,921 \times 10^{-2}$

Para a difusividade variável, as otimizações foram realizadas utilizando-se uma malha com $15 \times 15 \times 25$ volumes de controle e 1000 passos no tempo.

As dezenove funções apresentadas na Tabela 3.1 para a difusividade variável, foram testadas para representarem a difusividade de massa, no estudo da transferência de água durante a desidratação osmótica. O otimizador forneceu os valores dos parâmetros a e b , do qui-quadrado e dos indicadores estatísticos para cada um dos experimentos. Para efeito de comparação entre os resultados, o valor do qui-quadrado foi considerado o principal critério,

uma vez que os valores do coeficiente de determinação, na maioria dos casos, apresentam diferenças insignificantes.

As Tabelas 4.41 e 4.42 apresentam os parâmetros das cinco melhores funções, obtidas para representarem a difusividade de água para o Experimento 1 (40 °Brix e 40 °C) e Experimento 2 (60 °Brix e 40 °C), respectivamente, em que Φ indica o percentual da quantidade de água.

Tabela 4.41: Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de água para o Experimento 1.

Índice	D_A	a	b ($m^2 \text{ min}^{-1}$)	χ^2	R^2
9	$a \cdot \Phi^{1/2} + b$	$1,360 \times 10^{-9}$	$-2,288 \times 10^{-9}$	12,879	0,9934
19	$a / \Phi^{1/2} + b$	$-1,457 \times 10^{-7}$	$2,660 \times 10^{-8}$	12,943	0,9935
6	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^2)$	$6,364 \times 10^{-5}$	$6,529 \times 10^{-9}$	12,977	0,9934
15	$b \cdot \cosh(a \cdot \Phi^2)$	$-1,030 \times 10^{-4}$	$7,840 \times 10^{-9}$	12,985	0,9934
16	$b / \cosh(a \cdot \Phi)$	$-2,989 \times 10^{-8}$	$9,180 \times 10^{-9}$	13,018	0,9934

Tabela 4.42: Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de água para o Experimento 2.

Índice	D_A	a	b ($m^2 \text{ min}^{-1}$)	χ^2	R^2
3	$a \cdot \Phi^2 + b$	$1,558 \times 10^{-12}$	$1,174 \times 10^{-8}$	6,978	0,9983
7	$b \cdot \cosh(a \cdot \Phi)$	$-2,331 \times 10^{-2}$	$6,266 \times 10^{-9}$	7,771	0,9981
14	$b \cdot \cosh(a \cdot \Phi^{1/2})$	$-4,138 \times 10^{-2}$	$5,555 \times 10^{-9}$	7,773	0,9981
6	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^2)$	$1,616 \times 10^{-4}$	$6,930 \times 10^{-9}$	7,852	0,9980
10	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^{1/2})$	0,279	$1,608 \times 10^{-9}$	8,081	0,9981

De forma análoga, a Tabela 4.43 expõe os cinco melhores resultados obtidos para a difusividade de água, referentes ao Experimento 3 (40 °Brix e 60 °C).

Tabela 4.43: Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de água para o Experimento 3.

Índice	D_A	a	b ($m^2 \text{ min}^{-1}$)	χ^2	R^2
4	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi)$	$1,736 \times 10^{-2}$	$6,158 \times 10^{-9}$	6,954	0,9983
3	$a \cdot \Phi^2 + b$	$2,519 \times 10^{-12}$	$8,434 \times 10^{-9}$	6,956	0,9983
7	$b \cdot \cosh(a \cdot \Phi)$	$-2,186 \times 10^{-2}$	$8,620 \times 10^{-9}$	7,035	0,9982
6	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^2)$	$1,202 \times 10^{-4}$	$1,102 \times 10^{-8}$	7,075	0,9983
10	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^{1/2})$	0,212	$3,457 \times 10^{-9}$	7,327	0,9984

De modo semelhante, foram obtidos os parâmetros para as funções que representam a difusividade de água para o Experimento 4. A Tabela 4.44 mostra os cinco melhores resultados.

Tabela 4.44: Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de água para o Experimento 4.

Índice	D_A	a	b ($m^2 \text{ min}^{-1}$)	χ^2	R^2
6	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^2)$	$1,737 \times 10^{-4}$	$1,084 \times 10^{-8}$	13,614	0,9979
7	$b \cdot \cosh(a \cdot \Phi)$	$-2,390 \times 10^{-2}$	$9,745 \times 10^{-9}$	14,035	0,9978
4	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi)$	$1,963 \times 10^{-2}$	$6,853 \times 10^{-9}$	14,330	0,9977
3	$a \cdot \Phi^2 + b$	$3,903 \times 10^{-12}$	$8,645 \times 10^{-9}$	14,439	0,9977
10	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^{1/2})$	0,266	$2,906 \times 10^{-9}$	14,903	0,9977

Observando-se as Tabelas 4.4 – 4.44, percebe-se que a função exponencial de índice 6 destaca-se entre as cinco melhores funções nos quatro experimentos, apresentando um melhor resultado em um deles. Comumente encontra-se na literatura a difusividade de massa de água

sendo representada por meio de variações da função exponencial (SILVA C., 2012; SILVA et al., 2012; PORCIUNCULA et al., 2013; AIRES, 2015).

Para a difusividade de sacarose, o mesmo procedimento foi adotado. No entanto, dentre as funções apresentadas na Tabela 3.1, as expressões de índices 5, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 19 e 20, não foram testadas, por uma restrição de seus domínios, uma vez que a quantidade de sacarose tem valor igual à zero no início do processo.

As Tabelas 4.45–4.48 apresentam os cinco melhores resultados para cada um dos experimentos, tomando o valor do qui-quadrado como principal parâmetro de comparação, em que Φ representa a quantidade de sacarose.

Tabela 4.45: Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de sacarose para o Experimento 1.

Índice	D_S	a	b ($m^2 \min^{-1}$)	χ^2	R^2
16	$b/\cosh(a \cdot \Phi)$	$1,944 \times 10^{-2}$	$9,191 \times 10^{-9}$	42,941	0,9900
6	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^2)$	$-1,496 \times 10^{-4}$	$8,951 \times 10^{-9}$	43,008	0,9900
17	$b/\cosh(a \cdot \Phi^{1/2})$	0,183	$1,159 \times 10^{-8}$	43,101	0,9899
18	$b/\cosh(a \cdot \Phi^2)$	$2,741 \times 10^{-4}$	$8,041 \times 10^{-9}$	43,249	0,9899
10	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^{1/2})$	-0,135	$1,523 \times 10^{-8}$	43,348	0,9899

Tabela 4.46: Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de sacarose para o Experimento 2.

Índice	D_S	a	b ($m^2 \min^{-1}$)	χ^2	R^2
10	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^{1/2})$	-0,2927	$6,510 \times 10^{-8}$	38,850	0,9919
17	$b/\cosh(a \cdot \Phi^{1/2})$	0,372	$5,605 \times 10^{-8}$	41,653	0,9914
4	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi)$	$-3,040 \times 10^{-2}$	$3,889 \times 10^{-8}$	42,392	0,9911
9	$a \cdot \Phi^{1/2} + b$	$-3,529 \times 10^{-9}$	$3,418 \times 10^{-9}$	43,119	0,9912
16	$b/\cosh(a \cdot \Phi)$	$3,625 \times 10^{-2}$	$2,778 \times 10^{-8}$	44,417	0,9908

Tabela 4.47: Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de sacarose para o Experimento 3.

Índice	D_S	a	b ($m^2 \text{ min}^{-1}$)	χ^2	R^2
10	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^{1/2})$	-0,3673	$1,069 \times 10^{-7}$	14,314	0,9971
17	$b / \cosh(a \cdot \Phi^{1/2})$	0,4465	$9,613 \times 10^{-8}$	15,275	0,9967
4	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi)$	$-4,271 \times 10^{-2}$	$7,257 \times 10^{-8}$	20,936	0,9958
16	$b / \cosh(a \cdot \Phi)$	$4,739 \times 10^{-2}$	$4,822 \times 10^{-8}$	25,272	0,9949
6	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^2)$	$-4,856 \times 10^{-4}$	$3,432 \times 10^{-8}$	28,281	0,9944

Tabela 4.48: Os cinco melhores valores obtidos para os parâmetros de processo relativos à difusividade de sacarose para o Experimento 4.

Índice	D_S	a	b ($m^2 \text{ min}^{-1}$)	χ^2	R^2
17	$b / \cosh(a \cdot \Phi^{1/2})$	0,418	$1,138 \times 10^{-7}$	4,591	0,9993
6	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^2)$	$-3,996 \times 10^{-4}$	$4,591 \times 10^{-8}$	4,915	0,9980
10	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi^{1/2})$	-0,335	$1,223 \times 10^{-7}$	5,975	0,9991
4	$b \cdot \exp(a \cdot \Phi)$	$-3,816 \times 10^{-2}$	$9,125 \times 10^{-8}$	6,375	0,9991
16	$b / \cosh(a \cdot \Phi)$	$4,476 \times 10^{-2}$	$6,916 \times 10^{-8}$	9,709	0,9987

Analisando-se as Tabelas 4.45–4.48 constata-se que a função de índice 17, envolvendo o cosseno hiperbólico, encontra-se entre as cinco melhores em todos os experimentos. Uma variação da referida função também foi encontrada por Aires (2015) para representar a difusividade de sacarose na desidratação osmótica de maçã. Portanto, as otimizações realizadas utilizando-se o modelo 2, resultaram nas expressões para as

difusividades de massa de água e sacarose mostradas nas Equações (4.9) e (4.10), respectivamente.

$$D_A = b \cdot \exp(a \cdot QA^2) \quad (4.9)$$

$$D_S = b / \cosh(a \cdot QS^{1/2}) \quad (4.10)$$

Os valores dos parâmetros a e b , presentes na Equação (4.9) estão expostos na Tabela 4.49, que mostra também os respectivos valores dos qui-quadrados, dos coeficientes de determinação e o erro percentual.

Tabela 4.49: Parâmetros relativos à difusividade de água.

Difusividade de água: $D_A = b \cdot \exp(a \cdot QA^2)$				
Experimento	$a \times 10^4$	$b \times 10^9$ ($m^2 \min^{-1}$)	χ^2	R^2
1 (40 °Brix, 40 °C)	0,636	6,529	12,977	0,9934
2 (60 °Brix, 40 °C)	1,616	6,930	7,852	0,9980
3 (40 °Brix, 60 °C)	1,202	11,020	7,075	0,9983
4 (60 °Brix, 60 °C)	1,737	10,840	13,614	0,9979

A Tabela 4.50 mostra os valores encontrados para os parâmetros a e b , presentes na Equação (4.10), relativos à difusividade de sacarose.

Tabela 4.50: Parâmetros relativos à difusividade de sacarose.

Difusividade de sacarose: $D_S = b / \cosh(a \cdot QS^{1/2})$				
Experimento	a	$b \times 10^8$ ($m^2 \min^{-1}$)	χ^2	R^2
1 (40 °Brix, 40 °C)	0,183	1,159	43,101	0,9899
2 (60 °Brix, 40 °C)	0,372	5,605	41,653	0,9914
3 (40 °Brix, 60 °C)	0,4465	9,613	15,275	0,9967
4 (60 °Brix, 60 °C)	0,418	11,380	4,591	0,9993

A Figura 4.53 mostra a superposição dos gráficos relativos às difusividades de massa de água e sacarose.

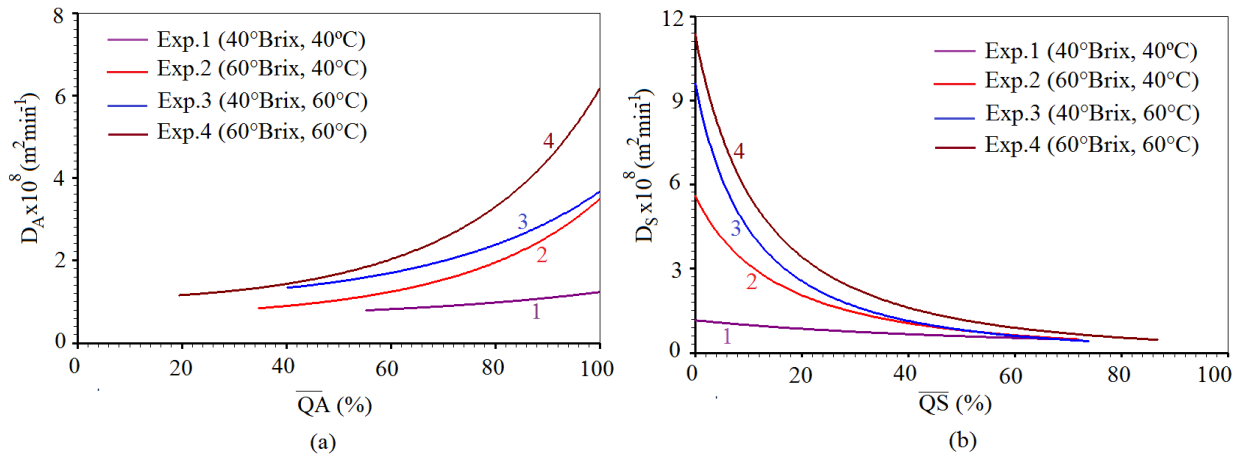


Figura 4.53: Superposição das funções que representam às difusividades efetivas de massa relativas à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

Estudos apontam que a difusividade de massa na desidratação osmótica é maior no período inicial e que tende a decrescer ao longo do processo (MOREIRA e SERENO, 2003; ZÚÑIGA e PREDESHI, 2011; AMINZADEH et al., 2012). Observando-se a Figura 4.53(a) percebe-se que há coerência com a situação física, uma vez que a difusividade de água é representada por uma função crescente, indicando que à medida que o alimento perde água, a difusividade diminui. Vale ressaltar que no início do processo, o alimento possui 100% da quantidade de água e, no decorrer do fenômeno, este percentual é reduzido, e como mostra a Figura 4.53(a), a difusividade teve o mesmo comportamento. Por outro lado, a função que representa a difusividade de sacarose é decrescente, para todos os experimentos. Este resultado aponta que à proporção que o alimento incorpora soluto, a difusividade decresce. Resultados semelhantes são encontrados na literatura (SILVA et al., 2014c; AIRES, 2015; SILVA JUNIOR, 2015).

Uma inspeção na Figura 4.53 permite concluir que tanto a temperatura como a concentração influencia no fenômeno. Comparando-se os Experimentos 1 e 2, ambos com temperatura de 40 °C, nota-se que o aumento da concentração provoca um acréscimo na difusividade. O mesmo ocorre com os Experimentos 3 e 4, com temperatura de 60 °C. Resultado similar foi encontrado por Aminzadeh et al. (2012) na desidratação osmótica de melão. Por outro lado, confrontando-se os Experimentos 1 e 3, ambos com concentração de 40 °Brix, tem-se que o aumento da temperatura resulta em uma maior transferência de massa,

tanto de água como de sacarose. O mesmo ocorre para os Experimentos 2 e 4, com concentrações de 60 °Brix. Mavroudis et al. (2012) concluíram que houve uma maior perda de água e um superior ganho de soluto com o aumento da temperatura, na desidratação osmótica de maçã.

Com o intuito de complementar a análise, a difusividade média foi calculada e seu gráfico foi plotado no mesmo sistema de eixos que o gráfico que representa a difusividade em função dos valores locais da grandeza de interesse, para cada um dos experimentos, como mostram as Figuras 4.54 – 4.57.

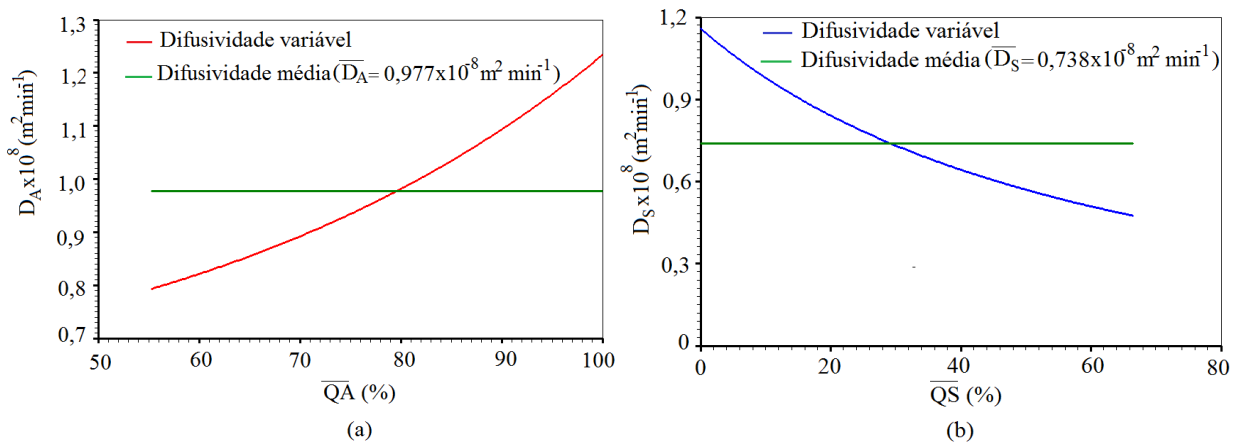


Figura 4.54: Difusividades efetivas médias e difusividades efetivas de massa em função dos valores locais das quantidades de: (a) água; (b) sacarose, obtidas para o Experimento 1 (40 °Brix, 40 °C).

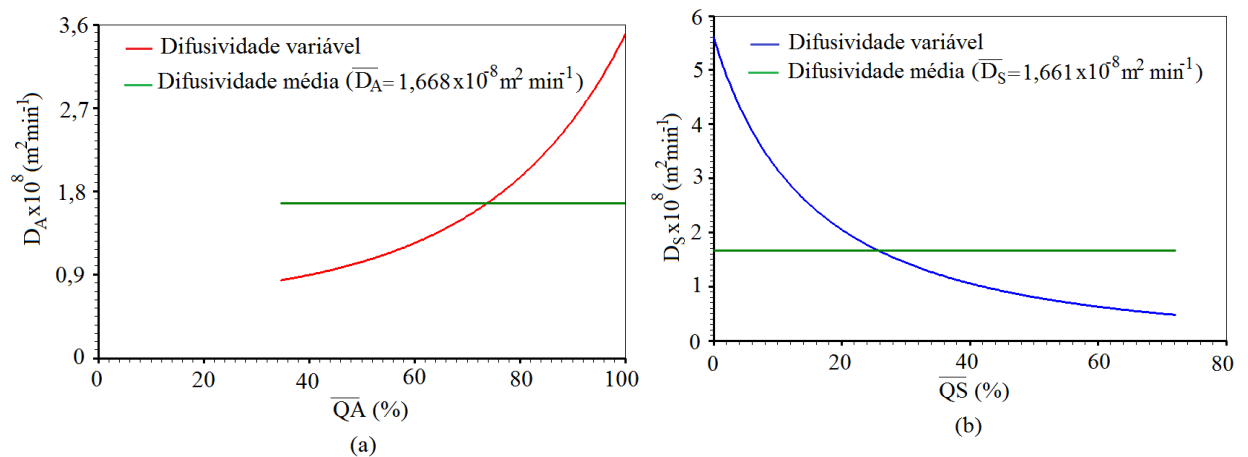


Figura 4.55: Difusividades efetivas médias e difusividades efetivas de massa em função dos valores locais das quantidades de: (a) água; (b) sacarose, obtidas para o Experimento 2 (60 °Brix, 40 °C).

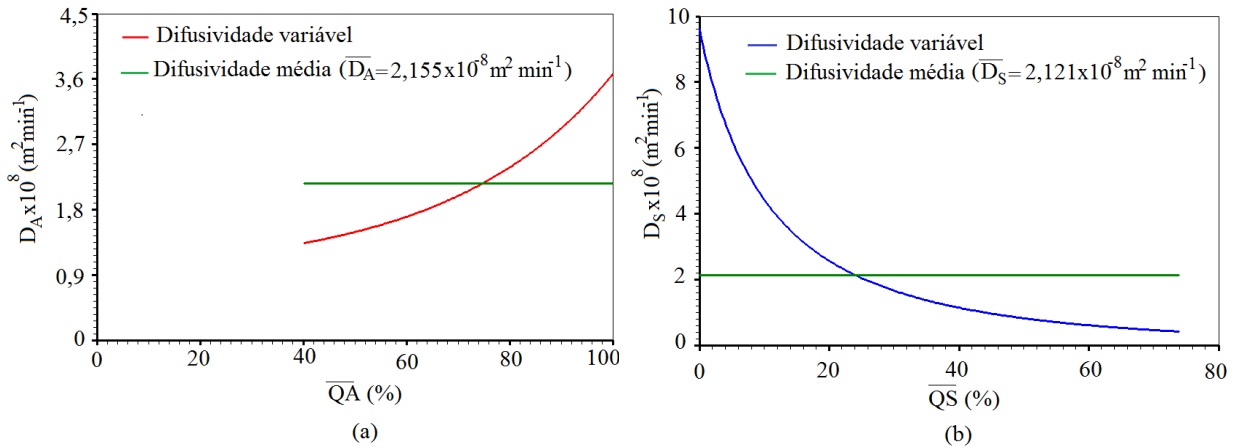


Figura 4.56: Difusividades efetivas médias e difusividades efetivas de massa em função dos valores locais das quantidades de: (a) água; (b) sacarose, obtidas para o Experimento 3 (40 °Brix, 60 °C).

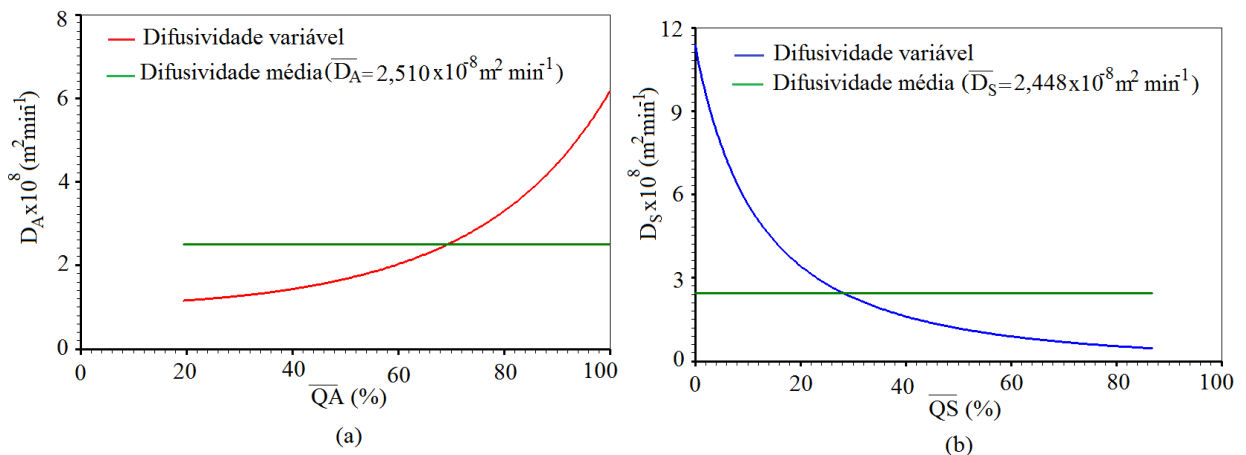


Figura 4.57: Difusividades efetivas médias e difusividades efetivas de massa em função dos valores locais das quantidades de: (a) água; (b) sacarose, obtidas para o Experimento 4 (60 °Brix, 60 °C).

De acordo com as Figuras 4.54–4.57, a difusividade média de sacarose é menor que a difusividade média de água em todos os casos. Resultado equivalente é encontrado em outras pesquisas (RODRIGUES e MAURO, 2008; DEROSI et al., 2008; AZUARA et al., 2009; ALLALI et al., 2010; JAIN et al., 2011).

A perda de água e o ganho de sacarose aumentaram significativamente quando se comparam os Experimentos 1 e 3, ou seja, para a concentração do meio osmótico de 40 °Brix e com o aumento da temperatura de 40 °C para 60 °C. O aumento da difusividade média de água foi em torno de 120%, enquanto que a difusividade média de sacarose aumentou cerca de 187%. O aumento da concentração, por sua vez, foi mais influente quando a temperatura de

processo foi de 40 °C (Experimentos 1 e 2). Neste caso, a difusividade de água aumentou em torno de 70%, e a de sacarose, aproximadamente 125%. As menores mudanças ocorreram quando se comparam os Experimentos 3 e 4, ou seja, para a temperatura de 60 °C, e com aumento da concentração de 40 °Brix para 60 °Brix. Para este caso, o aumento da difusividade média de água foi próximo a 16%, e a de sacarose, em torno de 15%. Alguns estudos apontam que quando o alimento é imerso em um meio com alta concentração, o ganho de sólido pode reforçar a resistência da matriz sólida diminuindo a porosidade do tecido da fruta, causando uma maior resistência ao transporte de massa (MAVROUDIS et al., 2012). Na desidratação de fatias de maçã, Rodrigues e Mauro (2008) perceberam que o aumento da concentração ocasionou a diminuição da difusividade. Os autores conjecturaram que a dependência da difusividade sobre a concentração, parece ser significativamente afetada pelas mudanças estruturais do alimento.

De uma forma geral, pode-se afirmar que a temperatura foi preponderante em relação à concentração do meio osmótico, na transferência de massa, tanto de água como de sacarose. Fato análogo ao encontrado por Silva Junior (2015), na desidratação osmótica de banana. Outros autores obtiveram resultados equivalentes (MOREIRA e SERENO, 2003; DEROSSI et al., 2008; JAIN et al., 2011).

Para cada um dos experimentos, foram obtidas as cinéticas através dos parâmetros exibidos nas Tabelas 4.49 e 4.50 associados às respectivas expressões das difusividades (Equações (4.9) e (4.10)). A Figura 4.58 mostra a superposição entre a cinética fornecida pelo modelo 2 e os dados experimentais encontrados no Experimento 1 (40 °Brix e 40 °C).

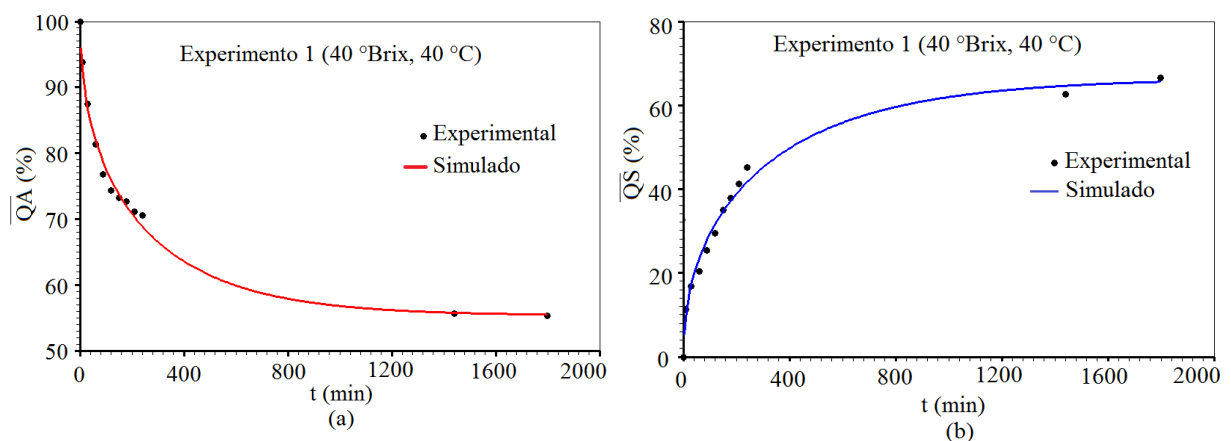


Figura 4.58: Superposição entre os dados experimentais e os resultados simulados obtidos através do modelo 2, relativos à quantidade de: (a) água; (b) sacarose, para o Experimento 1.

A superposição entre os dados experimentais e os resultados simulados para o Experimento 2 encontra-se na Figura 4.59.

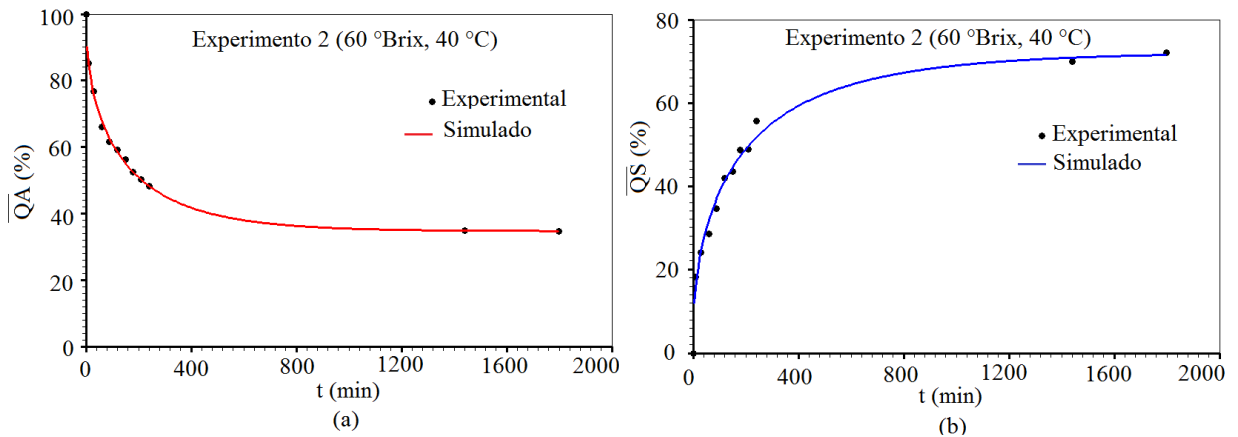


Figura 4.59: Superposição entre os dados experimentais e os resultados simulados obtidos usando-se o modelo 2 relativos à quantidade de: (a) água; (b) sacarose, para o Experimento 2.

A Figura 4.60 ilustra a superposição entre os pontos experimentais e a cinética obtida por simulação, através do modelo 2, para o Experimento 3.

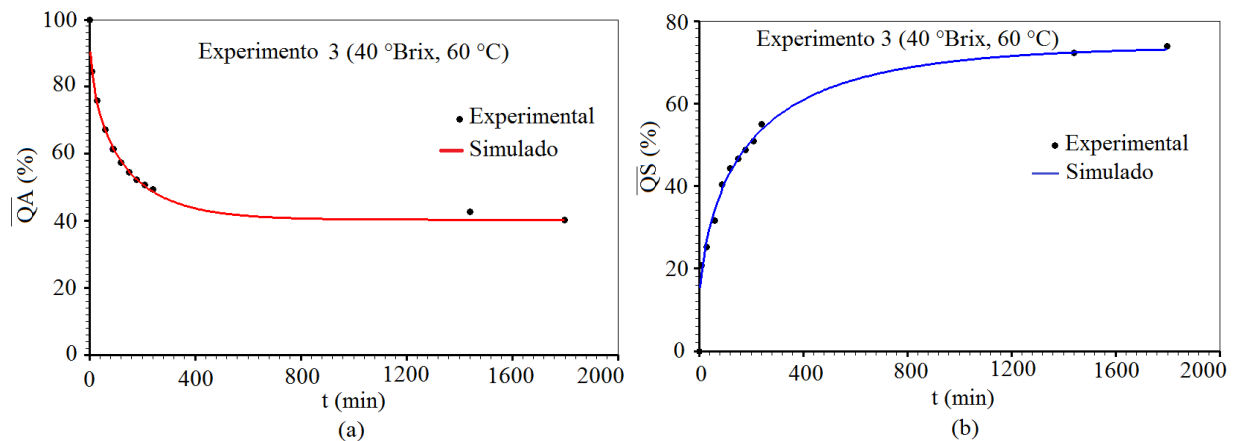


Figura 4.60: Superposição entre os dados experimentais e os resultados simulados obtidos usando-se o modelo 2 relativos à quantidade de: (a) água; (b) sacarose, para o Experimento 3.

Para o Experimento 4, a superposição entre os pontos experimentais e os resultados simulados está exposta na Figura 4.61.

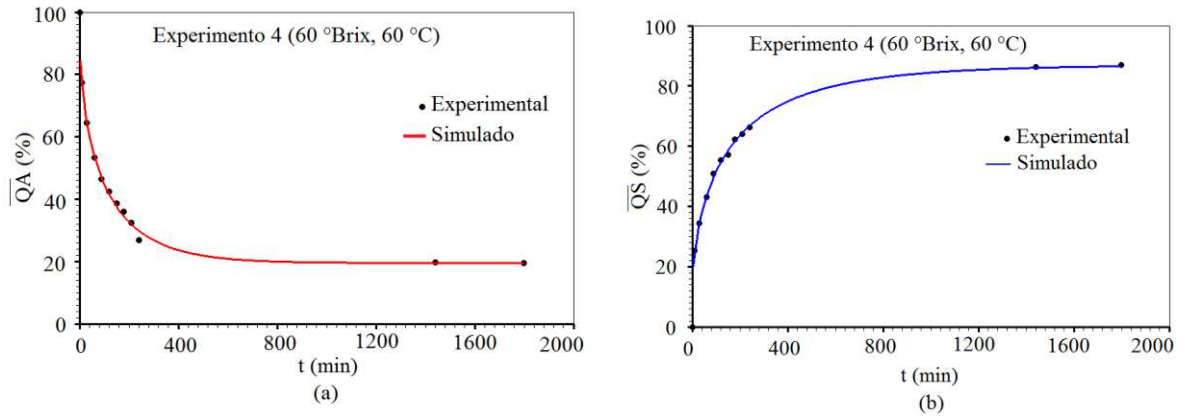


Figura 4.61: Superposição entre os dados experimentais e os resultados simulados obtidos usando-se o modelo 2, relativos à quantidade de: (a) água; (b) sacarose, para o Experimento 4.

Confrontando-se os valores mostrados nas Tabelas 4.36 e 4.37, obtidos com o uso do modelo 1, com os valores presentes nas Tabelas 4.49 e 4.50, resultados do uso do modelo 2, percebe-se que os valores obtidos para o qui-quadrado diminuíram sensivelmente nos experimentos relativos ao ganho de sacarose quando o modelo 2 foi utilizado, enquanto que, para a perda de água, houve uma discreta diminuição em dois dos experimentos.

As Figuras 4.62 – 4.65 mostram a superposição entre os gráficos das cinéticas obtidas para cada experimento, utilizando-se os modelos 1 e 2.

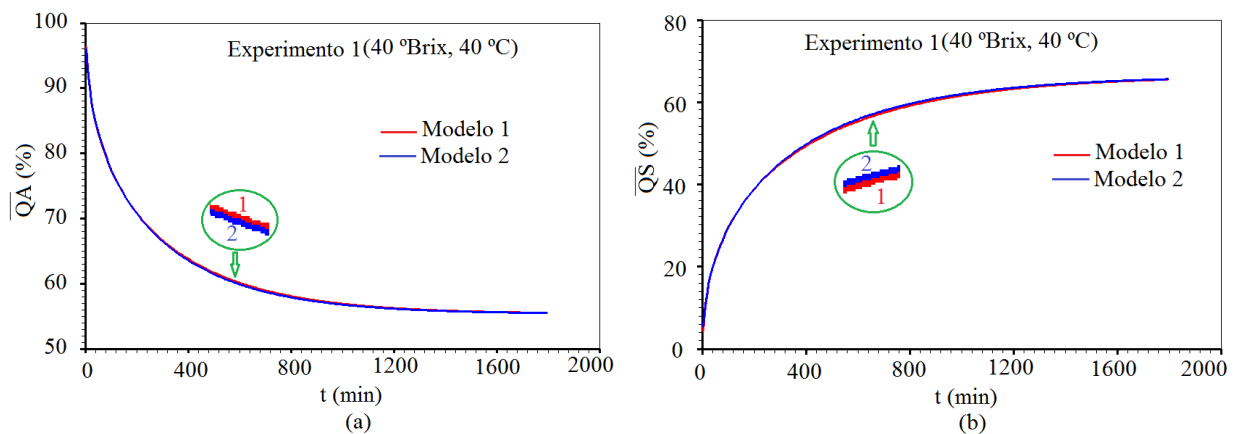


Figura 4.62: Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para o Experimento 1, através dos modelos 1 e 2, referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

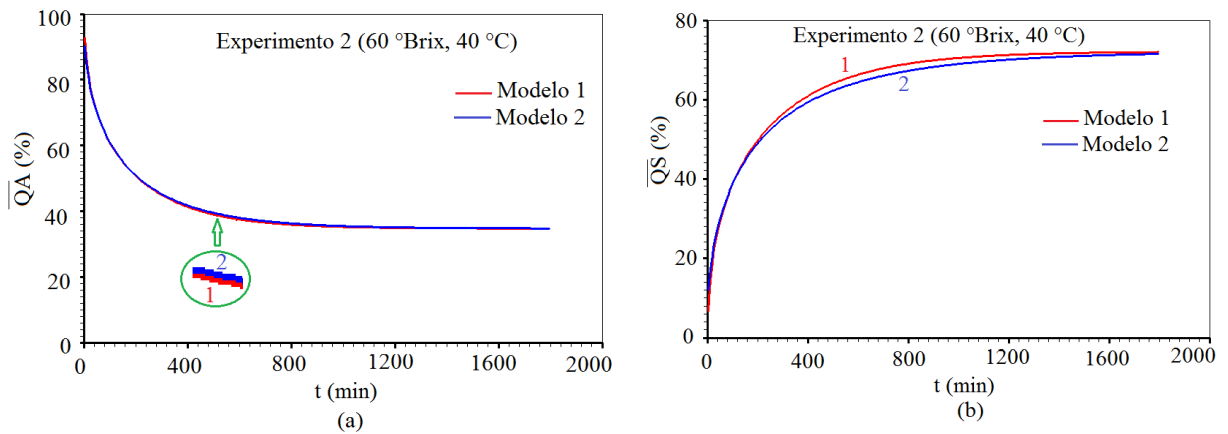


Figura 4.63: Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para o Experimento 2, através dos modelos 1 e 2, referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

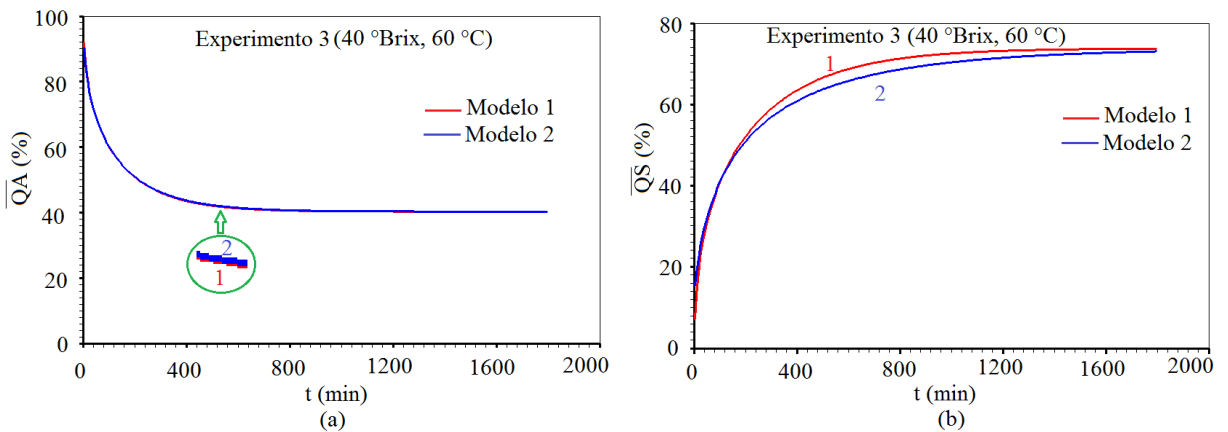


Figura 4.64: Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para o Experimento 3, através dos modelos 1 e 2, referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

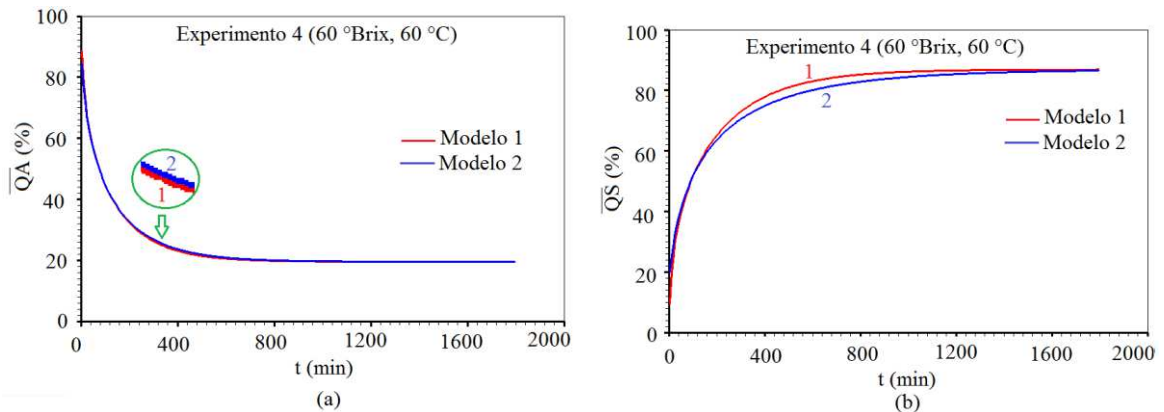


Figura 4.65: Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para o Experimento 4, através dos modelos 1 e 2, referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

Para a quantidade de sacarose, houve uma melhora significativa quando se aplica o modelo 2, como atestam as Figuras 4.62 – 4.65. No entanto, as referidas figuras confirmam que a diferença entre os resultados obtidos para a quantidade de água, com o uso dos modelos 1 e 2, é insignificante, sugerindo a equivalência dos modelos. Silva et al. (2014c) em sua pesquisa envolvendo a desidratação osmótica de goiaba, encontraram resultado semelhante. Os autores conjecturaram que o fato de se desconsiderar o encolhimento e a variação da difusividade, geram dois erros que se anulam mutuamente. É uma hipótese satisfatória, tendo em vista que é notória a existência de variação das dimensões e da difusividade. As Tabelas A.2, A.4, A.6 e A.8, no Apêndice do presente trabalho, mostram, nitidamente, a variação volumétrica dos pedaços de maçã ao longo do processo. Na Tabela A.8, mais especificamente, tem-se que a dimensão L_x reduziu cerca de 47% em relação à medida inicial. Por outro lado, segundo Aminzadeh et al.(2012), as taxas de ganho de soluto e de perda de água são maiores no início do processo de desidratação osmótica, devido, provavelmente, as alterações estruturais que conduzem ao encolhimento do produto e afetam, conseqüentemente, a difusividade de massa. Desta forma, considerar a difusividade constante também é incompatível com a situação física do processo. Diante do exposto, apesar do modelo 1 ter apresentado bons resultados, o modelo 2 é considerado mais condizente com a realidade vivenciada no estudo da desidratação osmótica de maçã na presente pesquisa.

As Figuras 4.66 e 4.67 mostram a superposição das cinéticas obtidas através do modelo 2, fixando-se a temperatura e aumentando-se a concentração do meio osmótico.

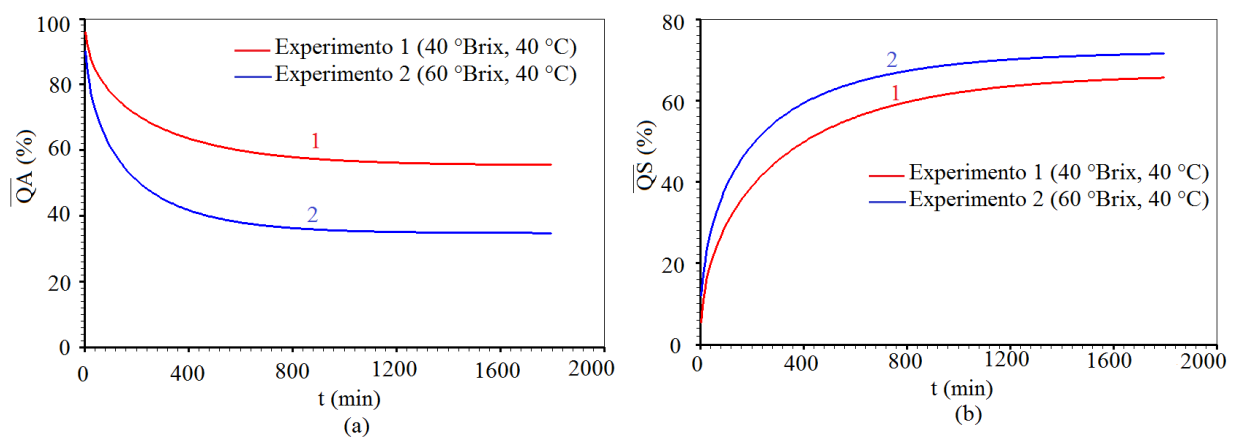


Figura 4.66: Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para a temperatura de 40 °C e concentrações de 40 e 60 °Brix referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

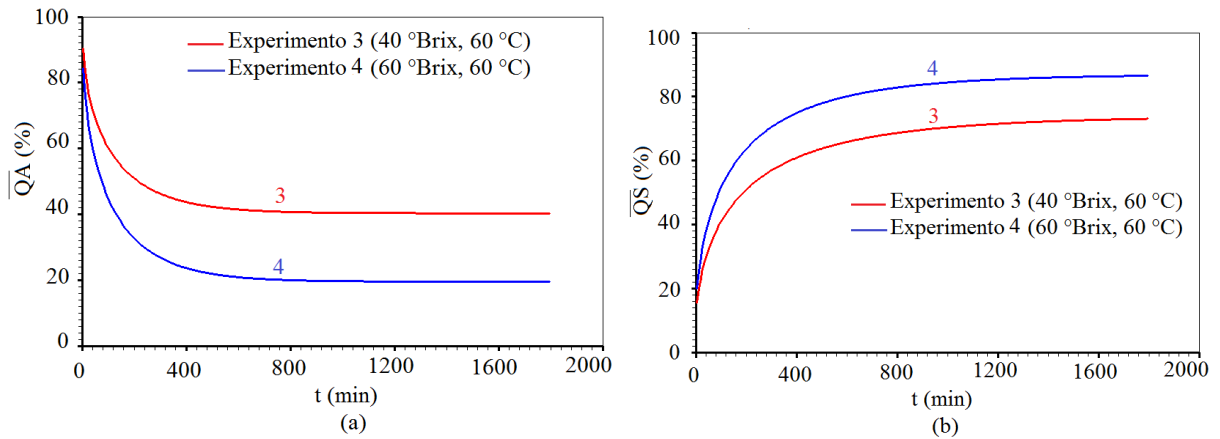


Figura 4.67: Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para a temperatura de 60 °C e concentrações de 40 e 60 °Brix referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

Comparando-se às cinéticas apresentadas nas Figuras 4.66 e 4.67, percebe-se que para uma determinada temperatura, aumentando-se a concentração do meio osmótico, há um aumento na perda de água, como também, no ganho de sacarose, confirmando a influência da concentração da solução osmótica.

Por outro lado, fixando-se a concentração da solução osmótica e aumentando-se a temperatura de processo, nota-se que também há uma maior perda de água e um aumento na captação de sacarose, o que evidencia a influência da temperatura, como mostram as Figuras 4.68 e 4.69.

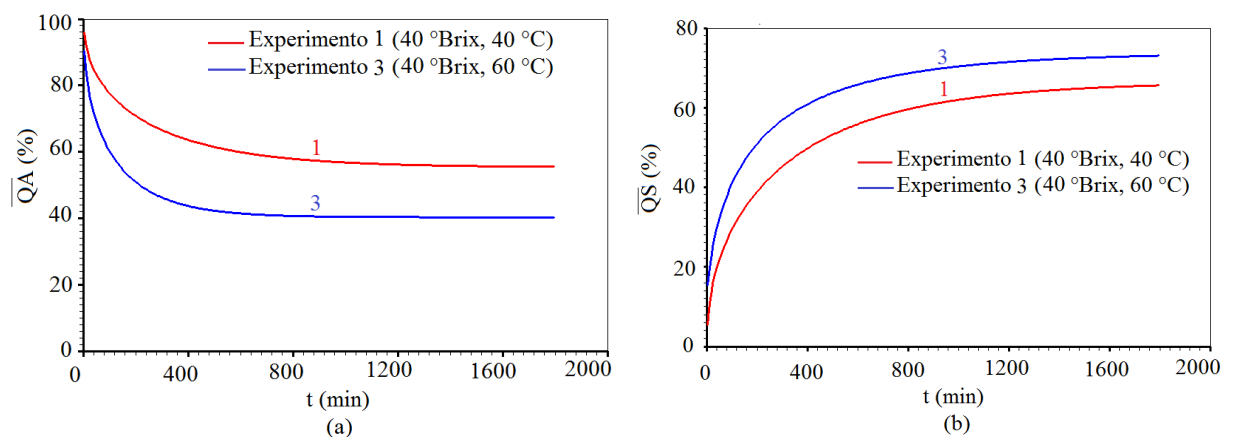


Figura 4.68: Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para a concentração de 40 °Brix e temperaturas de 40 e 60 °C referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

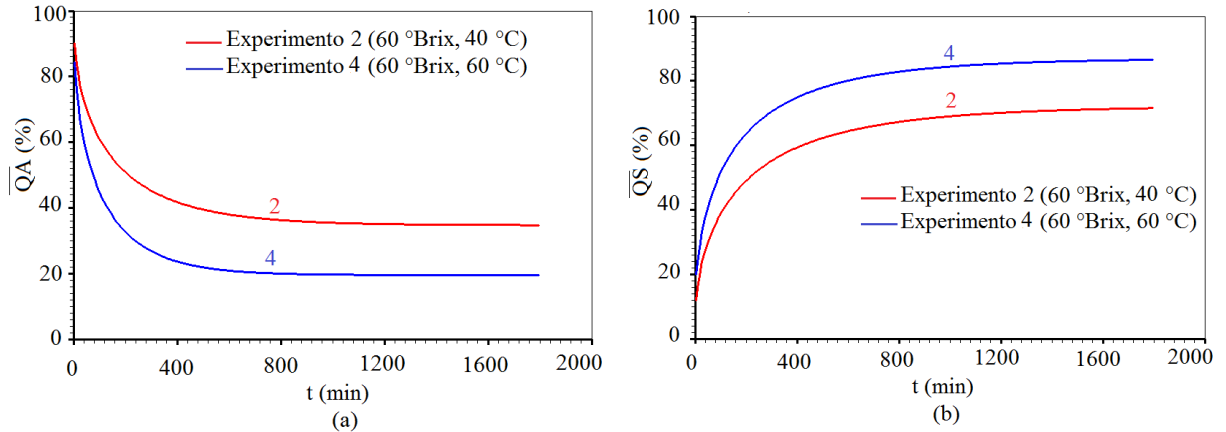


Figura 4.69: Superposição das cinéticas de desidratação osmótica obtidas para a concentração de 60 °Brix e temperaturas de 40 e 60 °C referentes à quantidade de: (a) água; (b) sacarose.

As análises realizadas possibilitam concluir que a hipótese de admitir a difusividade de massa variável e considerar o encolhimento do produto no estudo da desidratação osmótica, torna a pesquisa mais próxima da realidade. Os resultados mostraram a relevância da concentração e da temperatura no processo de desidratação osmótica, com um maior destaque para a atuação da temperatura.

Percebe-se também que as maiores taxas de transferência de água e sacarose ocorrem nas quatro primeiras horas de processo. Este resultado é cossonante com o relato de outros pesquisadores em trabalhos encontrados na literatura (ZÚÑIGA e PREDESCHI, 2011; AMINZADEH et al., 2012 ; KUMAR e SAGAR, 2012; AIRES, 2015).

No presente trabalho, as taxas de variação instantânea foram calculadas através da relação apresentada na Equação (4.11), utilizada também em AIRES (2015). Na mencionada equação, $\Delta\Phi$ representa a variação da grandeza de interesse (quantidade de água ou sacarose) e Δt , indica a variação no tempo.

$$\frac{d\Phi}{dt} \approx \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \left| \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_i}{t_{i+1} - t_i} \right| \quad (4.11)$$

As taxas de variação instantânea das grandezas de interesse foram analisadas em todos os experimentos e os resultados foram semelhantes. Como um exemplo, as Figuras 4.70 e 4.71 apresentam as superposições entre as cinéticas da quantidade de água e de sacarose, e os

gráficos que representam as taxas de variação das referidas grandezas, respectivamente, referentes ao Experimento 2.

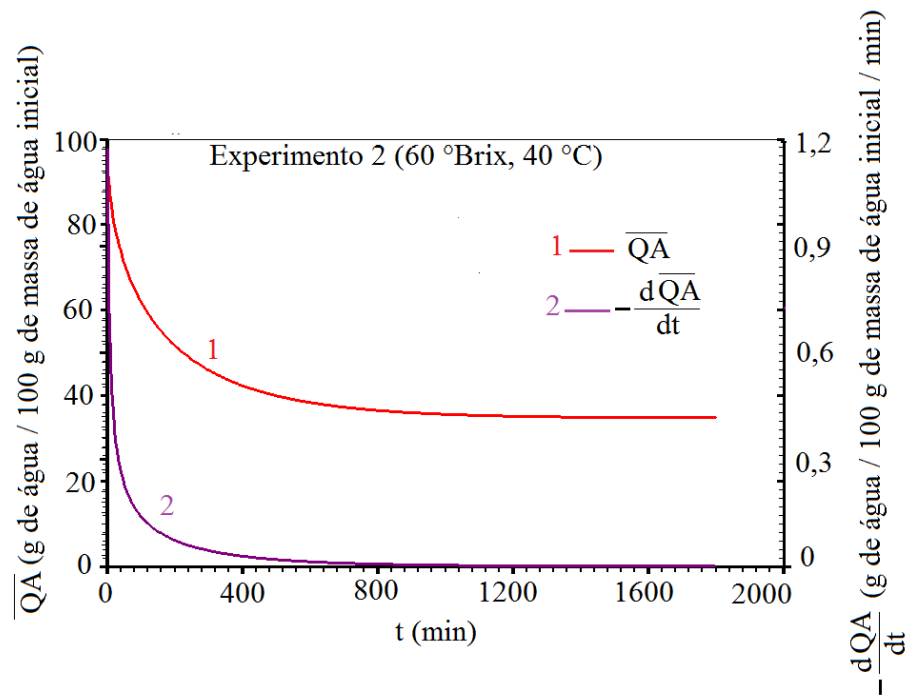


Figura 4.70: Superposição entre a cinética da quantidade de água e a taxa de variação instantânea, referente ao Experimento 2.

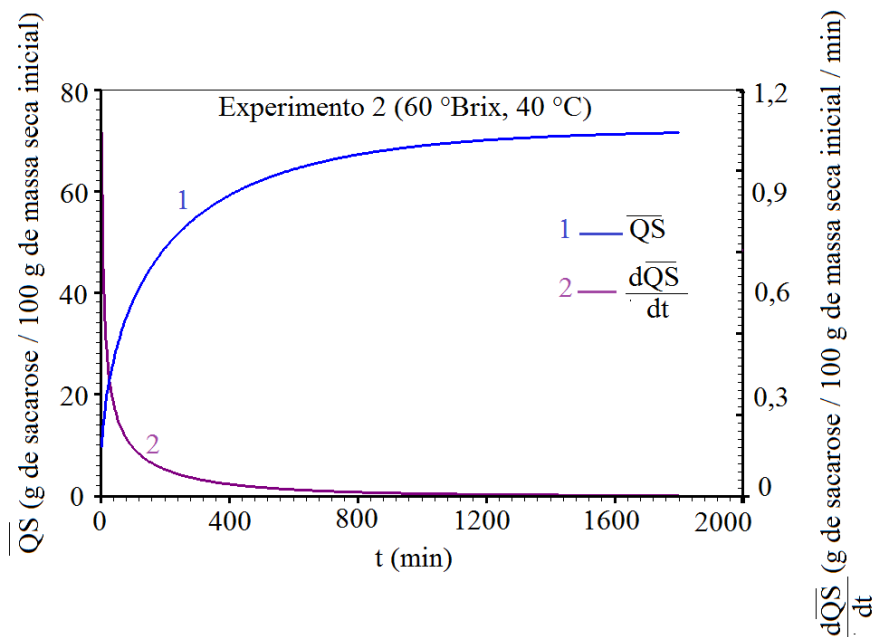


Figura 4.71: Superposição entre a cinética da quantidade de sacarose e a taxa de variação instantânea, referente ao Experimento 2.

4.3.5. A distribuição de água e sacarose no interior do produto: uma análise complementar

O principal objetivo do estudo realizado no presente trabalho consiste na descrição do transporte de massa de água e de sacarose, na desidratação osmótica de maçã, por meio de um modelo difusivo, usando-se o método dos volumes finitos. Tal modelo permite a análise do fenômeno em cada volume de controle, em determinados instantes, cuja escolha fica a critério do usuário.

O *software* Contour Plot (Silva, 2010), propicia uma análise visual da distribuição de massa no interior do produto em qualquer instante durante o processo, através de uma malha bidimensional do domínio.

Os resultados mostrados a seguir foram obtidos através de simulações aplicando-se o modelo 2, em uma malha de $31 \times 31 \times 45$ volumes de controle, sem a utilização da simetria, com 3600 estepes de tempo e um tempo total de 1800 minutos. Como já foi mencionado, o estudo foi realizado utilizando-se maçãs cortadas em forma de paralelepípedo, portanto, considerando-se um domínio cartesiano tridimensional. Para a aplicação do *software* Contour Plot, foram analisados planos verticais, paralelos ao plano xOy , como mostra a Figura 4.72, que não se apresenta em escala e destaca as superfícies utilizadas na inspeção da distribuição de água e sacarose.

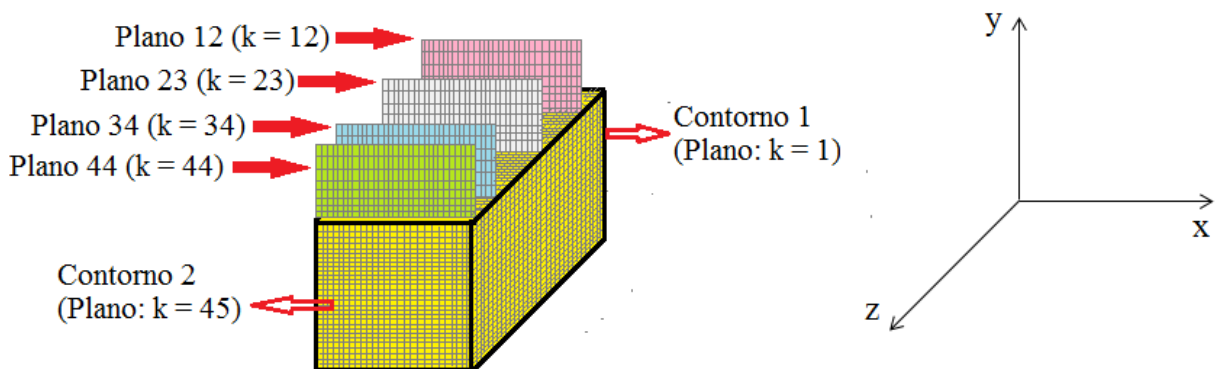


Figura 4.72: Domínio cartesiano tridimensional com destaque para os planos que contém os pontos nodais dos volumes de controle VC (i, j, k) cujas coordenadas k tem valores: $k = 12$, $k = 23$, $k = 34$ ou $k = 44$.

Vale ressaltar que a malha considerada na Figura 4.72 possui 45 planos verticais ao longo do eixo z , portanto, o valor de k varia de 1 a 45. De acordo com a referida figura, o

“Contorno 1” refere-se ao plano considerando-se $k = 1$, enquanto que, o “Contorno 2” equivale ao plano cujo valor da coordenada k é igual a 45. Considerando-se $k = 23$ tem-se o Plano 23, posicionado no centro do domínio. O Plano 12, obtido fazendo-se $k = 12$, é o décimo segundo plano em relação ao Contorno 1, ou seja, localiza-se à onze unidades do referido contorno e a onze unidades do plano central. A superfície obtida considerando-se $k = 34$, denotada por Plano 34, por sua vez, localiza-se a onze unidades do Contorno 2 do paralelepípedo e à onze unidades do plano central. Desta forma, tem-se que os Planos 12 e 34 são simétricos em relação ao centro do domínio. E finalmente, para $k = 44$, tem-se um plano adjacente ao Contorno 2, denominado de Plano 44.

É importante salientar que a opção pelas escolhas dos mencionados planos poderia ser diferente, sem comprometer o resultado da análise. Em particular, foram averiguadas as superfícies que contêm os pontos nodais dos volumes de controle do tipo: $VC(i, j, 12)$, $VC(i, j, 23)$, $VC(i, j, 34)$ e $VC(i, j, 44)$, respectivamente, com i e j variando de 1 a 31.

As análises realizadas consideraram diferentes perspectivas para cada um dos experimentos. Entretanto, com o intuito de evitar repetições, será mostrado apenas um resultado para cada experimento.

4.3.5.1. A distribuição de água

A Figura 4.73 mostra a evolução da distribuição de água no Plano 23, o qual é composto pelos pontos nodais dos volumes de controle do tipo $VC(i, j, 23)$, referente ao Experimento 1, nos instantes de 30, 60, 180, 240, 480 e 720 minutos.

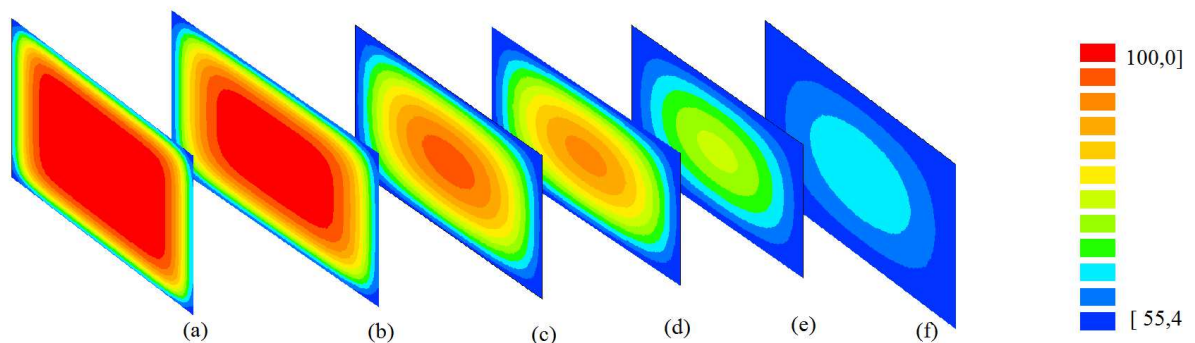


Figura 4.73: Distribuição da quantidade de água nos volumes de controle pertencentes ao Plano 23 nos instantes: (a) 30, (b) 60, (c) 180, (d) 240, (e) 480 e (f) 720 minutos, a partir do início do Experimento 1.

Observa-se que aos 60 minutos, os volumes de controle localizados “nos cantos” da superfície destacada já tinham atingido o equilíbrio e que, com 180 minutos de processo, nenhum volume de controle continha a quantidade de água inicial. Aos 720 minutos, os volumes localizados na região central da superfície ainda não tinham atingido a quantidade de água de equilíbrio, embora estivessem próximos. Percebe-se que o sentido do fluxo de água ocorre do centro para as extremidades. Resultado semelhante foi obtido Yildiz et al. (2016), na desidratação osmótica de fatias de maçã.

A Figura 4.74 mostra o comportamento da distribuição de água, no instante de 240 minutos, nos Planos 44, 34 e 23, cujos valores da coordenada k são: $k = 44$, $k = 34$ e $k = 23$, respectivamente, referentes ao Experimento 2.

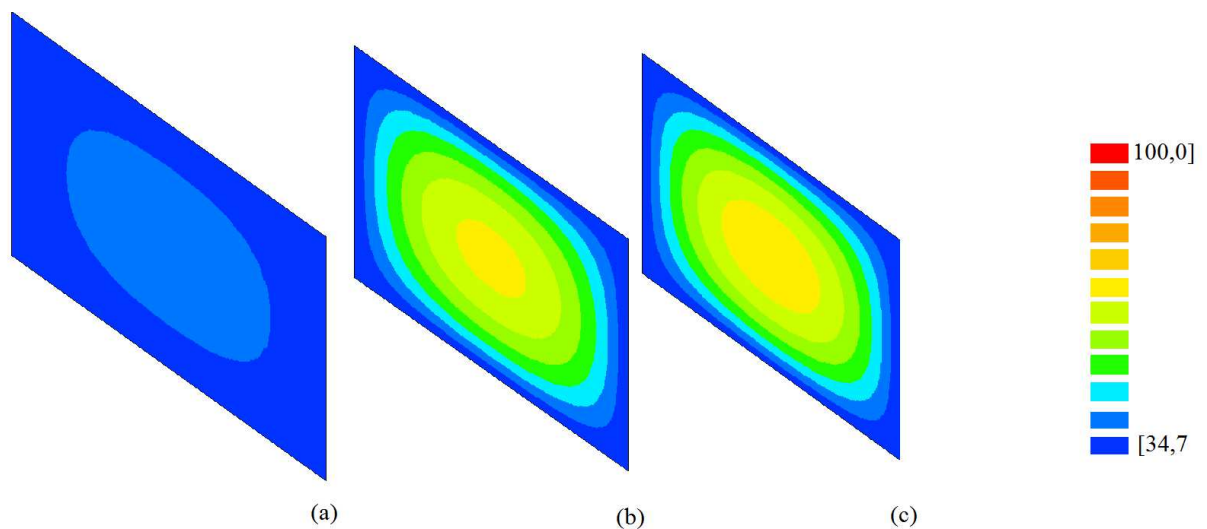


Figura 4.74: Distribuição da quantidade de água no instante de 240 min nos volumes de controle contidos no: (a) Plano 44, (b) Plano 34, (c) Plano 23, referente ao Experimento 2.

De acordo com a Figura 4.74, tem-se que os volumes de controle localizados mais próximos à superfície externa entram em equilíbrio mais rapidamente que os demais. O plano central contém mais água que os demais planos analisados.

Para o Experimento 3, a análise mostrada envolve o Plano 12, composto pelos pontos nodais dos volumes de controle do tipo $VC(i, j, 12)$. Desta superfície, são destacados os volumes de controle: $VC(1, 31, 12)$, $VC(31, 16, 12)$, $VC(16, 16, 12)$ e $VC(24, 16, 12)$, como mostra a Figura 4.75.

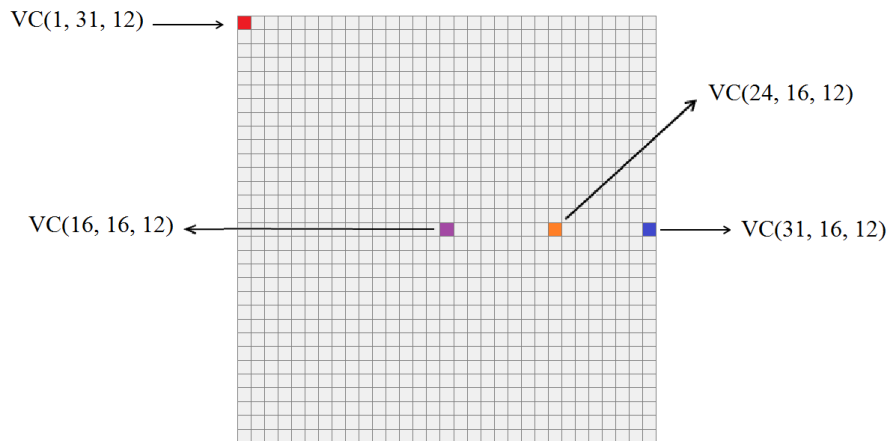


Figura 4.75: Malha utilizada no estudo da distribuição de água e sacarose no Plano 12, com destaque para quatro volumes de controle.

A Figura 4.76 mostra a distribuição de água no referido plano, para os instantes 30, 60, 180, 240, 480 e 720 minutos.

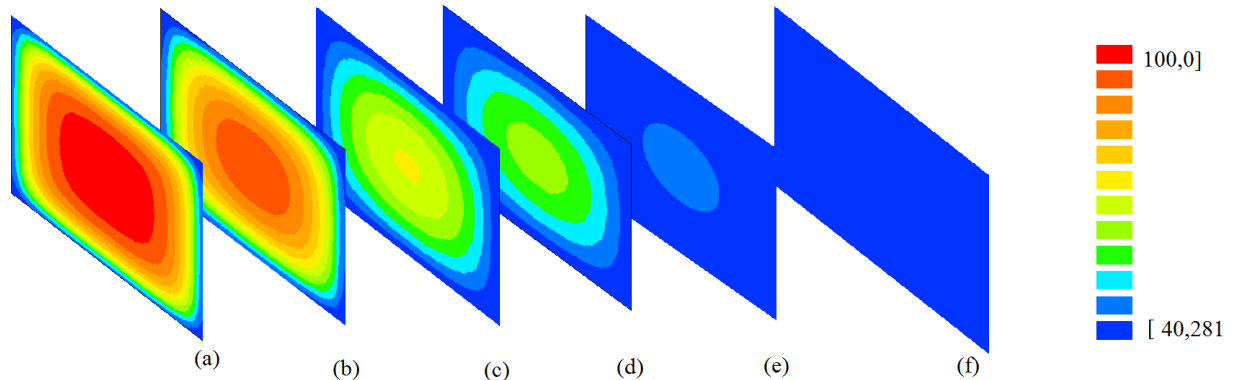


Figura 4.76: Distribuição da quantidade de água no Plano 12 nos instantes: (a) 30, (b) 60, (c) 180, (d) 240, (e) 480 e (f) 720 minutos, a partir do início do Experimento 3.

Observa-se que aos trinta minutos os volumes de controle localizados nos “cantos” da superfície destacada já atingiram a quantidade de água de equilíbrio. Aos 60 minutos, nenhum volume de controle continha a quantidade de água inicial. Com 480 minutos de processo, nota-se que apenas os volumes de controle localizados na região central não se encontram em equilíbrio. E aos 720 minutos, todos os volumes de controle se encontram com a quantidade de água de equilíbrio.

A Figura 4.77 mostra a evolução da quantidade de água nos volumes de controle: VC(1, 31, 12), VC(16, 16, 12), VC(24, 16, 12) e VC(31, 16, 12).

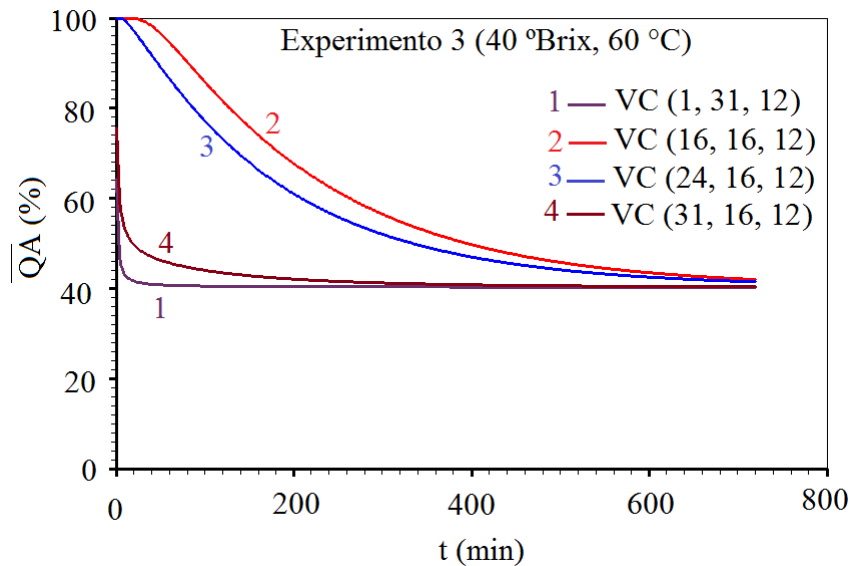


Figura 4.77: Evolução da quantidade de água nos volumes de controle VC(1, 31, 12), VC(16, 16, 12), VC(24, 16, 12) e VC(31, 16, 12) do início do Experimento 3, até o instante de 720 minutos.

A escolha por tais volumes de controle foi feita devido às suas posições na superfície. O volume de controle VC (1, 31, 12), tem contato com o meio externo através das faces oeste e norte, como mostra a Figura 4.75, ou seja, no “canto superior” do plano. Observa-se que este foi o que perdeu água e entrou em equilíbrio mais rapidamente, como mostram as Figuras 4.76 e 4.77. O VC (31, 16, 12), por sua vez, encontra-se em contato com o meio externo através da face leste. O referido volume de controle perdeu água de forma mais lenta que o anterior, porém, mais rápido que os demais. O volume VC (16, 16, 12) encontra-se na região central do plano. Nota-se que o mesmo, ao final de 480 minutos, ainda não tinha atingido a quantidade de água de equilíbrio, embora estivesse próximo. O VC (24, 16, 12) por sua vez, não tem contato com o meio externo e encontra-se em posição intermediária, como mostra a Figura 4.75. A perda de água também ocorreu de forma intermediária em relação à VC (16, 16, 12) e VC (31, 16, 12).

Para o Experimento 4, a análise foi feita considerando-se os Planos 12 e 34, simétricos em relação ao centro do domínio. A Figura 4.78 mostra a distribuição de água nos referidos planos nos instantes de 30, 60 e 180 minutos.

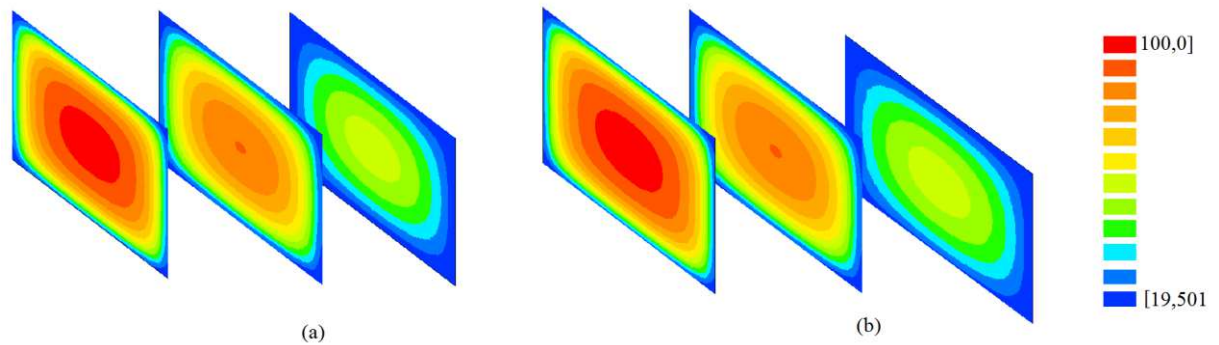


Figura 4.78: Distribuição da quantidade de água nos instantes de 30, 60 e 180 minutos a partir do início do Experimento 4 no: (a) Plano 12; (b) Plano 34.

A Figura 4.78 mostra que a distribuição de água nas superfícies destacadas ocorre de forma equivalente. Vale salientar que os referidos planos encontram-se em posições simétricas em relação ao centro do sólido. Este fato ratifica o conceito de simetria utilizado no presente trabalho, destacado nas Seções 3.1.8 e 4.2.4, e justifica mais uma vez, a sua utilização, tendo em vista às vantagens em relação à economia de tempo de execução, já mencionadas nas citadas seções.

4.3.5.2. A distribuição de sacarose

A Figura 4.79 representa a distribuição de sacarose no interior das frutas nos volumes de controle do tipo VC (i, j, 34), para o Experimento 1. Percebe-se que a absorção de sacarose ocorreu já no início do processo. Aos trinta minutos, os volumes de controle localizados nos “cantos” da superfície já continham um nível elevado de sacarose, sugerindo a ausência ou a pouca resistência ao transporte de massa, justificando a condição de contorno de primeiro tipo. De acordo com o ítem (d) da referida figura, com quatro horas de processo, já havia a presença de sacarose em todos os locais do plano analisado, com uma menor quantidade no centro do mesmo. Vale ressaltar que o fluxo de sacarose, ao contrário do que acontece com o fluxo de água, ocorre do exterior para o interior do produto.

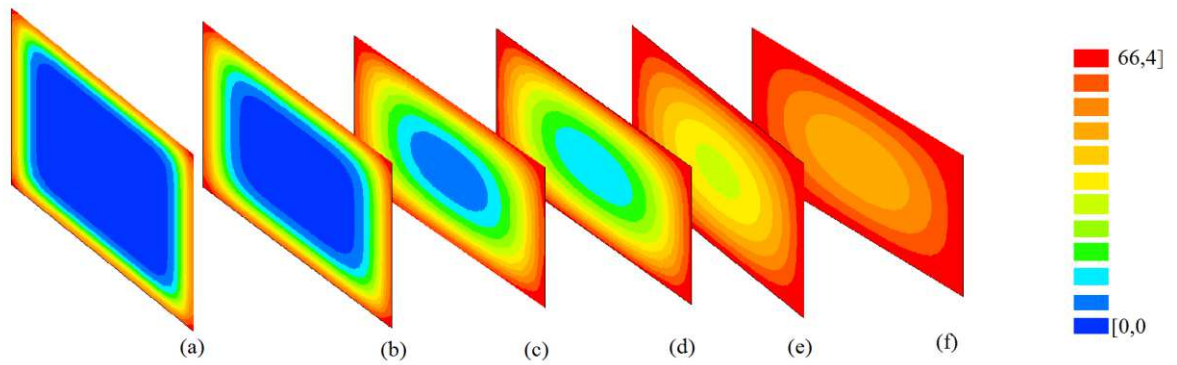


Figura 4.79: Distribuição da quantidade de sacarose nos volumes de controle pertencentes ao Plano 34 nos instantes: (a) 30, (b) 60, (c) 180, (d) 240, (e) 480 e (f) 720 minutos, a partir do início do Experimento 1.

A Figura 4.80 mostra a distribuição de sacarose aos 240 minutos a partir do início do Experimento 2 nos Planos 44, 34 e 23.

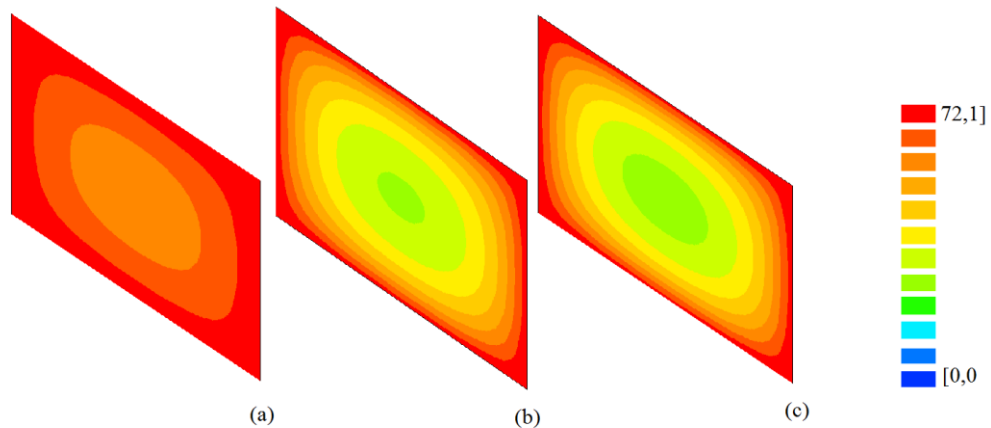


Figura 4.80: Distribuição da quantidade de sacarose no instante de 240 min nos volumes de controle contidos no: (a) Plano 44, (b) Plano 34, (c) Plano 23, referente ao Experimento 2.

O item (a) da referida figura mostra que aos 240 minutos os volumes de controle localizados no Plano 44, mais próximo ao meio externo, atingiram, em sua maioria, o valor de equilíbrio. Percebe-se que quanto mais próximo do centro da superfície o volume de controle se encontra, menos sacarose ele contém. Este fato se repete quando se comparam as três superfícies, ratificando a ideia existente de que o fluxo de sacarose ocorre da parte mais externa para o interior do produto. Percebe-se que o Plano 23, localizado no centro do domínio, contém menos sacarose do que os demais.

A Figura 4.81 mostra a distribuição de sacarose no Plano 12, para os instantes 30, 60, 180, 240, 480 e 720 minutos, referente ao Experimento 3.

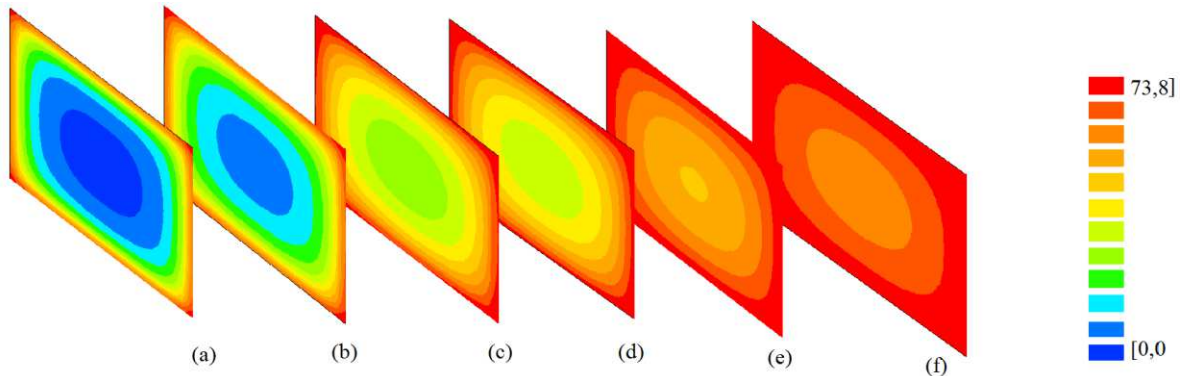


Figura 4.81: Distribuição da quantidade de sacarose no Plano 12 nos instantes: (a) 30, (b) 60, (c) 180, (d) 240, (e) 480 e (f) 720 minutos, a partir do início do Experimento 3.

Observa-se que aos 30 minutos já existia sacarose nos volumes de controle que têm contato com o meio externo. A captação de sacarose ocorreu de forma gradativa, com sentido do fluxo da parte mais externa para o interior do sólido. Ao contrário do que ocorreu com a quantidade de água, mostrada na Figura 4.76, aos 720 minutos, os volumes de controle localizados no centro da superfície ainda não tinha atingido o valor de equilíbrio.

A Figura 4.82 mostra a evolução da quantidade de sacarose nos quatro volumes de controle destacados na Figura 4.75.

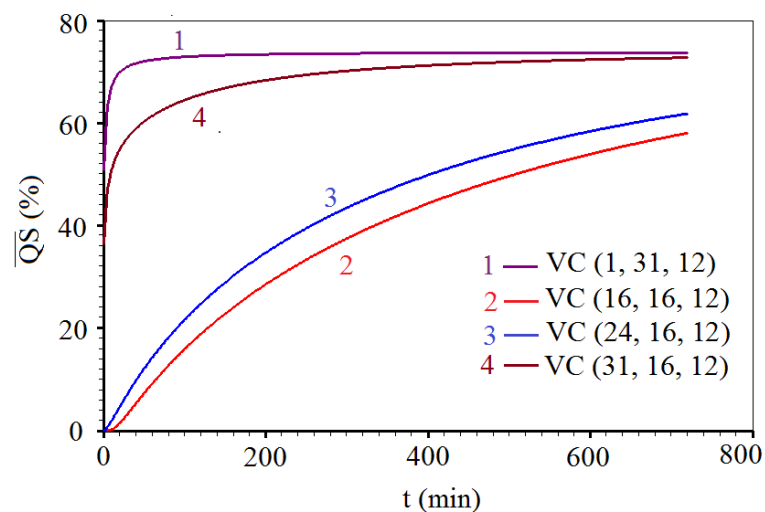


Figura 4.82: Evolução da quantidade de sacarose nos volumes de controle VC(1, 31, 12), VC(16, 16, 12), VC(24, 16, 12) e VC(31, 16, 12) do início do Experimento 3, até o instante de 720 minutos.

Comparando-se as Figuras 4.81 e 4.82 percebe-se uma nítida concordância entre as mesmas. Os volumes de controle que têm contato direto com a solução osmótica, VC (1, 31, 12) e VC (31, 16, 12), absorveram sacarose em maior quantidade em um menor tempo de processo, sendo mais elevada no VC (1, 31, 12) que contacta o meio externo através de duas faces (oeste e norte). Por outro lado, quanto mais próximo do centro se encontra o volume de controle, menos sacarose é incorporada. Nota-se que os volumes de controle VC (16, 16, 12) e VC (24, 16, 12), de fato, não atingiram a quantidade de sacarose de equilíbrio, ao final de 720 minutos.

A distribuição de sacarose nos Planos 12 e 34, nos instantes de 30, 60 e 180 minutos é exposta na Figura 4.83.

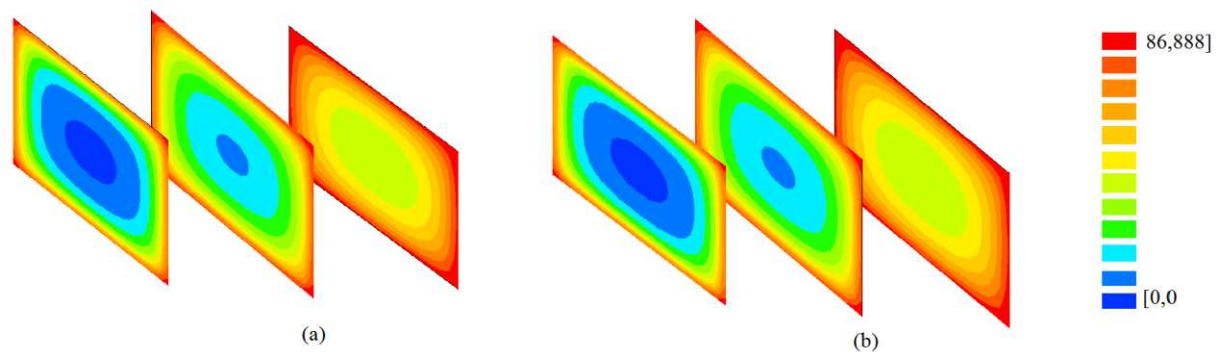


Figura 4.83: Distribuição da quantidade de sacarose nos instantes de 30, 60 e 180 minutos a partir do início do Experimento 4 no: (a) Plano 12; (b) Plano 34.

De forma análoga ao que ocorreu com a distribuição de água (Figura 4.78), a simetria existente entre as superfícies analisadas propiciou a equivalência da distribuição de sacarose nas mesmas. Percebe-se que já aos 30 minutos, os volumes de controle localizados nos “cantos” dos planos haviam absorvido sacarose. Aos 180 minutos, todos os volumes de controle continham certa quantidade de sacarose, com um nível mais baixo naqueles localizados na região central dos planos.

De uma forma geral, a análise das distribuições de água e sacarose correspondeu às expectativas quanto ao sentido dos fluxos e ao comportamento das quantidades de água e sacarose nas diferentes regiões dos planos analisados.

4.4. A secagem

Os experimentos de secagem de maçã, cortada em forma de paralelepípedo, foram realizados de acordo com a metodologia descrita na Seção 3.3.4 e nas condições operacionais mostradas na Tabela 3.3. A título de organização, os experimentos relativos à secagem têm a nomenclatura mostrada na Tabela 4.51.

Tabela 4.51: Nomenclatura e condições operacionais da secagem convectiva.

Experimento	Temperatura de secagem	Condições experimentais na DO
Sec1	40 °C	40 °Brix e 40 °C
Sec2	40 °C	60 °Brix e 40 °C
Sec3	60 °C	40 °Brix e 60 °C
Sec4	60 °C	60 °Brix e 60 °C

A Tabela 4.52 mostra as dimensões médias iniciais dos pedaços de maçã e o tempo de secagem, referentes a cada um dos experimentos realizados. As demais condições experimentais encontram-se na Seção B do Apêndice deste trabalho.

Tabela 4.52: Dados referentes aos experimentos de secagem convectiva de maçã.

Experimento	$L_{x_0} \times 10^3$ (m)	$L_{y_0} \times 10^3$ (m)	$L_{z_0} \times 10^3$ (m)	t_{eq} (min)
Sec1	7,79	6,66	17,82	950
Sec2	6,25	6,15	15,57	830
Sec3	6,83	6,21	15,52	710
Sec4	7,38	5,80	15,28	650

A Figura 4.84 mostra os gráficos das cinéticas dos teores de umidade adimensionais, X^* , referentes aos experimentos nomeados de Sec1 e Sec2, ambos realizados à temperatura de 40 °C.

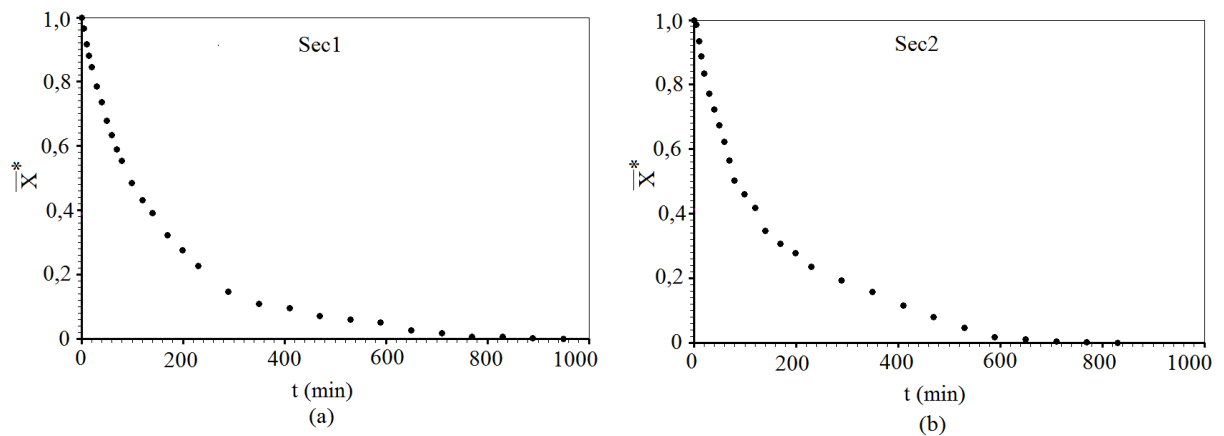


Figura 4.84: Cinéticas das secagens: (a) Sec1 (DO: 40 °Brix, 40 °C); (b) Sec2 (DO:60 °Brix, 40 °C), realizadas com temperaturas de 40 °C.

A Figura 4.85 mostra as cinéticas obtidas através da secagem realizada com temperatura de 60 °C.

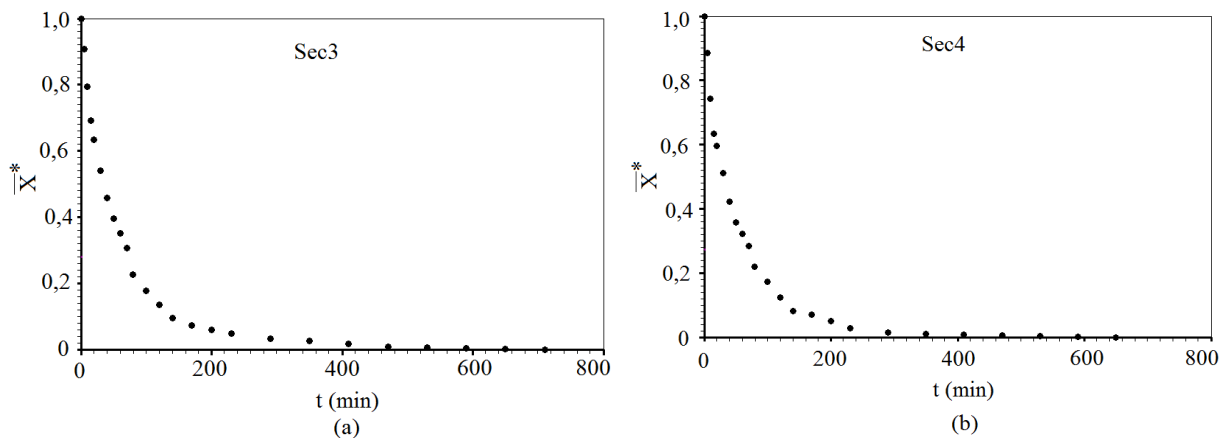


Figura 4.85: Cinéticas das secagens: (a) Sec3 (DO: 40 °Brix, 60 °C); (b) Sec4 (DO: 60 °Brix, 60 °C), realizadas com temperaturas de 60 °C.

As Figuras 4.84 e 4.85 mostram curvas características de secagem. Os tempos em que as amostras entraram em equilíbrio foram distintos para cada experimento, como esperado, porém, demonstrando coerência de acordo com a temperatura de processo e as condições do pré-tratamento.

4.4.1. A escolha da condição de contorno para a secagem

De forma análoga ao procedimento adotado no estudo da desidratação osmótica, apresentado na Seção 4.3.1, foram realizadas simulações utilizando-se as cinéticas obtidas em cada um dos experimentos, a fim de definir qual a condição de contorno mais conveniente para estudar o processo de secagem. Os *softwares* “Prescribed Adsorption-Desorption 2.2” (Silva e Silva, 2009b) e “Convective Adsorption-Desorption 2.5” (Silva e Silva, 2009c), que fornecem a solução analítica da equação de difusão com as condições de contorno de primeiro e terceiro tipos, respectivamente, foram utilizados para conduzir esta análise.

A Tabela 4.53 mostra os parâmetros obtidos através dos referidos *softwares* para os quatro experimentos de secagem.

Tabela 4.53: Parâmetros obtidos através das simulações com os *softwares* Prescribed e Convective para a secagem.

Experimento	Condição de contorno	$D_A \times 10^8$ ($m^2 min^{-1}$)	R^2	χ^2	Biot	$h \times 10^5$ ($mm min^{-1}$)
Sec1 (40 °C- DO: 40 °Brix e 40 °C)	1° tipo	0,7686	0,988	0,124	----	----
	3° tipo	2,518	0,999	$1,97 \times 10^{-3}$	2,7	1,746
Sec2 (40 °C- DO: 60 °Brix e 40 °C)	1° tipo	0,5879	0,988	0,116	----	----
	3° tipo	1,524	0,996	$1,21 \times 10^{-2}$	3,687	1,798
Sec3 (60 °C- DO: 40 °Brix e 60 °C)	1° tipo	1,795	0,984	$5,91 \times 10^{-2}$	----	----
	3° tipo	4,386	0,998	$4,74 \times 10^{-3}$	3,937	5,06
Sec4 (60 °C- DO: 60 °Brix e 60 °C)	1° tipo	1,984	0,989	$3,544 \times 10^{-2}$	----	----
	3° tipo	3,569	0,998	$4,125 \times 10^{-3}$	7,875	7,616

As Figuras 4.86 – 4.89 mostram a superposição das cinéticas obtidas para as secagens, utilizando-se os *softwares* Prescribed e Convective e os pontos experimentais.

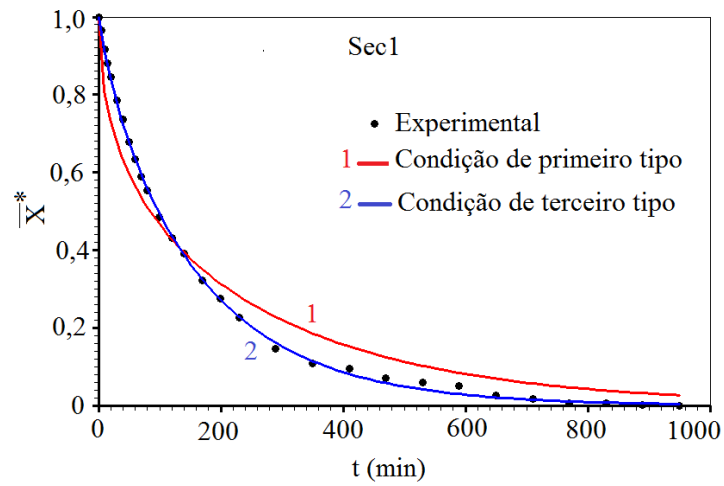


Figura 4.86: Superposição das cinéticas relativas a Sec1, obtidas utilizando-se as condições de primeiro e terceiro tipos.

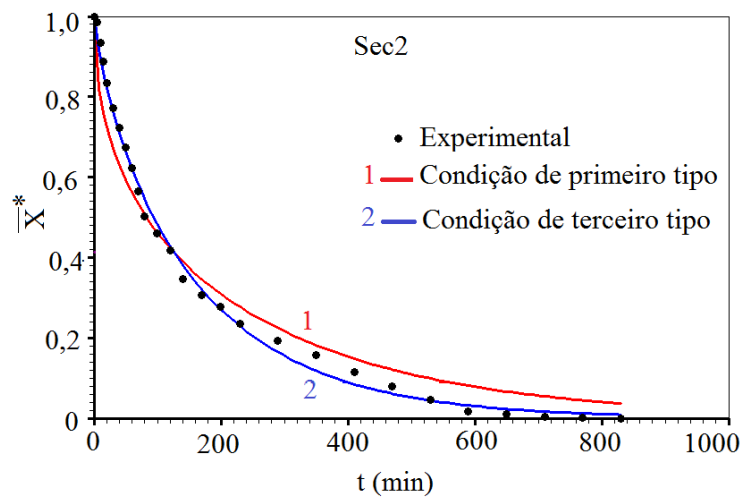


Figura 4.87: Superposição das cinéticas relativas a Sec2, obtidas utilizando-se as condições de primeiro e terceiro tipos.

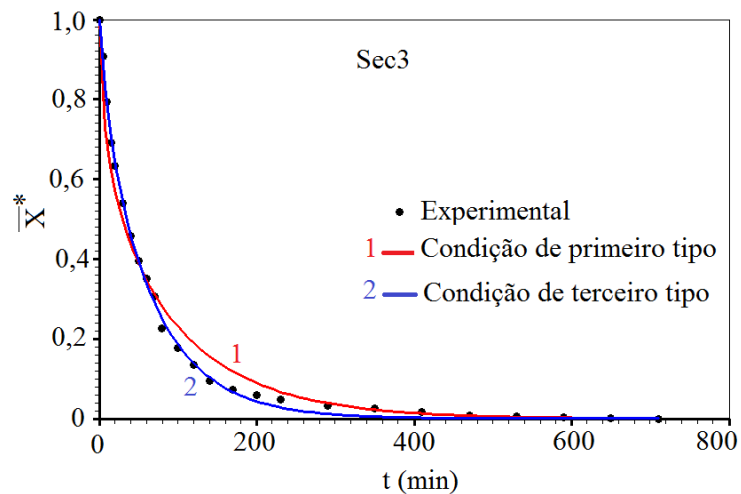


Figura 4.88: Superposição das cinéticas relativas a Sec3, obtidas utilizando-se as condições de primeiro e terceiro tipos.

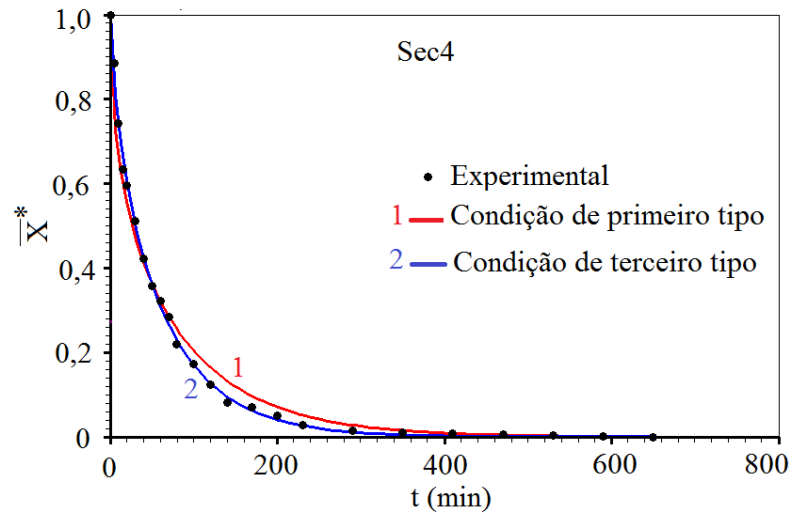


Figura 4.89: Superposição das cinéticas relativas a Sec4, obtidas utilizando-se as condições de primeiro e terceiro tipos.

Observando-se a Tabela 4.53, percebe-se que os parâmetros obtidos utilizando-se a condição de contorno de terceiro tipo apresentam indicadores estatísticos superiores em relação aos valores encontrados através da condição de primeiro tipo. As superposições das cinéticas encontradas, mostradas nas Figuras 4.86 – 4.89, também indicam uma maior adequação do uso da condição de terceiro tipo. Resultado semelhante foi encontrado por Silva et al. (2015), no estudo da secagem intermitente de bananas. Um modelo difusivo foi utilizado para descrever o processo, e na comparação entre as curvas simuladas utilizando-se as condições de contorno de primeiro e terceiro tipos, as curvas nas quais a condição de terceiro tipo foi usada promoveram um melhor ajuste aos pontos experimentais. Neste sentido, com o intuito de realizar um estudo que forneça resultados satisfatórios e condizentes com os experimentos realizados, a condição de contorno de terceiro tipo é adotada na secagem convectiva de maçã, osmoticamente desidratadas, no presente trabalho.

Na literatura, encontram-se alguns trabalhos sobre secagem convectiva de frutas que usam a condição de terceiro tipo na solução da equação de difusão (SILVA C., 2012; SILVA et al., 2013; AIRES, 2015).

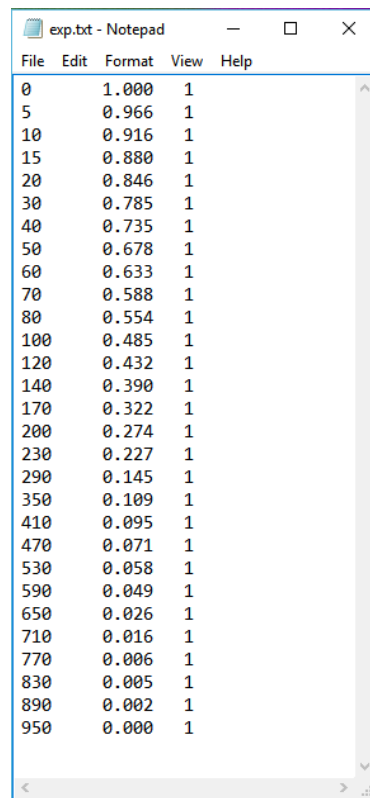
4.4.2. Um otimizador para uma solução numérica qualquer

O programa computacional desenvolvido nesta pesquisa, apresentado na Seção 3.4, foi concebido para solucionar numericamente a equação de difusão, com a condição de contorno

de primeiro tipo. Desta forma, para a execução do processo de otimização, necessário à análise da secagem convectiva, foi utilizado o *software* “LS Optimizer – Differential Equations and Functions”, desenvolvido por Silva e Silva (2016). O referido *software* determina parâmetros de equações diferenciais e funções através de dados experimentais disponíveis.

Para possibilitar a utilização do referido *software*, foi necessário realizar algumas alterações no programa fonte com a solução numérica da equação de difusão.

No início do programa fonte, depois das definições de tipos de variáveis, devem ser lidos dois arquivos. O primeiro arquivo, contendo os dados experimentais, deve ser nomeado como “exp.txt”, e deve ser lido pelo solver para identificar os valores das variáveis independentes em que as variáveis dependentes (por exemplo, tempo) sejam obtidas por simulação (por exemplo, teor de umidade médio). A Figura 4.90 apresenta um exemplo de arquivo exp.txt. Nesta figura, a primeira coluna apresenta os valores das variáveis independentes (por exemplo, tempo); a segunda coluna envolve os valores medidos para a variável dependente (por exemplo, teores médios de umidade) e a terceira coluna contém os valores dos pesos estatísticos de cada valor da variável dependente. Se os pesos estatísticos não estiverem disponíveis, como no arquivo mostrado, valor 1 deve ser atribuído, indicando que todas as medidas têm o mesmo peso estatístico.

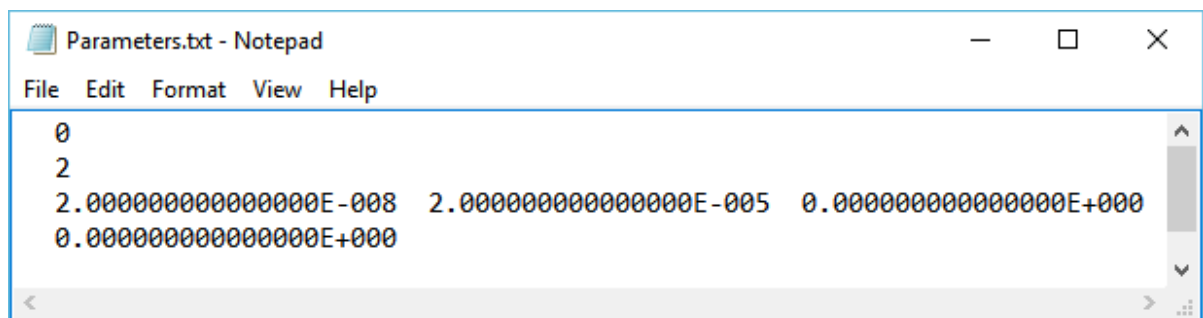


File	Edit	Format	View	Help
0	1.000	1		
5	0.966	1		
10	0.916	1		
15	0.880	1		
20	0.846	1		
30	0.785	1		
40	0.735	1		
50	0.678	1		
60	0.633	1		
70	0.588	1		
80	0.554	1		
100	0.485	1		
120	0.432	1		
140	0.390	1		
170	0.322	1		
200	0.274	1		
230	0.227	1		
290	0.145	1		
350	0.109	1		
410	0.095	1		
470	0.071	1		
530	0.058	1		
590	0.049	1		
650	0.026	1		
710	0.016	1		
770	0.006	1		
830	0.005	1		
890	0.002	1		
950	0.000	1		

Figura 4.90: Exemplo de arquivo “exp.txt”, a ser provido pelo usuário do LS *Software*.

O arquivo “Parameters.txt” é gerado pelo software LS *Optimizer* com informações que devem ser lidas e utilizadas pelo solver da equação diferencial. Um exemplo de arquivo “parameters.txt” pode ser observado na Figura 4.91. A primeira informação é armazenada na variável inteira denominada “information”. A segunda informação provida pelo *software* LS *Optimizer* é armazenada na variável N_Param e indica o número de parâmetros envolvidos na solução da equação diferencial. Finalmente, a terceira informação é referente aos valores estabelecidos pelo software LS *Optimizer* para os parâmetros (a1, a2, a3 e a4).

A primeira informação lida no arquivo “Parameters.txt”, “information”, pode ter os valores 0, 1, 2, 3 e 4. Quando “information” = 0, o solver deve armazenar os resultados da simulação (variável independente e variável dependente, em duas colunas) num arquivo denominado “unsteady.txt”. Se “information” = 1, as mesmas informações devem ser escritas num arquivo denominado “unsteady_a1.txt”. Se “information” = 2, as informações devem ser escritas num arquivo denominado “unsteady_a2.txt”. Igualmente, para “information” = 3 e “information” = 4, o arquivo deve ser denominado de “unsteady_a3.txt” e “unsteady_a4.txt”, respectivamente.



```
Parameters.txt - Notepad
File Edit Format View Help
0
2
2.0000000000000000E-008 2.0000000000000000E-005 0.0000000000000000E+000
0.0000000000000000E+000
```

Figura 4.91: Exemplo de arquivo “Parameters.txt”, provido pelo LS *Software*, a ser usado pelo solver criado pelo usuário.

O solver a ser utilizado pelo LS *Optimizer* pode ser criado em qualquer linguagem de programação. Para o caso da linguagem FORTRAN, a modificação no início do código fonte original, visando ler os arquivos “exp.txt” e “Parameters.txt” pode ser feita conforme é indicado na Figura 4.92.

```

program solver
use DFLIB

Types and definitions of variables

LOGICAL(4)    result
TYPE (qwinfo) winfo
double precision time(100), a1, a2, a3, a4
integer icon_ , info_ , N_Param, information !n_tempos

i = setexitqq(QWIN$EXITNOPERSIST) !the program is closed at the finish
! Minimize frame window
winfo%TYPE = QWIN$MIN
result = SETWSIZEQQ(QWIN$FRAMEWINDOW, winfo)

icont_ = 0
info_ = 0
open(unit = 5, file = 'exp.txt')
do while (info_ == 0)
  if(info_ == 0) icon_ = icon_ + 1
  read(5,*, iostat = info_) time(icon_)
end do
close(5)

open(unit = 5, file = 'parameters.txt')
read(5, *) information !unsteady.txt, unsteady_a1.txt, unsteady_a2.txt, unsteady_a3.txt, unsteady_a4.txt
read(5, *) N_Param !number of parameters provide by optimizer
read(5, *) a1, a2, a3, a4 !parameters provide by optimizer
close(5)

```

Figura 4.92: Modificação no início do código fonte original do solver para ler os arquivos “exp.txt” e “Parameters.txt”.

Deve-se lembrar que os resultados das simulações são armazenados em arquivos com até cinco nomes diferentes, dependendo do valor da variável “information”. Assim, quando os resultados forem obtidos pelo solver (variável independente, variável dependente, em colunas), devem ser escritos nos arquivos anteriormente especificados (unsteady.txt, unsteady_a1.txt, unsteady_a2.txt, unsteady_a3.txt, unsteady_a4.txt). Por outro lado, no código fonte, a variável dependente deve ser calculada para os mesmos valores das variáveis independentes especificadas nos dados experimentais, e então armazenadas nos arquivos especificados acima. Assim, antes do loop no tempo, deve-se acrescentar ao código fonte original os comandos mostrados na Figura 4.93, para o caso de codificação em FORTRAN:

```

if(information == 0) open(unit = 10, file = 'Unsteady.txt')
if(information == 1) open(unit = 10, file = 'Unsteady_a1.txt')
if(information == 2) open(unit = 10, file = 'Unsteady_a2.txt')
if(information == 3) open(unit = 10, file = 'Unsteady_a3.txt')
if(information == 4) open(unit = 10, file = 'Unsteady_a4.txt')

```

Figura 4.93: Código a ser acrescentado antes do *loop* no tempo para abrir um arquivo com o nome esperado pelo LS *Optimizer*, a partir do valor estipulado para a variável “information”.

Para o presente trabalho, são considerados apenas os parâmetros a_1, a_2 e a_3 , que correspondem, respectivamente, aos parâmetros b, a e h , citados posteriormente.

Para viabilizar a uniformidade entre os tempos experimentais e os simulados e evitar a necessidade de um algoritmo de interpolação, é importante que o número de passos no tempo seja o dobro do tempo total de processo, desta forma, o intervalo de tempo “Delta_t” é igual a 0,5, o que facilita a concordância entre os referidos tempos.

4.4.3. Os modelos adotados na modelagem matemática da secagem

De forma análoga ao estudo realizado com a desidratação osmótica, dois modelos matemáticos foram utilizados na análise da secagem, como pode ser visto a seguir.

- Modelo 1: Neste modelo, a solução numérica da equação de difusão com a condição de contorno de terceiro tipo é obtida desconsiderando-se o encolhimento do produto e admitindo-se a difusividade de água constante durante o processo.
- Modelo 2: Neste caso, a solução numérica da equação de difusão com a condição de contorno de terceiro tipo é encontrada pressupondo o encolhimento do produto e a variação da difusividade efetiva de massa.

4.4.4. Resultados obtidos através do modelo 1

Para o modelo 1, a malha foi dividida em $15 \times 15 \times 25$ volumes de controle, com 1000 passos no tempo, com a precisão de 10^{-4} e fazendo-se o uso da simetria.

A Tabela 4.54 mostra os resultados obtidos para o teor de umidade com a aplicação do modelo 1.

Comparando-se os valores dos parâmetros mostrados na Tabela 4.53, obtidos através do *software* Convective, com os valores expostos na Tabela 4.54, percebe-se que há uma nítida correspondência entre os mesmos. É um resultado previsível, tendo em vista que em ambos os modelos a condição de contorno de terceiro tipo é utilizada, o encolhimento é ignorado e a difusividade é admitida constante.

Tabela 4.54: Parâmetros de processo relativos ao teor de umidade obtidos através do modelo 1.

Experimento	$D_A \times 10^8$ ($m^2 min^{-1}$)	χ^2	R^2	h ($mm min^{-1}$)
Sec1 (40 °C- DO: 40 °Brix e 40 °C)	2,487	$1,980 \times 10^{-3}$	0,9994	$1,760 \times 10^{-5}$
Sec2 (40 °C- DO: 60 °Brix e 40 °C)	1,467	$1,188 \times 10^{-2}$	0,9964	$1,863 \times 10^{-5}$
Sec3 (60 °C- DO: 40 °Brix e 60 °C)	4,292	$4,655 \times 10^{-3}$	0,9982	$5,211 \times 10^{-5}$
Sec4 (60 °C- DO: 60 °Brix e 60 °C)	3,499	$3,999 \times 10^{-3}$	0,9982	$7,988 \times 10^{-5}$

Em relação às difusividades de água, os maiores valores foram obtidos para a temperatura de 60 °C, sendo mais elevado para o experimento Sec3, cujas amostras foram osmodesidratadas a uma concentração menor (40 °Brix) em relação a Sec4 (60 °Brix). Confrontando-se os experimentos Sec1 e Sec2, percebe-se que houve um comportamento semelhante, isto é, a difusividade foi menor para as frutas pré-tratadas em solução osmótica mais concentrada.

As cinéticas obtidas para cada um dos experimentos encontram-se nas Figuras 4.94 e 4.95.

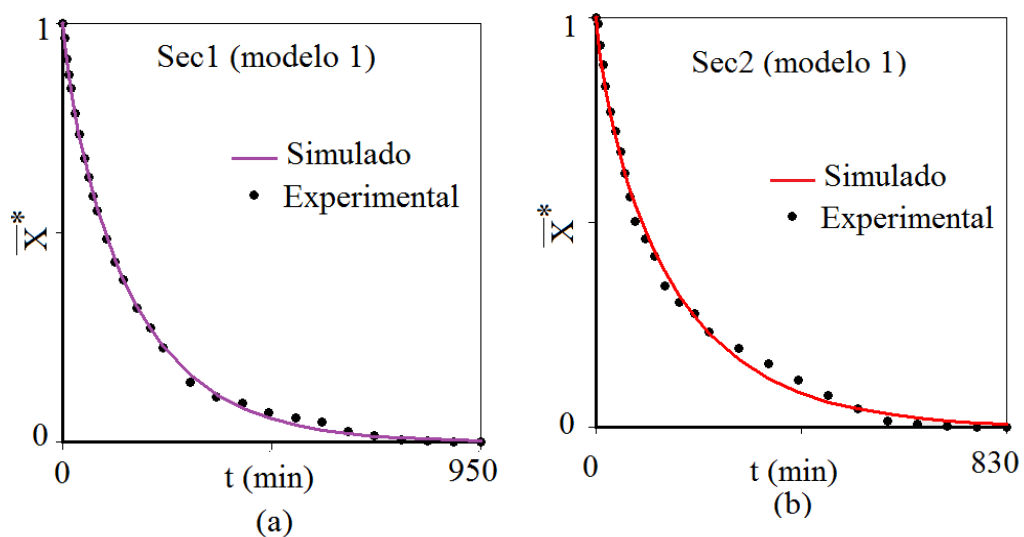


Figura 4.94: Cinéticas obtidas através do modelo 1, relativas a: (a) Sec1; (b) Sec2.

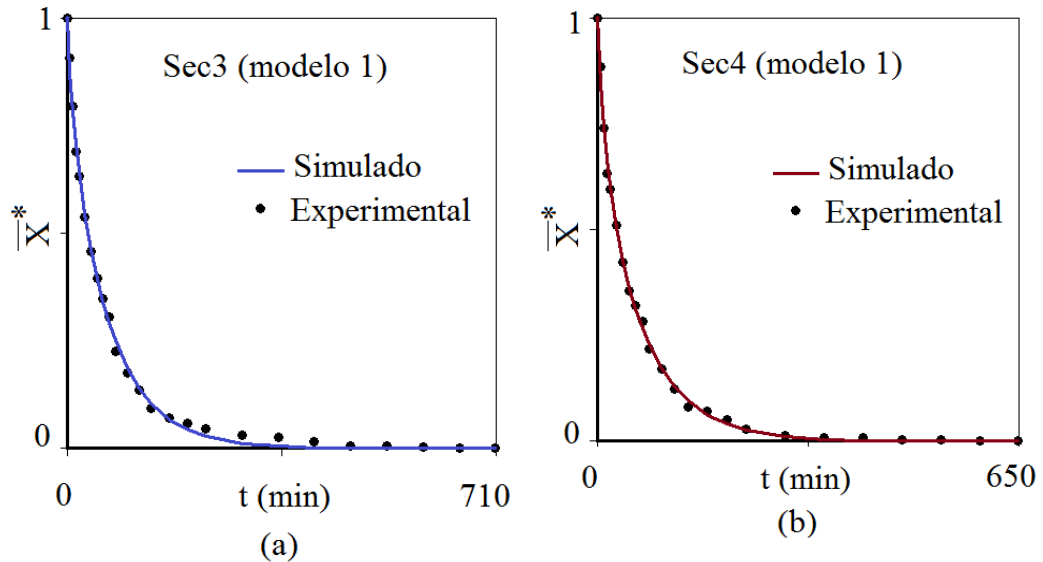


Figura 4.95: Cinéticas obtidas através do modelo 1, relativas a: (a) Sec3; (b) Sec4.

As Figuras 4.94 e 4.95 mostram gráficos característicos de secagem. O modelo 1 teve boa adequação aos dados experimentais, entretanto, existem limitações pelo fato de não considerar o encolhimento e a variação da difusividade.

4.4.5. Resultados obtidos através do modelo 2

Variações da função exponencial frequentemente são utilizadas para representar a transferência de massa em processos difusivos, a exemplo da difusividade da quantidade de água no estudo da desidratação osmótica de maçã no presente trabalho, bem como, em outras pesquisas encontradas na literatura (SILVA C., 2012; PORCIUNCULA et al., 2013; AIRES, 2015, SILVA JUNIOR, 2015). Neste sentido, para o estudo da secagem na presente pesquisa com o uso do modelo 2, a difusividade efetiva de massa de água é considerada variável e dependente do teor local de umidade segundo a função apresentada na Equação (4.12).

$$D_A = b \cdot \exp(a \cdot X^*) \quad (4.12)$$

As dimensões dos pedaços de maçã também são consideradas variáveis. Para cada uma das dimensões L_x , L_y e L_z , foram obtidos os respectivos valores adimensionais L_x^* , L_y^* e L_z^* , de forma análoga ao que foi apresentado nas Equações (4.8a – c), da Seção 4.3.4.

Um ajuste de curvas foi realizado, através do programa LAB Fit Curve Fitting Software (Silva e Silva, 2009a), o qual obteve uma relação entre os valores adimensionais L_x^* , L_y^* e L_z^* e os valores médios dos teores de umidade, também adimensionais. No referido ajuste, os dados encontrados em todos os quatro experimentos foram colocados em um único arquivo e correlacionados com o teor médio de umidade. A função linear foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais

Na Tabela 4.55, têm-se os valores dos parâmetros de ajuste da função linear aos valores adimensionais L_x^* , L_y^* e L_z^* , em função do teor médio \bar{X}^* .

Tabela 4.55: Parâmetros de ajuste da função linear aos valores adimensionais L_x^* , L_y^* e L_z^* em função do teor médio de umidade adimensional \bar{X}^* .

Função linear	a	b	$\chi^2 \times 10^2$
$L_x^* = L_y^* = L_z^* = a\bar{X}^* + b$	0,279	0,696	0,874

A Figura 4.96 apresenta a superposição entre os valores adimensionais L_x^* , L_y^* e L_z^* e a expressão linear, em função do teor médio de umidade \bar{X}^* , encontrada por meio de ajuste de curvas.

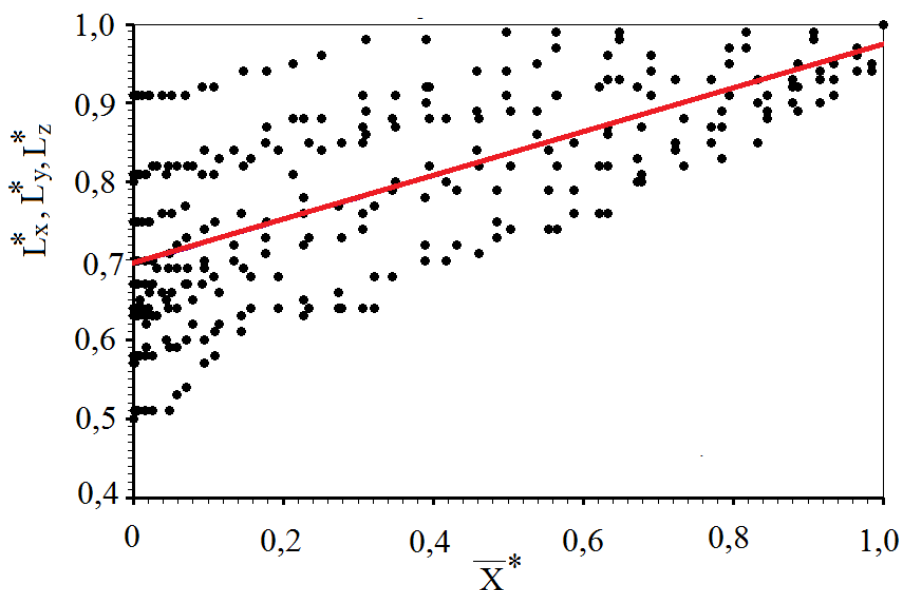


Figura 4.96: Ajuste linear dos valores adimensionais L_x^* , L_y^* e L_z^* em função do teor médio de umidade \bar{X}^* .

A função encontrada é crescente em todo o domínio, o que condiz com a situação física estudada, tendo em vista que à medida que o fruto perde água suas dimensões diminuem, como foi abordado na Seção 3.3.4.1 e mostrado na Figura 3.36.

Com os valores dos parâmetros a e b , foram determinadas as expressões que representam as dimensões dos pedaços de maçã para cada um dos experimentos, como mostra a Tabela 4.56.

Tabela 4.56: Expressões que representam as dimensões das amostras obtidas por ajuste de curvas.

Experimento	Dimensões iniciais (m)	Expressão linear em função de \bar{X}^* (m)
Sec1 (40 °C- DO: 40 °Brix e 40 °C)	$L_{x_0} = 7,79 \times 10^{-3}$	$L_x = 2,173 \times 10^{-3} \bar{X}^* + 5,422 \times 10^{-3}$
	$L_{y_0} = 6,66 \times 10^{-3}$	$L_y = 1,858 \times 10^{-3} \bar{X}^* + 4,635 \times 10^{-3}$
	$L_{z_0} = 17,82 \times 10^{-3}$	$L_z = 4,072 \times 10^{-3} \bar{X}^* + 12,403 \times 10^{-3}$
Sec2 (40 °C- DO: 60 °Brix e 40 °C)	$L_{x_0} = 6,25 \times 10^{-3}$	$L_x = 1,744 \times 10^{-3} \bar{X}^* + 4,350 \times 10^{-3}$
	$L_{y_0} = 6,15 \times 10^{-3}$	$L_y = 1,716 \times 10^{-3} \bar{X}^* + 4,280 \times 10^{-3}$
	$L_{z_0} = 15,57 \times 10^{-3}$	$L_z = 4,344 \times 10^{-3} \bar{X}^* + 10,837 \times 10^{-3}$
Sec3 (60 °C- DO: 40 °Brix e 60 °C)	$L_{x_0} = 6,83 \times 10^{-3}$	$L_x = 1,906 \times 10^{-3} \bar{X}^* + 4,754 \times 10^{-3}$
	$L_{y_0} = 6,21 \times 10^{-3}$	$L_y = 1,733 \times 10^{-3} \bar{X}^* + 4,322 \times 10^{-3}$
	$L_{z_0} = 15,52 \times 10^{-3}$	$L_z = 4,330 \times 10^{-3} \bar{X}^* + 10,802 \times 10^{-3}$
Sec4 (60 °C- DO: 60 °Brix e 60 °C)	$L_{x_0} = 7,38 \times 10^{-3}$	$L_x = 2,059 \times 10^{-3} \bar{X}^* + 5,136 \times 10^{-3}$
	$L_{y_0} = 5,80 \times 10^{-3}$	$L_y = 1,618 \times 10^{-3} \bar{X}^* + 4,037 \times 10^{-3}$
	$L_{z_0} = 15,28 \times 10^{-3}$	$L_z = 4,263 \times 10^{-3} \bar{X}^* + 10,635 \times 10^{-3}$

Os parâmetros obtidos através da otimização para a função apresentada na Equação (4.12), bem como os indicadores estatísticos, estão expostos na Tabela 4.57.

Tabela 4.57: Parâmetros relativos a difusividade de água na secagem convectiva.

Difusividade de água: $D_A = b \cdot \exp(a \cdot X^*)$					
Experimento	a	$b \times 10^9$ ($m^2 \text{ min}^{-1}$)	$h \times 10^5$ (mm min^{-1})	R^2	$\chi^2 \times 10^3$
Sec1 (40 °C- DO: 40 °Brix, 40 °C)	1,8806	7,8264	1,4537	0,9996	1,3289
Sec2 (40 °C- DO: 60 °Brix, 40 °C)	2,7631	4,1668	1,2629	0,9973	9,0388
Sec3 (60 °C- DO: 40 °Brix, 60 °C)	2,1431	13,3841	3,9208	0,9984	3,8462
Sec4 (60 °C- DO: 60 °Brix, 60 °C)	1,543	13,3314	6,4016	0,9982	3,9690

A Figura 4.97 mostra a superposição entre os gráficos que representam as difusividades de água nas secagens realizadas com as temperaturas de 40 °C e 60 °C.

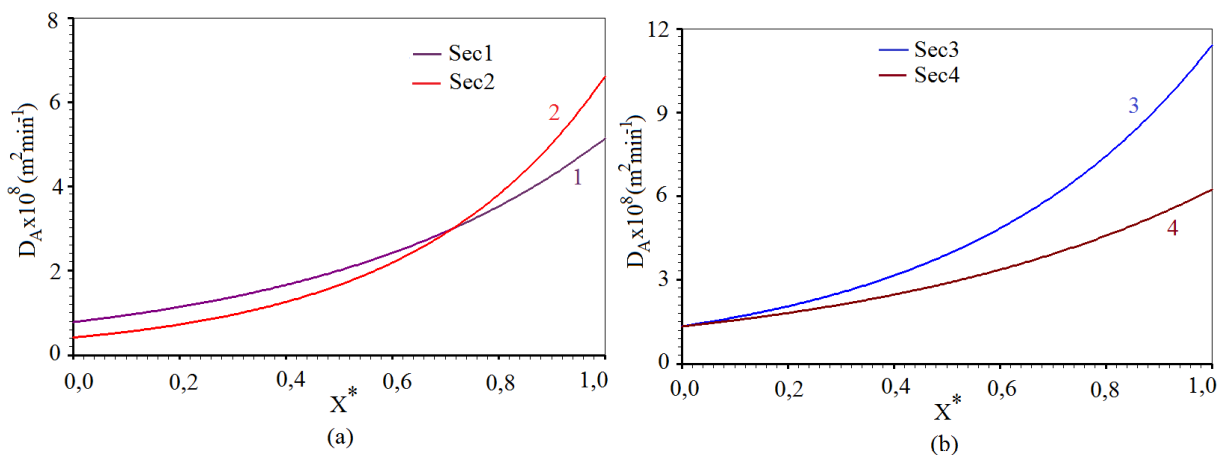


Figura 4.97: Superposição das difusividades obtidas para os experimentos da secagem convectiva, realizadas à temperatura de: (a) 40 °C; (b) 60 °C.

Uma análise na Figura 4.97 permite deduzir que em relação aos experimentos Sec1 e Sec2, a secagem dos frutos pré-tratados com uma maior concentração (Sec2), apresenta maior difusividade no início do processo, porém, no decorrer da secagem, houve uma inversão no cenário e esta foi superada pela difusividade de Sec1. Com os experimentos Sec3 e Sec4, tem-

se que a difusividade de água durante a secagem dos frutos osmoticamente desidratados em solução com 60 °Brix de concentração foi inferior àquelas desidratadas a 40 °Brix.

Com o intuito de aprimorar a interpretação dos resultados, as Figuras 4.98 e 4.99 mostram a superposição dos gráficos da difusividade em função do teor local de umidade e a difusividade média relativa para cada um dos experimentos.

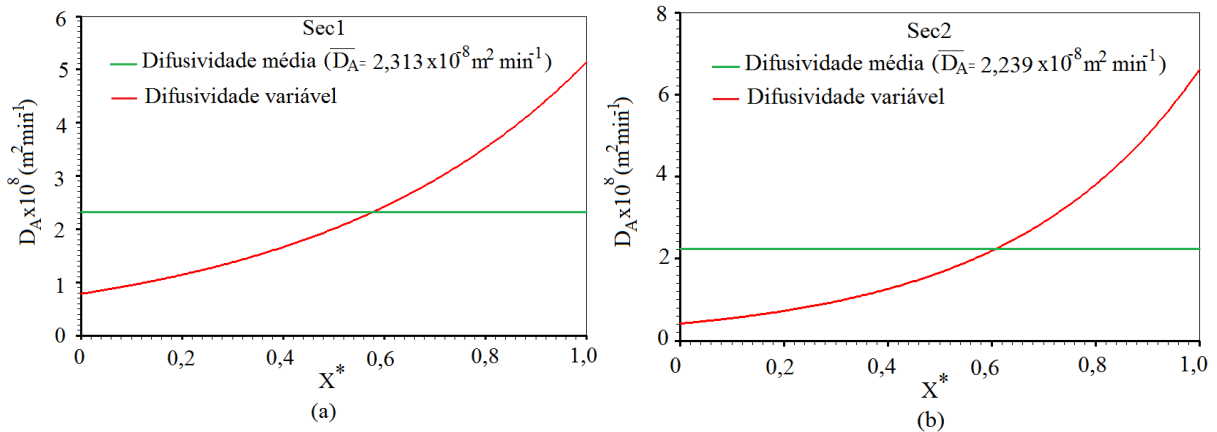


Figura 4.98: Superposição dos gráficos da difusividade em função do teor local de umidade e a difusividade média relativa a: (a) Sec1; (b) Sec2.

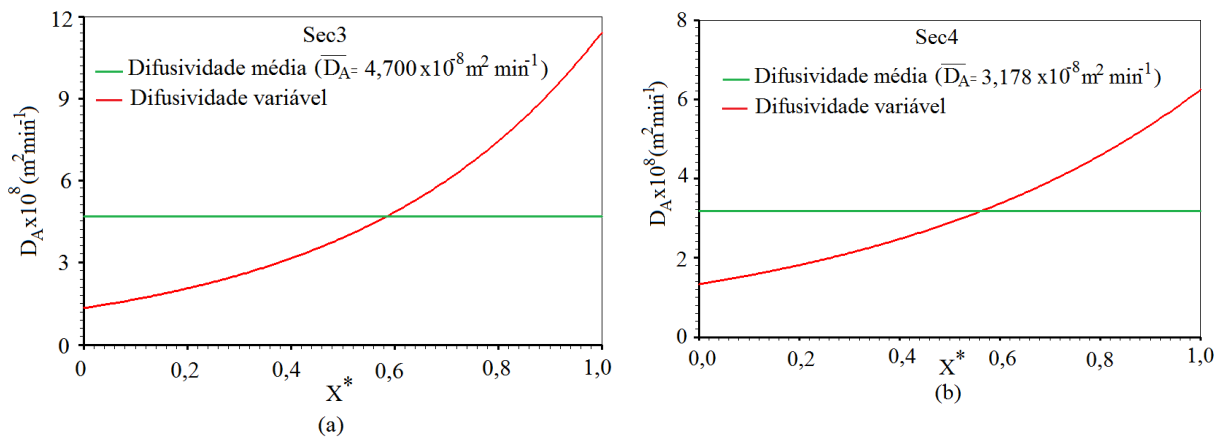


Figura 4.99: Superposição dos gráficos da difusividade em função do teor local de umidade e a difusividade média relativa a: (a) Sec3; (b) Sec4.

Comparando-se as secagens realizadas a temperatura de 40 °C (Sec1 e Sec2), tem-se que a difusividade média foi maior para as amostras desidratadas com uma menor concentração. Semelhantemente ocorreu para a temperatura de secagem de 60 °C (Sec3 e Sec4). Estes resultados são consonantes com os encontrados na Seção 4.4.3, na ocasião em que o modelo 1 foi utilizado. O fato de existir uma maior quantidade de sacarose incorporada ao fruto pode ter diminuído a porosidade do tecido, aumentando a resistência à remoção de água. De acordo com Zúñiga e Pedreschi (2011), a captação progressiva de sólidos resulta na

formação de uma barreira que interfere no transporte de massa. Efeito equivalente foi encontrado em outras pesquisas (AIRES, 2015; SILVA JUNIOR, 2015).

Com os parâmetros mostrados na Tabela 4.57 foram geradas as cinéticas relativas a cada um dos experimentos de secagem, como mostram as Figuras 4.100 e 4.101.

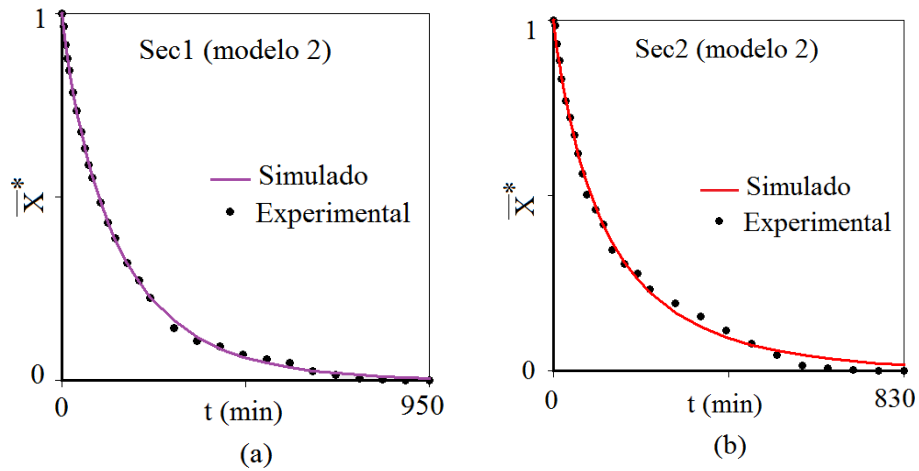


Figura 4.100: Curva simulada e pontos experimentais relativos a: (a) Sec1; (b) Sec2.

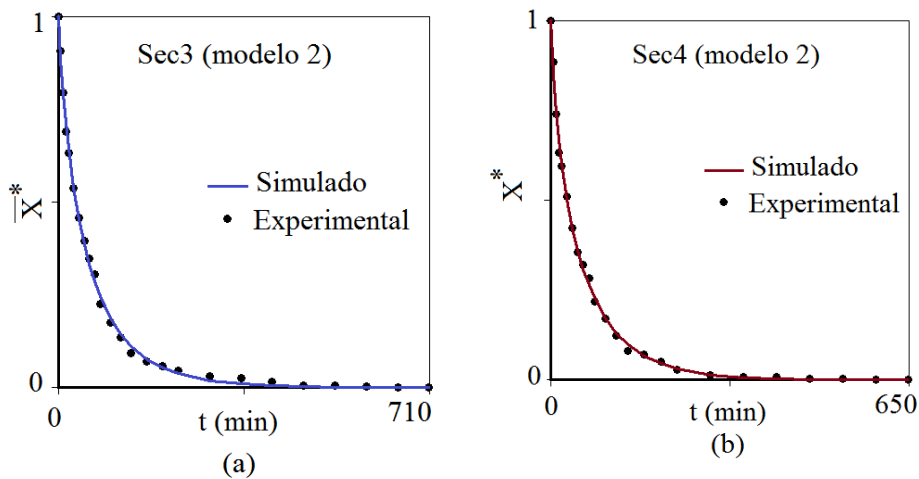


Figura 4.101: Curva simulada e pontos experimentais relativos a: (a) Sec3; (b) Sec4.

Observando-se as Figuras 4.98–4.101 verifica-se a influência da temperatura no processo de secagem, uma vez que as difusividades médias das amostras submetidas à temperatura de 60 °C são superiores às desidratadas a 40 °C. Em adição a este fato, o equilíbrio foi atingido mais rapidamente nas amostras desidratadas com a temperatura de 60 °C. Este resultado é semelhante ao encontrado por Aktas et al. (2013) na secagem de maçã, o qual atestou que o aumento da temperatura de processo diminuiu o tempo de secagem.

Por outro lado, fixando-se uma mesma temperatura e confrontando-se as amostras cuja diferença no pré-tratamento seja apenas a concentração, nota-se que as diferenças na perda de

água ocorreram de forma discreta e os teores médios de equilíbrio têm seus valores muito próximos, como mostra a Figura 4.102.

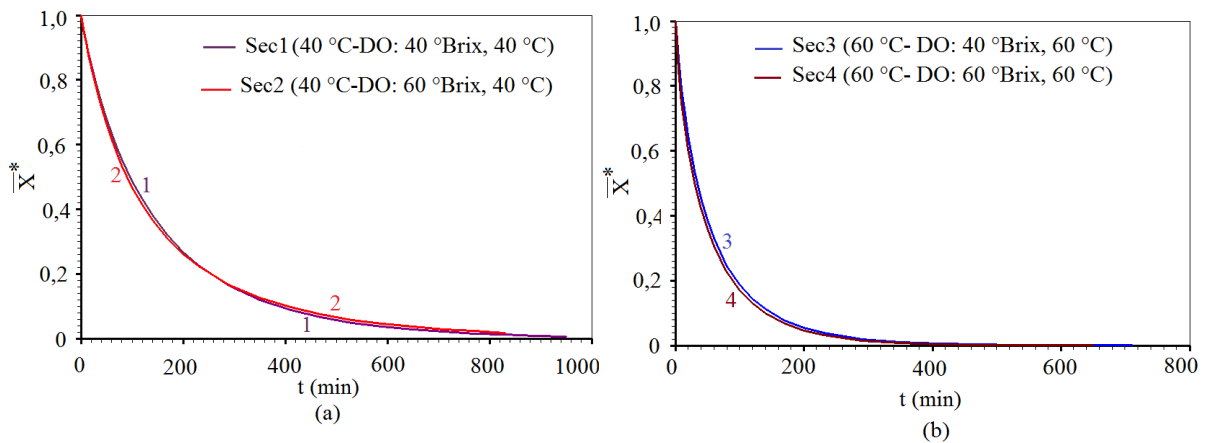


Figura 4.102: Superposição das cinéticas obtidas para as secagens realizadas com temperatura de: a) 40 °C; b) 60 °C.

Comparando-se Sec1 e Sec2, percebe-se que as amostras que foram osmoticamente desidratadas em solução mais concentrada (Sec2) tiveram o tempo de secagem mais reduzido em relação às frutas osmodesidratadas com concentração menor (Sec1). Resultante semelhante é encontrado quando a análise é feita com Sec3 e Sec4.

Outra análise pode ser feita em relação aos teores de umidade inicial e de equilíbrio, em base seca, quando são comparados os experimentos mostrados na Figura 4.102. A Tabela 4.58 mostra estes valores para cada um dos experimentos.

Tabela 4.58: Valores iniciais e de equilíbrio dos teores de umidade em base seca para os quatro experimentos de secagem.

Experimento	X₀(b.s.) (%)	X_{eq}(b.s.) (%)
Sec1 (40 °C – DO: 40 °Brix, 40 °C)	193,216	15,610
Sec2 (40 °C – DO: 60 °Brix, 40 °C)	123,989	14,631
Sec3 (60 °C – DO: 40 °Brix, 60 °C)	141,133	13,787
Sec4 (60 °C – DO: 60 °Brix, 60 °C)	57,840	10,022

Os referidos valores justificam o comportamento das difusividades encontradas e evidenciam a influência da concentração no pré-tratamento osmótico. Comparando-se Sec1 e Sec2, nota-se que o teor de umidade inicial de Sec1 é cerca de 56% maior do que o inicial de Sec2, no entanto, o seu teor de equilíbrio é apenas 6,7% superior ao de Sec2. Por outro lado, o teor inicial de Sec3 é aproximadamente 144% mais elevado do que o inicial de Sec4, enquanto que o teor de equilíbrio é em torno de 37,6% mais elevado. Estes resultados são condizentes com o fato das difusividades médias encontradas para Sec1 e Sec3 serem maiores do que as difusividades médias de Sec2 e Sec4, respectivamente, como mostram as Figuras 4.98 e 4.99.

Observando-se apenas a Figura 4.102, pode-se concluir de forma prematura que a concentração da solução osmótica não foi significativa no processo de secagem, porém, a sua atuação, mesmo de forma indireta, foi determinante, uma vez que as amostras pré-tratadas com concentrações maiores iniciaram a secagem com um teor de umidade menor, e este fato deve-se, em grande parte, a ação da concentração do meio osmótico.

A Figura 4.103 mostra a superposição das cinéticas obtidas para os quatro experimentos.

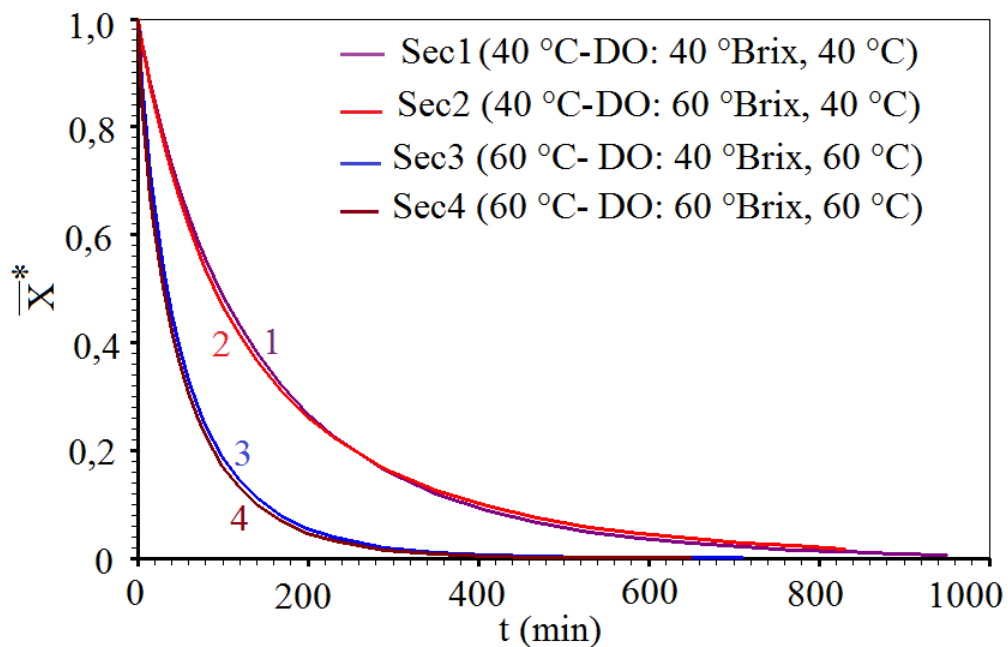


Figura 4.103: Superposição das cinéticas obtidas para os quatro experimentos de secagem.

Uma análise na Figura 4.103 permite concluir que a temperatura é um agente decisivo no processo de secagem. Nota-se que os experimentos submetidos à temperatura de 60 °C (Sec3 e Sec4) tiveram uma perda de água expressiva em relação aos outros. Em adição a este fato, o tempo de equilíbrio foi significativamente menor.

4.4.6. Comparação entre os modelos 1 e 2

As Figuras 4.104 e 4.105 mostram a superposição das cinéticas de cada um dos experimentos obtidas através dos modelos 1 e 2.

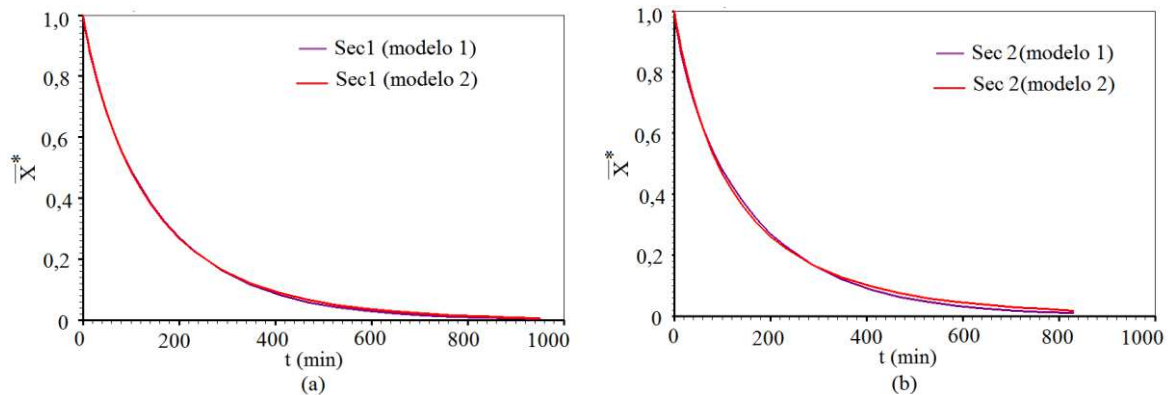


Figura 4.104: Superposição entre as cinéticas relativas a: (a) Sec1; (b) Sec2, obtidas através dos modelos 1 e 2.

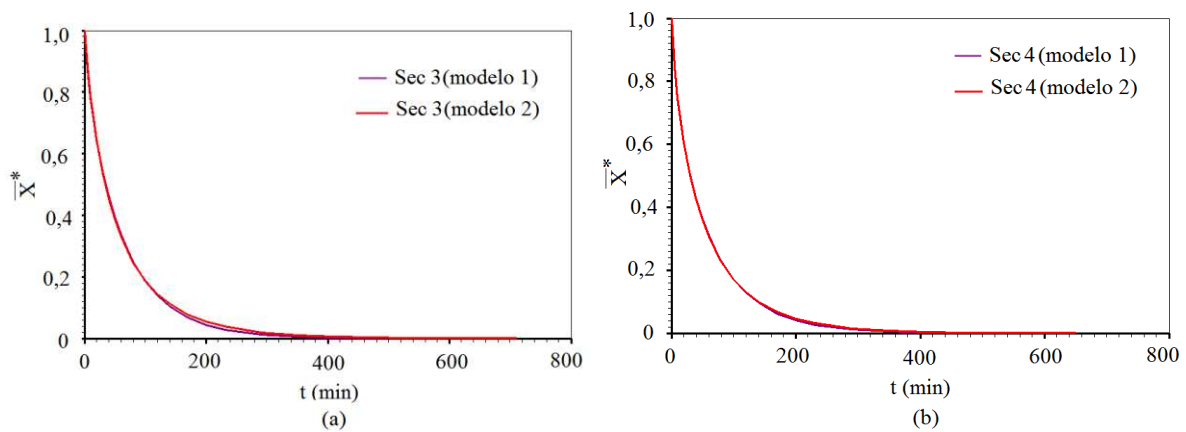


Figura 4.105: Superposição entre as cinéticas relativas a: (a) Sec3; (b) Sec4, obtidas através dos modelos 1 e 2.

As Figuras 4.104 e 4.105 mostram uma equivalência entre os modelos 1 e 2. Entretanto, o fato do modelo 1 desconsiderar o encolhimento e admitir a difusividade constante, torna a análise distante da situação física real. Desta forma, o modelo 2 é considerado mais adequado para o estudo da secagem convectiva.

4.4.7. A distribuição do teor de umidade no interior do produto ao longo da secagem complementar utilizando-se o modelo 2.

De forma análoga ao estudo da desidratação osmótica, a distribuição do teor de umidade foi averiguada durante o processo de secagem, através do *software* Contour Plot (Silva, 2010). A malha utilizada foi a mesma apresentada na Seção 4.3.5, com $31 \times 31 \times 45$ volumes de controle, sem a utilização da simetria, com 3600 estepes de tempo e um tempo total de 1800 minutos. O paralelepípedo com destaque para os Planos 12, 23, 34 e 44, mostrados na Figura 4.72, foi empregado para conduzir a análise da distribuição do teor de umidade.

A Figura 4.106 mostra o teor de umidade no Plano 34, obtido considerando-se $k = 34$, cuja distância ao Contorno 2 é de onze unidades (ver Figura 4.72), nos quatro experimentos de secagem, aos 30 minutos após o início da secagem.

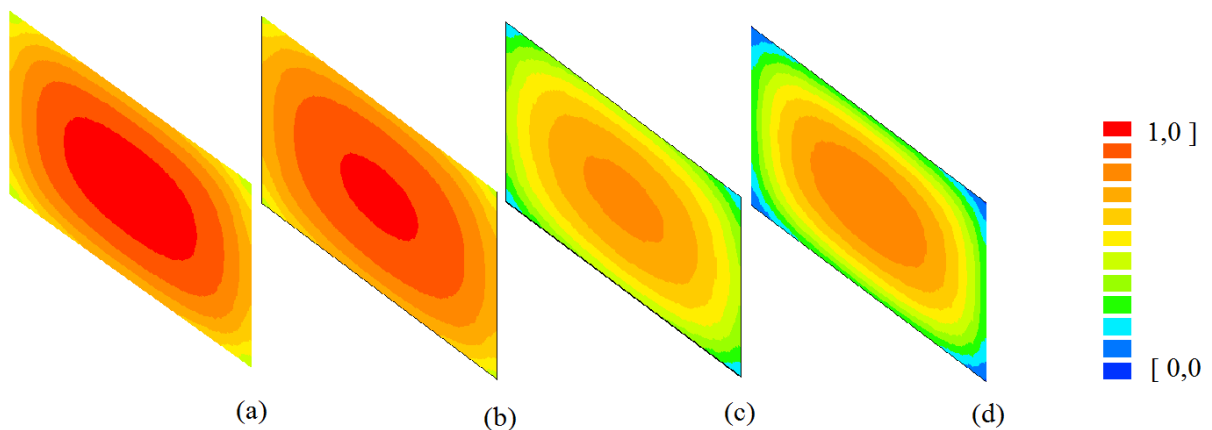


Figura 4.106: Teor de umidade no Plano 34 aos 30 minutos a partir do início da secagem: (a) Sec1; (b) Sec2; (c) Sec3; (d) Sec4.

Uma inspeção na Figura 4.106, permite concluir que a mesma é concordante com os resultados mostrados na Seção 4.4.5. Vale salientar que a referida figura mostra a distribuição do teor de umidade ainda no início do processo. Observa-se que nos itens (a) e (b), referentes à Sec1 e Sec2, respectivamente, os teores de umidade são semelhantes, como mostra a Figura 4.102(a), apresentando uma quantidade menor para Sec2. Verifica-se que há coerência com o fato do teor de umidade inicial em Sec2 ser menor do que em Sec1 (Tabela 4.58) e a difusividade de Sec2 ser maior que a de Sec1, no início da secagem, como mostra a Figura 4.97(a).

Por outro lado, confrontando-se os itens (c) e (d), identifica-se uma semelhança nos teores de umidade nas respectivas superfícies, com uma maior quantidade para Sec4 (ítem d). Apesar do teor de umidade inicial em Sec4 ser menor do que em Sec3, a difusividade de Sec3 foi expressivamente maior do que a de Sec4 principalmente no início do processo, como mostra a Figura 4.97(b).

A Figura 4.107 apresenta a distribuição do teor de umidade nos Planos 44, 34, 23 e 12, obtidas fazendo-se $k = 44$, $k = 34$, $k = 23$ e $k = 12$, respectivamente, no instante de 240 minutos após o início da secagem Sec1.

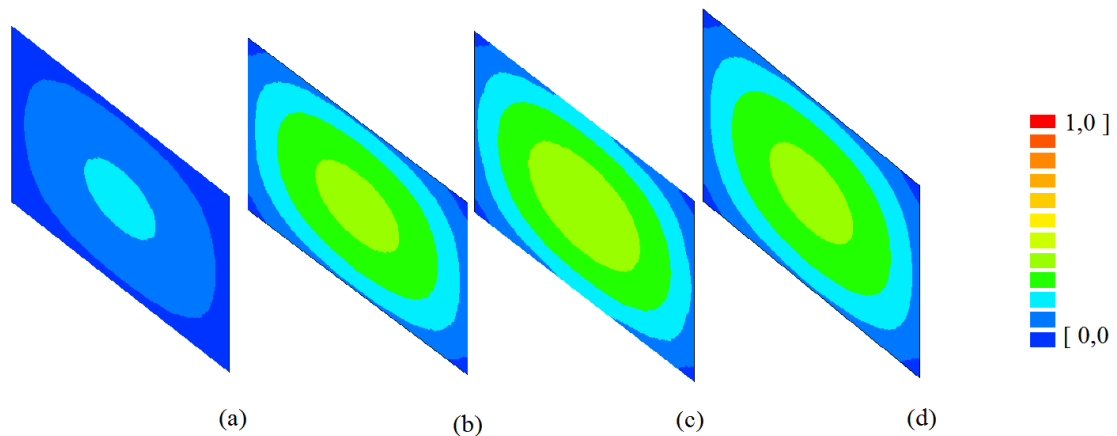


Figura 4.107: Distribuição do teor de umidade obtido no instante de 240 minutos a partir do início da secagem Sec1 no: (a) Plano 44; (b) Plano 34; (c) Plano 23; (d) Plano 12 .

Observando-se a Figura 4.107, percebe-se que em todas as superfícies, os volumes de controle situados nos “cantos” já se encontram com o teor umidade de equilíbrio. Por outro lado, na região central ainda existe umidade. Nota-se também que o Plano 23, posicionado no centro do sólido, contém umidade superior às demais, cujas localizações são mais próximas do seu contorno. Estes fatos ratificam a percepção existente de que a perda de umidade ocorre do centro para o exterior do domínio. Comparando-se os itens (b) e (d), cujos planos apresentam simetria em relação ao centro do domínio, constata-se que a distribuição do teor de umidade sucede de forma equivalente. Semelhantemente ao que ocorreu na desidratação osmótica, este fato confirma a propriedade de simetria existente e justifica, mais uma vez, a sua utilização no presente trabalho.

A Figura 4.108 mostra a distribuição do teor de umidade no plano central do sólido (Plano 23), no experimento Sec2, em instantes distintos.

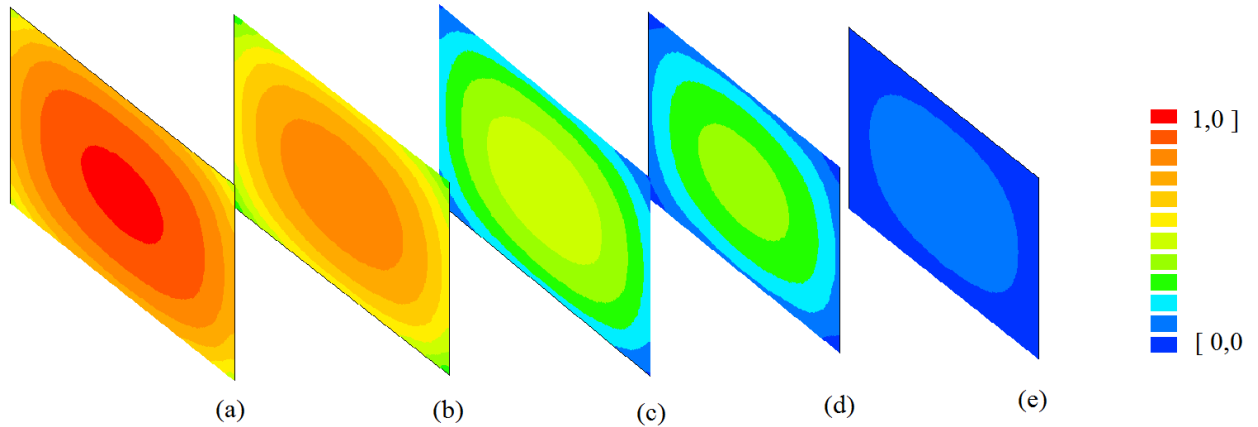


Figura 4.108: Distribuição do teor de umidade no Plano 23, referente à Sec2, nos instantes: (a) 30; (b) 60; (c) 180; (d) 240 e (e) 480 minutos.

A Figura 4.108 representa de forma clara a evolução temporal do teor de umidade no mencionado plano. Mais uma vez é confirmado que o sentido do fluxo de água ocorre de dentro para fora do sólido e que a parte central leva um tempo maior para atingir o valor de equilíbrio. O ítem (e) da figura revela que aos 480 minutos, os volumes de controle localizados na região central da superfície não tinham atingido este valor. Para confirmar este fato, as cinéticas de secagem em quatro volumes de controle localizados em diferentes regiões desta superfície, escolhidos de acordo com a Figura 4.109, são mostradas a seguir, na Figura 4.110.

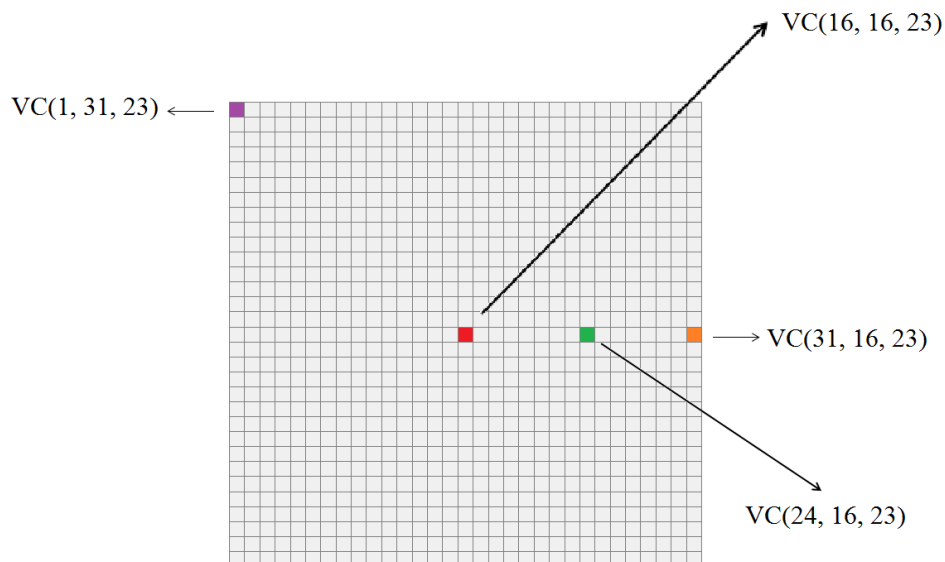


Figura 4.109: Plano central do domínio destacando os volumes de controle: VC(1, 31, 23), VC(16,16,23), VC(24, 16, 23) e VC(31, 16, 23).

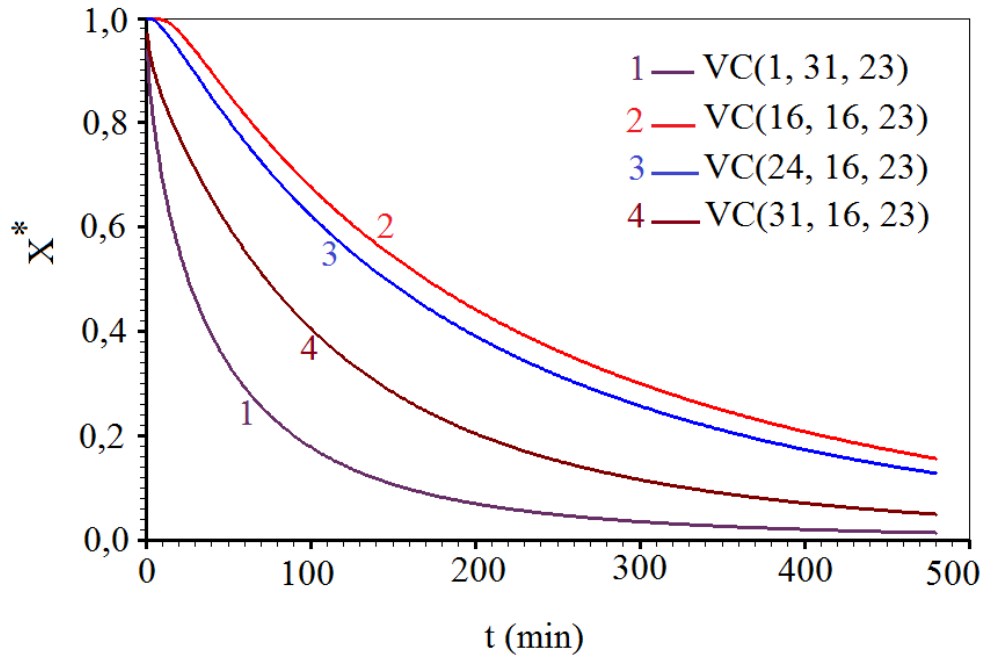


Figura 4.110: Cinéticas de secagem dos volumes de controle VC(1, 31, 23), VC(16, 16, 23), VC(24, 16, 23) e VC(31, 16, 23) referentes a secagem Sec2.

Conforme mostra a Figura 4.110, o volume de controle que perdeu água mais rapidamente foi o VC (1, 31, 23), que tem contato com o meio externo através de duas faces (oeste e norte). Em seguida, tem-se o VC (31, 16, 23), que faz fronteira com o meio externo através de apenas de uma face (leste). Ambos atingiram o equilíbrio ao final dos 480 minutos, o que é concordante com o que foi apresentado na Figura 4.108(e), tendo em vista que na referida figura a região que contém estes volumes de controle se encontra em equilíbrio. Por outro lado, o VC(16, 16, 23), localizado no centro do plano, perdeu menos água do que os demais, seguido pelo VC(24, 16, 31), que se encontra em posição intermediária. Estes dois últimos volumes de controle não atingiram o valor de equilíbrio no mencionado instante. Observando-se a Figura 4.108(e), percebe-se ao final dos 480 minutos de processo, a região na qual estes volumes de controle estão localizados ainda não se encontra em equilíbrio, mostrando uma perfeita consonância entre as Figuras 4.110 e 4.108.

A Figura 4.111 mostra a distribuição do teor de umidade no Plano 23, localizado no centro do domínio, no instante de 180 minutos, nos quatro experimentos de secagem

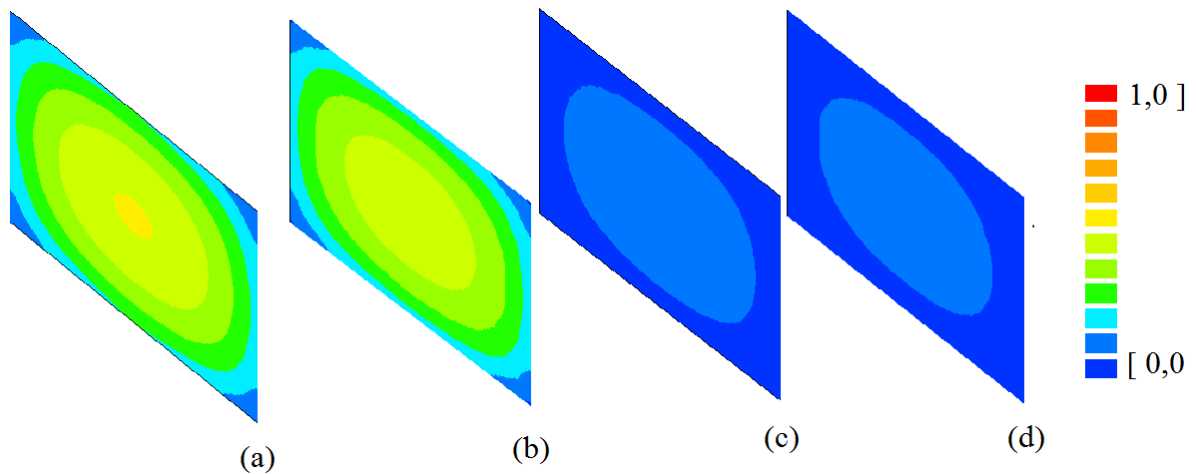


Figura 4.111: Distribuição do teor de umidade na Plano 23 no instante de 180 minutos referente à secagem: (a) Sec1; (b) Sec2; (c) Sec3; (d) Sec4.

Observa-se uma nítida concordância entre os cenários apresentados nas Figuras 4.103 e 4.111. As secagens Sec1 e Sec2, ambas realizadas com temperatura de 40 °C, apresentam comportamentos semelhantes, com uma discreta diminuição do teor de umidade em Sec2, cujo pré-tratamento foi realizado com maior concentração (60 °Brix) da solução osmótica. O mesmo ocorre com Sec3 e Sec4, desidratadas com temperatura de 60 °C. Por outro lado, quando se confrontam os resultados mostrados nos itens (a) e (b) com os apresentados em (c) e (d) da Figura 4.111, é notório o efeito da temperatura mais alta, confirmando a grande influência deste parâmetro na secagem convectiva.

A análise realizada mostra que a secagem ocorreu dentro dos padrões encontrados na literatura. Os resultados permitem constatar que o modelo 2 se adequou de forma satisfatória aos dados experimentais.

De uma forma geral, a temperatura foi decisiva na secagem convectiva. Entretanto, a concentração do meio osmótico utilizado no pré-tratamento exerceu influência sobre o processo, uma vez que as amostras osmodesidratadas em solução mais concentrada iniciaram a secagem com teor de umidade mais reduzido, proporcionando uma redução no tempo de secagem e, conseqüentemente, diminuindo os custos financeiros com este procedimento. Além disso, diferentes quantidades de sacarose incorporadas ao produto proporcionam diferentes efeitos sobre a difusividade de água durante o processo de secagem.

Capítulo 5:

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

As conclusões acerca do estudo da desidratação osmótica e secagem convectiva de maçã realizado na presente pesquisa são elencadas neste capítulo, juntamente com algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1. Conclusões

- ✓ A modelagem matemática desenvolvida mostrou-se eficaz, tendo em vista que os testes de coerência, consistência e comparação com o uso de soluções analíticas apresentaram concordância satisfatória;
- ✓ O programa computacional foi criado de forma adequada, a julgar pela coesão dos resultados encontrados com os testes realizados, como também com o teste de simetria;
- ✓ Quando se faz o uso da simetria, com o domínio reduzido à oitava parte do domínio completo, o tempo de execução também é reduzido, aproximadamente, na mesma proporção, atestando a economia de memória computacional;
- ✓ A metodologia experimental foi apropriada, uma vez que os resultados encontrados são coerentes com outras pesquisas presentes na literatura;
- ✓ Para possibilitar a estimativa dos parâmetros de processo, foi desenvolvido um algoritmo otimizador, o qual demonstrou eficiência em sua aplicação, uma vez que

atendeu às expectativas na obtenção dos parâmetros de processo a partir de dados experimentais;

- ✓ Para a análise da desidratação osmótica e da secagem convectiva foram adotados dois modelos: o modelo 1 considera os parâmetros constantes, enquanto que, o modelo 2, supõe a difusividade variável e considera o encolhimento. O modelo 2 foi considerado mais adequado com a situação física, em ambos os processos;
- ✓ Para nortear a escolha da condição de contorno, foram utilizados os *softwares* “Prescribed Adsorption-Desorption 2.2” e “Convective Adsorption-Desorption 2.5”, que fornecem a solução analítica da equação de difusão com condições de contorno de primeiro e terceiro tipos, respectivamente. Para a desidratação osmótica a condição de contorno mais adequada foi a do primeiro tipo, enquanto que, para a secagem, a condição de terceiro tipo foi mais conveniente;
- ✓ Os resultados encontrados através do modelo 1, tanto na desidratação osmótica como na secagem, foram concordantes com os obtidos com o uso da solução analítica da equação de difusão, por meio dos *softwares* adequados para cada situação;
- ✓ Foram obtidas correlações matemáticas entre os coeficientes de difusão em função dos parâmetros do processo de desidratação, como também das dimensões do sólido. Na desidratação osmótica, uma variação da função exponencial foi considerada a expressão mais conveniente para representar a difusividade de água, enquanto que, para a sacarose, a função mais adequada envolve o cosseno hiperbólico. As dimensões do sólido foram representadas por funções lineares, em ambos os processos;
- ✓ Os valores obtidos para os parâmetros de processo referentes à desidratação osmótica, como também à secagem convectiva, promoveram um bom ajuste aos dados experimentais;
- ✓ A difusividade de água foi maior que a difusividade de sacarose na desidratação osmótica;

- ✓ O transporte de massa na desidratação osmótica sofreu influência tanto da concentração da solução osmótica como da temperatura de processo. Porém, a temperatura foi preponderante;
- ✓ As taxas de transferência de massa de água e sacarose foram maiores nas primeiras quatro horas de processo;
- ✓ A temperatura foi decisiva na transferência de água no processo de secagem das maçãs pré-tratadas, entretanto, a concentração do meio osmótico no qual as amostras foram osmodesidratadas, mesmo de forma indireta, exerceu influência na secagem convectiva;
- ✓ As secagens realizadas com amostras osmodesidratadas com concentração mais elevada ocorreram em um tempo expressivamente inferior;
- ✓ A análise da distribuição de massa no interior do produto na desidratação osmótica foi condizente com outros trabalhos encontrados na literatura e ratificou a percepção existente relativa ao sentido do fluxo de massa. O sentido do fluxo de água ocorre de dentro do sólido para a parte externa, enquanto que, o fluxo de sacarose se dá do meio externo para dentro da fruta;
- ✓ A análise da distribuição do teor de umidade durante a secagem foi concordante com as demais análises e mostrou que o centro do sólido é a região que demora mais tempo para secar, enquanto que, as suas extremidades secam ainda no início do processo;
- ✓ O modelo matemático desenvolvido na presente pesquisa se apresenta como uma importante ferramenta no estudo de processos difusivos e viabiliza a realização de simulações em outras condições operacionais, com outros tipos de frutas, oferecendo subsídios aos interessados em utilizar os mecanismos aqui apresentados, para avaliarem as condições operacionais mais convenientes, segundo os seus objetivos. Há de se convir que uma escolha adequada das condições operacionais neste tipo de processo, pode gerar um produto final de qualidade superior, com uma redução significativa de tempo de execução e de custo financeiro.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros têm-se:

- ✓ O estudo da desidratação osmótica de maçã utilizando-se outras geometrias, considerando-se os parâmetros de processo variáveis;
- ✓ O estudo da desidratação osmótica de outros tipos de frutas, através de modelos difusivos e considerando-se os parâmetros de processo variáveis, tendo em vista a escassez de trabalhos com esta configuração;
- ✓ Utilizar a metodologia proposta neste trabalho para outras geometrias utilizando, se for necessário, coordenadas generalizadas;
- ✓ Fazer a análise sensorial do produto seco a ser consumido como passas;
- ✓ Fazer a análise físico-química do produto seco e fresco;
- ✓ Acompanhar o armazenamento do produto por um período de pelo menos três meses.

Referências bibliográficas

Abraão A. S.; Lemos, A. M.; Vilela, A.; Sousa, J. M.; Nunes, F. M. **Influence of osmotic dehydration process parameters on the quality of candied pumpkins**. Food and bioproducts processing 91, 481–494, 2013.

Adorno, W. T.; Martins, G. A. S.; Silva, W. G. **Modelagem matemática aplicada à transferência de massa em alimentos**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, v.9, N.16; p.1465, 2013.

Agnelli, M. E.; Marani, C. M.; Mascheroni, R. H. **Modelling of heat and mass transfer during (osmo) dehydrofreezing of fruits**. Journal of Food Engineering 69, 415–424, 2005.

Aires, J. E. F. **Uso de soluções numéricas da equação de difusão em coordenadas cartesianas na descrição da desidratação de frutas**, 2015. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

Aktas, T.; Ulger, P.; Daglioglu, F.; Hasturk, F. **Changes of nutritional and physical quality characteristics during storage of osmotic pretreated apple before hot air drying and sensory evaluation**. Journal of Food Quality 36, 411–425, 2013.

Allali, H.; Marchal, L.; Vorobiev, E. **Effects of vacuum impregnation and ohmic heating with citric acid on the behaviour of osmotic dehydration and structural changes of apple fruit**. Biosystems Engineering 106, 6-13, 2010.

Aminzadeh, R.; Sargolzaei, J.; Abarzani, M. **Preserving Melons by Osmotic Dehydration in a Ternary System Followed by Air-Drying.** Food Bioprocess Technol 5:1305–1316, 2012.

Arballo, J. R. ; Bambicha,R. R. ; Campanõne, L. A.; Agnelli, M. E. ; Mascheroni, R. H. **Mass transfer kinetics and regressional-desirability optimization during osmotic dehydration of pumpkin, kiwi and pear.** International Journal of Food Science and Technology 47, 306–314, 2012a.

Arballo, J. R. ; Campanõne, L. A. ; Agnelli, M. E. ; Mascheroni, R. H. **Numerical solution of coupled mass and energy balances during osmotic microwave dehydration.** Comp. Appl. Math. Vol. 31, N. 3, pp. 539–558, 2012b.

Azarpazhooh, E.; Ramaswamy, H.S. **Evaluation of diffusion and Azuara models for mass transfer kinetics during microwave-osmotic dehydration of apples under continuous flow medium-spray conditions.** Drying Technology, 28, 57–67, 2010.

Azuara, E.; Cortes, 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 27, 409–418, 1992.

Azuara, E.; Flores, E.; Beristain, C. I. **Water Diffusion and concentration profiles during osmodehydration and storage of apple tissue.** Food Bioprocess Technol 2:361–367, 2009.

Barbosa Júnior, J.L.; Mancini, M.C.; Hubinger, M. D. **Mass transfer kinetics and mathematical modelling of the osmotic dehydration of orange-fleshed honeydew melon in corn syrup and sucrose solutions.** International Journal of Food Science and Technology 48, 2463–2473, 2013.

Bchir, B.; Besbes, S.; Karoui, R.; Attia, H.; Paquot, M.; Blecker, C. **Effect of Air-Drying Conditions on Physico-chemical Properties of Osmotically Pre-treated Pomegranate Seeds.** Food Bioprocess Technol 5:1840–1852, 2012.

Borsato, D.; Moreira, I.; Silva, R. S. S. F.; Bona, E.; Nóbrega, M. M.; Pina, M. V. R.; Moreira, M. B. **Simulação da difusão multicomponente durante a desidratação osmótica em maçã: determinação dos coeficientes de difusão pelo método simplex.** Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 31, n. 2, p. 391-404, 2010.

Canteri, M. H.; Moreno, L.; Wosiacki, G.; Scheer, A. P. **Pectina: da Matéria-Prima ao Produto Final.** Polímeros, vol. 22, n. 2, p. 149-157. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/po/v22n2/aop_0690.pdf>. Setor de Tecnologia, UFPR, 2012.

Castro-Giráldez, M.; Fito, P. J. ; Fito, P. **Nonlinear thermodynamic approach to analyze long time osmotic dehydration of parenchymatic apple tissue.** Journal of Food Engineering 102, 34-42, 2011.

Corzo, O.; Bracho, N. **Application of Peleg model to study mass transfer during osmotic dehydration of sardine sheets.** Journal of Food Engineering 75, 535–541, 2006.

Corzo, O; Bracho, N.; Rodríguez, J. **Determinación del coeficiente de difusión del agua durante el salado de trozos de carne caprina usando el problema inverso.** Revista Científica, FCV-LUZ / Vol. XXIV, N° 5, 393 - 398, 2014.

Crank, J. **The mathematics of diffusion.** Oxford Science Publications, New York 1992, 414p.

Derossi, A.; Pilli, T.D.; Severini, C.; McCarthy, M.J. **Mass transfer during osmotic dehydration of apples.** Journal of Food Engineering 86, 519–528, 2008.

Devic E.; Guyot, S.; Daudin, J. D.; Bonazzi, C. **Kinetics of Polyphenol Losses During Soaking and Drying of Cider Apples.** Food Bioprocess Technol 3:867–877, 2010.

Diamante, L. M.; Yamaguchi, Y. **Response surface methodology optimization of dried apple-blackcurrant cubes.** Journal of Food Processing and Preservation ISSN 1745-4549, 2012.

El-Aouar, A. A.; Azoubel, P. M.; Murr, F. E. X. **Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (*Carica papaya* L.)**. Journal of Food Engineering 59 ,85–91, 2003.

Eren, I.; Kaymak-Ertekin, F. **Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology**. Journal of Food Engineering 79, 344–352, 2007.

FAO - **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. (2013), Roma, Itália. Disponível em <https://www.fao.org.br/dacatb.asp>., divulgado em 11/09/2013, acessado em setembro/2014.

FAO - **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. (2014), Roma, Itália. Disponível em <http://nacoesunidas.org/page/93/>, divulgado em 17/07/2014, acessado em setembro/2014.

FAO - **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. (2015), Roma, Itália. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>, acessado em 21/05/2015.

Fabbri, A.; Cevoli, C.; Troncoso, R. **Moisture diffusivity coefficient estimation in solid food by inversion of a numerical model**. Food Research International 56, 63–67, 2014.

Falade, K. O.; Igbeka, J. C.; Ayanwuyi, F. A. **Kinetics of mass transfer, and colour changes during osmotic dehydration of watermelon**. Journal of Food Engineering 80,979–985, 2007.

Farias, V. S. O. **Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. 2011, 265 p. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

Fernandes, F. A. N.; Rodrigues, S.; Law, C. L.; Mujumdar, A. S. **Drying of Exotic Tropical Fruits: A Comprehensive Review**. Food Bioprocess Technol 4, 163–185, 2011.

- Ferrari, C.C.; Arballo, J.R.; Mascheroni R.H.; Hubinger, M.D. **Modelling of mass transfer and texture evaluation during osmotic dehydration of melon under**. Journal of Food Science and Technology 46, 436–443, 2011.
- FIB - Food Ingredientes Brasil (2013), **Dossiê Alimentos Desidratados**. Número 26. Disponível em < <http://www.revista-fi.com/materias/338.pdf>>.
- Fioavanço, J. C.; Santos; R. S. S. (Editores técnicos). **Maçã: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas. ISBN 978-85-7035-204-0. Disponível em <<http://mais500p500r.sct.embrapa.br/view/pdfs/90000020-ebook-pdf.pdf>>, Brasília-DF, 2013.
- Fioreze, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 229 p, 2004.
- Ganjloo, A.; Rahman, R. A.; Bakar, J.; Osman, A.; Bimakr, M. **Mathematical modelling of mass transfer during osmotic dehydration of seedless guava (*Pisidium guajava* L.) cubes**. International Food Research Journal 18(3), 1105-1110, 2011.
- Garcia, C. C.; Mauro, M. A.; Kimura, M. **Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (*Cucurbita moschata*)**. Journal of Food Engineering 82, 284–291, 2007.
- Gwanpua, S. G.; Buggenhout, S. V.; Verlinden, B. E.; Christiaens, S.; Shpigelman, A.; Vicent, V.; Kermani, Z.,J.; Nicolai,B. M.; Hendrickx, M.; Geeraerd , A. **Pectin modifications and the role of pectin-degrading enzymes during postharvest softening of Jonagold apples**. Food Chemistry 158, 283–291, 2014.
- Hecke, K.; Herbinger, K.; Veberic, R.; Trobec, M.; Toplak, H.; Stampar, F.; Keppel, H.; Grill, D. **Sugar, acid and phenol contents in apple cultivars from organic and integrated fruit cultivation**. European Journal of Clinical Nutrition 60, 1136–1140, 2006.

Herman-Lara, E.; Martínez-Sánchez, C. E.; Pacheco-Ângulo, H.; Carmona-García, R.; Ruiz-Espinosa, H.; Ruiz-López, I. I. **Mass transfer modeling of equilibrium and dynamic periods. Food and bioproducts processing** 91, 216–224, 2013.

Jain, S. K.; Verma, R., C.;Murdia, L., K.; Jain, H. K. ; Sharma, G. P. **Optimization of process parameters for osmotic dehydration of papaya cubes.** Journal of Food Science and Technology 48(2), 211–217, 2011.

Kaleta A.; Górnicki K. **Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer.** International Journal of Food Science and Technology 45, 891–898, 2010.

Kaymak-Ertekin, F.;Sultanoglu, M. **Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples.** Journal of Food Engineering 46, 243-250, 2000.

Koprivica, G.; Mišljenovic, N.; Bera, O.; Levic´ L. **Modeling of water loss during osmotic dehydration of apple cubes in sugar beet molasses.** Journal of Food Processing and Preservation ISSN 1745-4549, 2013.

Kumar, P. S.; Sagar, V. R. **Drying kinetics and physico-chemical characteristics of Osmo-dehydrated Mango, Guava and Aonla under different drying conditions.** J Food Sci Technol DOI 10.1007/s13197-012-0658-3, 2012.

Lazarides, H. N.; Mavroudis, N. E. **Kinetics of Osmotic Dehydration of a Highly Shrinking Vegetable Tissue in a Salt-free Medium.** Journal of Food Engineering 30, 61-74, 1996.

Lombard, G. E.; Oliveira, J. C.; Fito, P.; Andrés, A. **Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying.** Journal of Food Engineering 85, 277–284, 2008.

Luikov, A. V. **Analytical Heat Diffusion Theory.** Academic Press, Inc. Ltd, London, 1968, 684 p.

Ma, B.; Chen, J.; Zheng, H.; Fang, T.; Ogutu, C.; Li, S.; Han, Y.; Wu, B. **Comparative assessment of sugar and malic acid composition in cultivated and wild apples.** Food Chemistry 172 , 86–91, 2015.

Maliska, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.** 2. ed. rev. e ampliada, LTC Editora S.A., Rio de Janeiro, 453 p, 2010.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Política Agrícola. Informativo N° 54, Ano 6, Março / 2013.

Marcotte M.; Toupin, C. J.; Maguer, M. L. **Mass Transfer in Cellular Tissues Part I: The Mathematical Model.** Journal of Food Engineering 13, 199-220, 1991.

Mavroudis, N. E.; Gidley, M. J.; Sjöholm, I. **Osmotic processing: Effects of osmotic medium composition on the kinetics and texture of apple tissue.** Food Research International 48, 839–847, 2012.

Mayor, L.; Moreira, R.; Sereno, A. M. **Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (Cucurbita pepo L.) fruits.** Journal of Food Engineering 103, 29–37, 2011.

Mercali, G.D.; Marczak, L.D.F.; Tessaro, I.C.; Noreña, C.P.Z. **Evaluation of water, sucrose and NaCl effective diffusivities during osmotic dehydration of banana (Musa sapientum, shum.).** Food Science and Technology 44, 82-91, 2011.

Monnerat, S. M.; Pizzi, T. R. M.; Mauro, M. A.; Menegalli, F. C. **Osmotic dehydration of apples in sugar/salt solutions: Concentration profiles and effective diffusion coefficients.** Journal of Food Engineering 100, 604–612, 2010.

Moreira, R.; Sereno, A.M. **Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions.** Journal of Food Engineering 57, 25–31, 2003.

- Mundada, M.; Hathan, B.S.; Maske, S. **Mass Transfer Kinetics during Osmotic Dehydration of Pomegranate Arils**. *Journal of Food Science*, Vol. 76, Nr. 1, 2011.
- Nieto, A.B.; Vicente, S.; Hodara K.; Castro, M. A.; Alzamora, S.M. **Osmotic dehydration of apple: Influence of sugar and water activity on tissue structure, rheological properties and water mobility**. *Journal of Food Engineering* 119, 104–114, 2013.
- Park, K. J.; Yado, M. K. M.; Brod, F. P. R. **Estudo de secagem de pêra bartlett (pyrus sp.) em fatias**. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.21, n.3, 2001.
- Pattanapa, K.; Therdthai, N.; Chantrapornchai, W.; Zhou, W. **Effect of sucrose and glycerol mixtures in the osmotic solution on characteristics of osmotically dehydrated mandarin cv. (Sai-Namphaung)**. *Journal of Food Science and Technology* 45, 1918–1924, 2010.
- Perussello, C. A.; Kumar, C.; Castilhos, F.; Karim, M. A. **Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*)**. *Applied Thermal Engineering* 63, 23e32, 2014.
- Petri, J.L.; Leite, G. B. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, n. 4 p.857-1166. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbf/v30n4/en_a02v30n4.pdf>. Jaboticabal, Brasil, 2008.
- Porciuncula, B. D. A.; Zotarelli, M. F. Z.; Carciofi, B. A. M.; Laurindo, J. B. **Determining the effective diffusion coefficient of water in banana (Prata variety) during osmotic dehydration and its use in predictive models**. *Journal of Food Engineering* 119, 490–496, 2013.
- Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S.M.S., Niranjana, K., Knorr, D. **Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer**. *Trends in Food Science & Technology* 13, 48–59, 2002.

Rastogi, N. K.; Raghavarao , K.S.M.S. **Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration.** *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 37, 43–47, 2004.

Rodrigues, A. E.; Mauro, M. A. **Effective diffusion coefficients behavior in osmotic dehydration of apple slices considering shrinking and local concentration dependence.** *Journal of Food Process Engineering* 31, 207–228, 2008.

Rodríguez, M. M.; Arballo, J. R.; Campañone, L.A.; Cocconi, M. B.; Pagano, A.M.; Mascheroni, R. H. **Osmotic Dehydration of Nectarines: Influence of the Operating Conditions and Determination of the Effective Diffusion Coefficients.** *Food Bioprocess Technol* 6, 2708–2720, 2013.

Ruiz-López, I. I. ; Zamudio, R. I. C.; Salgado-Cervantes, M. A.; Rodríguez -Jimenes, G. C.; García-Alvarado, M. A. **Mass Transfer Modeling During Osmotic Dehydration of Hexahedral Pineapple Slices in Limited Volume Solutions.** *Food Bioprocess Technol*, 3,427–433, 2010.

Santos, E., S.; Corrêa, P. C.; Baptestini, F. M.; Botelho. F. M.; Magalhães, F. E.A. **Mathematical modeling of dehydration of ‘Fuji’ and ‘Gala’ apples slices using infrared.** *Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas*, 31(3): 776-781, 2011.

Seguí, L.; Fito, P. J.; Fito, P. **Understanding osmotic dehydration of tissue structured foods by meansof a cellular approach.** *Journal of Food Engineering* 110, 240–247, 2012.

Shafiq, A. Md.; Amarjit, S.; Sawhney, B. K. **Response surface optimization of osmotic dehydration process for aonla slices.** *J Food Sci Technol* 47(1): 47–54, 2010.

Shamaei, S.; Emam-djomeh, Z.; Moini, S. **Modeling and Optimization of Ultrasound Assisted Osmotic Dehydration of Cranberry Using Response Surface Methodology.** *J. Agr. Sci. Tech.*, 14: 1523-1534, 2012.

Silva, C. M. D. P da S. **Ferramentas analíticas e numéricas para a descrição da secagem de sólidos na forma de cilindros e de elipsoides**, 2012. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

Silva, L. D. **Técnicas analíticas e numéricas para a secagem de sólidos na forma de paralelepípedo: uma abordagem tridimensional**, 2012. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

Silva, M. A. C.; Corrêa, J. L.G.; Silva, Z. E. **Application of inverse methods in the osmotic dehydration of acerola**. *International Journal of Food Science and Technology* 45, 2477–2484, 2010.

Silva, W. P. **Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**, 2007. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

Silva, W. P. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional, curso 1** (2009). Apresentações em Powerpoint, online, disponível no endereço eletrônico: <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/TCMFC.htm>, data de acesso: novembro/2014.

Silva, W. P.; Precker, J. W.; Silva, C. M. D. P. S.; Silva, D. D. P. S. **Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea**. *Journal of Food Engineering* 95, 298–304, 2009a.

Silva, W. P.; Precker, J. W.; Silva, D. D. P. S.; Silva, C. D. P. S.; Lima, A. G. B. **Numerical simulation of diffusive processes in solids of revolution via the finite volume method and generalized coordinates**. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52, 4976–4985, 2009b.

- Silva, W. P.; Silva, C.M.D.P.S.; Farias, V. S. O.; Lima, A. G. B.** Effect of the geometry on the description of the water absorption by composite materials using diffusion models. **Mat.-wiss. u.Werkstofftech.** **42**, 747–752, 2011.
- Silva, W. P.; Silva, C. M. D. P. S.; Silva, L. D.; Lins, M. A. A. **Comparison between models with constant and variable diffusivity to describe water absorption by composite materials.** *Mat.-wiss. u.Werkstofftech.*, 43, N.10, 2012.
- Silva, W. P.; Amaral, D. S.; Duarte, M. E. M.; Mata, M. E. R. M. C.; Silva, C. M. D. P. S.; Pinheiro, R. M. M.; Pessoa, T. **Description of the osmotic dehydration and convective drying of coconut (Cocos nucifera L.) pieces: A three-dimensional approach.** *Journal of Food Engineering* 115, 121–131, 2013.
- Silva, W. P.; Silva, C. M. D. P. S.; Lins, M.A.A.; Gomes, J.P. **Osmotic dehydration of pineapple (Ananas comosus) pieces in cubical shape described by diffusion models.** *Food Science and Technology*, 55, 1-8, 2014a.
- Silva, W. P.; Silva, C. M. D. P.S.; Aires, K.L.C.A.F. **Description of Guava Osmotic Dehydration Using a Three-Dimensional Analytical Diffusion Model.** *Journal of Food Processing*, ID 157427, 2014b.
- Silva, W. P.; Aires, J. E. F.; Castro, D. S.; Silva, C.M. D. P. S.; Gomes, J. P. **Numerical description of guava osmotic dehydration including shrinkage and variable effective mass diffusivity.** *Food Science and Technology* 59, 859-866, 2014c.
- Silva, W. P.; Rodrigues, A. F.; Silva, C. M. D. P. S.; Castro, D. S.; Gomes, J. P. **Comparison between continuous and intermittent drying of whole bananas using empirical and diffusion models to describe the processes.** *Journal of Food Engineering* 166, 230–236, 2015.
- Silva, W. P.; Silva, C. M. D. P. S. **Tratamento de dados experimentais.** João Pessoa: UFPB/Editora Universitária, 2ª Edição, 1998, 197p.

Silva, W.P.; Silva, C. M. D. P. S. **LAB Fit Curve Fitting Software, V.7.2.46** (2009a); disponível em: www.labfit.net, data de acesso: dezembro/2014.

Silva, W.P.; Silva, C. M. D. P. S. “**Prescribed Adsorption-Desorption 2.2**” software (2009b), disponível no endereço eletrônico <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Prescribed.htm>, e acessado em dezembro de 2014.

Silva, W.P.; Silva, C. M. D. P. S. “**Convective Adsorption-Desorption 2.5**” software (2009c), disponível no endereço eletrônico <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Convective.htm>, e acessado em dezembro de 2014.

Silva, W. P. “**Contour Plots**” software, 2010. Disponível em: <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Contour.zip>, acessado em março de 2016.

Silva, W.P.; Silva, C. M. D. P. S.. **xyExtract Graph Digitizer** (2011), online, disponível no endereço eletrônico http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/index_xyExtract.htm, e acessado em janeiro de 2015.

Silva, W.P.; Silva, C. M. D. P. S. **LS Optimizer- Differential Equations ans Functions** (2016), disponível no endereço eletrônico <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/LS.htm>, e acessado em março de 2016.

Silva Junior, A. F. **Desenvolvimento de ferramentas numéricas e computacionais para a descrição de transferência de massa em corpos cilíndricos: aplicação em desidratação osmótica e secagem complementar de banana**, 2015. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

Simal, S.; Deyá E.; Frau M.; Rosseló C. **Simple Modelling of Air Drying Curves of Fresh and Osmotically Pre-dehydrated Apple Cubes**. Journal of Food Engeering 33, 139-150, 1997.

Singh, B.; Mehta, S. **Effect of osmotic pretreatment on equilibrium moisture content of dehydrated carrot cubes.** *Journal of Food Science and Technology* 43, 532–537, 2008.

Souraki, B. A.; Ghavami M.; Tondro H. **Correction of moisture and sucrose effective diffusivities for shrinkage during osmotic dehydration of apple in sucrose solution.** *Food and Bioproducts Processing* 92, 1-8, 2014.

Souza, J. S.; Medeiros, M. F. D.; Magalhães, M. M. A.; Rodrigues, S.; Fernandes, F. A. N. **Optimization of osmotic dehydration of tomatoes in a ternary system followed by air-drying.** *Journal of Food Engineering* 83, 501–509, 2007.

Spiazzi, E.; Mascheroni, R. **Mass Transfer Model for Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables-I. Development of the Simulation Model.** *Journal of Food Engineering* 34, 387–410, 1997.

TACO - Tabela Brasileira de Composição de Alimentos – 4^a edição revisada e ampliada Unicamp - Campinas – SP, 2011.

Taylor, J. R. **An Introduction to Error Analysis.** University Science Books, 2nd Edition, Sausalito, California, 1997, 327p.

Teles, U. M.; Fernandes, F. A. N.; Rodrigues, S.; Lima, A.S.; Maia, G. A.; Figueiredo, R. W. **Optimization of osmotic dehydration of melons followed by air-drying.** *Journal of Food Science and Technology* 41, 674–680, 2006.

Toupin, C. J., Marcotte M. **Osmotically-Induced Mass Transfer in Plant Storage Tissues: A Mathematical Model. Part I,** *Journal of Food Engineering*, 10, 13-38, 1989.

Tyree, M. T. **The symplast concept. A general theory of symplastic transport according to the thermodynamics of irreversible processes.** *J. Theor. Biol.*, 26, 181-214, 1970.

Vasconcelos, J. L. L. A.; Andrade, S. A. C.; Maciel, M. I. S.; Maciel, M. I.S.; Guerra, N. B.; Vasconcelos, M. A. S. **Osmotic dehydration of the Indian fig (*Opuntia ficus indica*) with binary and ternary solutions.** *International Journal of Food Science and Technology* 47, 2359–2365, 2012.

Wikiera, A.; Mika, M.; Starzyska-Janiszewska, A.; Stodolak, B. **Development of complete hydrolysis of pectins from apple pomace.** *Food Chemistry* 172, 675–680, 2015.

Yadav, A. K.; Singh, S. V. **Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review.** *Journal of Food Engineering*, 10.1007/s13197-012-0659-2, 2012.

Yadav, B. S.; Yadav, R. B.; Jatain, M. **Optimization of osmotic dehydration conditions of peach slices in sucrose solution using response surface methodology.** *J Food Sci Technol* 49(5):547–555, 2012.

Yildiz, H.; Icier, F.; Eroglu S.; Dagci, G. **Effects of electrical pretreatment conditions on osmotic dehydration of apple slices: Experimental investigation and simulation.** *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 35 149–159, 2016.

Zorrilla, S. E.; Rubiolo, A. C. **A model for using the diffusion cell in the determination of multicomponent diffusion coefficients in gels or foods.** *Chemical Engineering Science* 49, No. 13, 2123-2128, 1994.

Zúñiga, R.N.; Pedreschi, F. **Study of the pseudo-equilibrium during osmotic dehydration of apples and its effect on the estimation of water and sucrose effective diffusivity coefficients.** *Food and Bioprocess Technology*, DOI 10.1007/s11947-011-0621-8, 2011.

Apêndice

Nesta seção, são apresentados os valores das cinéticas obtidas através dos experimentos de desidratação osmótica e de secagem convectiva, nas diversas condições operacionais estudadas, como também, as dimensões das amostras de maçã durante os experimentos.

A. Cinéticas da desidratação osmótica

Como já mencionado no Capítulo 3, foram realizados quatro experimentos de desidratação osmótica, cujos resultados são mostrados a seguir.

A.1. Experimento 1: 40 °Brix e 40 °C

As Tabela A.1 e A.2 mostram os dados da cinética obtida através do Experimento 1.

Tabela A.1: Cinética da DO realizada a 40 °Brix e 40 °C.

t (min)	QA (%)	QS (%)
0	100,00	0,000
10	93,764	11,234
30	87,442	16,868
60	81,361	20,379
90	76,762	25,349
120	74,326	29,531
150	73,262	34,937
180	72,608	37,812
210	71,101	41,214
240	70,574	45,211
1440	55,576	62,542
1800	55,332	66,467

Tabela A.2: Dimensões das amostras de maçã ao longo do Experimento 1 (40 °Brix e 40 °C).

t (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)	L_x[*]	L_y[*]	L_z[*]
0	9,630	9,047	20,867	1,000	1,000	1,000
10	9,003	8,667	20,007	0,935	0,958	0,959
30	8,867	8,113	19,500	0,921	0,897	0,935
60	8,553	7,760	19,390	0,888	0,858	0,929
90	8,380	7,523	19,177	0,870	0,832	0,919
120	8,157	7,107	18,723	0,847	0,786	0,897
150	8,077	6,917	18,683	0,839	0,765	0,895
180	7,937	6,840	18,303	0,824	0,756	0,877
210	7,843	6,703	17,970	0,814	0,741	0,861
240	7,537	6,623	17,543	0,783	0,732	0,841
1440	7,530	6,530	17,440	0,782	0,722	0,836
1800	7,529	6,530	17,213	0,782	0,722	0,825

A.2. Experimento 2: 60 °Brix e 40 °C

As Tabelas A.3 e A.4 mostram os resultados obtidos através do Experimento 2.

Tabela A.3: Cinética da DO realizada a 60 °Brix e 40 °C.

t (min)	\overline{QA} (%)	\overline{QS} (%)
0	100,00	0,000
10	85,215	18,301
30	76,831	24,195
60	66,144	28,559
90	61,314	34,649
120	59,109	41,966
150	56,315	43,564
180	52,446	48,688
210	50,215	48,948
240	48,313	55,678
1440	34,954	69,875
1800	34,687	72,111

Tabela A.4: Dimensões da maçã no decorrer do Experimento 2 (60 °Brix e 40 °C).

t (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)	L_x[*]	L_y[*]	L_z[*]
0	9,353	9,527	19,480	1,000	1,000	1,000
10	8,837	8,937	18,703	0,945	0,938	0,960
30	8,247	8,373	18,130	0,882	0,879	0,931
60	7,970	7,870	17,697	0,852	0,826	0,908
90	7,730	7,500	17,143	0,826	0,787	0,880
120	7,577	7,307	16,587	0,810	0,767	0,851
150	7,440	7,157	16,140	0,795	0,751	0,829
180	6,970	7,027	15,593	0,745	0,738	0,800
210	6,603	6,837	15,257	0,706	0,718	0,783
240	6,547	6,510	15,017	0,700	0,683	0,771
1440	5,893	6,123	14,577	0,630	0,643	0,748
1800	5,873	5,933	14,280	0,628	0,623	0,733

A.3. Experimento 3: 40 °Brix e 60 °C

Os resultados encontrados no Experimento 3 estão nas Tabelas A.5 e A.6.

Tabela A.5: Cinética da DO realizada a 40 °Brix e 60 °C.

t (min)	\overline{QA} (%)	\overline{QS} (%)
0	100,000	0,000
10	84,543	20,720
30	75,824	25,253
60	67,254	31,651
90	61,358	40,389
120	57,281	44,217
150	54,371	46,632
180	52,128	48,793
210	50,645	50,791
240	49,373	54,888
1440	42,631	72,336
1800	40,281	73,814

Tabela A.6: Dimensões dos pedaços de maçã ao longo do Experimento 3 (40 °Brix e 60 °C).

t (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)	L_x^*	L_y^*	L_z^*
0	9,163	9,343	20,840	1,000	1,000	1,000
10	8,760	8,907	20,357	0,956	0,953	0,977
30	8,377	8,497	19,520	0,914	0,909	0,937
60	7,777	7,963	18,237	0,849	0,852	0,875
90	7,250	7,540	17,437	0,791	0,807	0,837
120	7,193	7,443	17,283	0,785	0,797	0,829
150	7,110	7,280	16,570	0,776	0,779	0,795
180	6,850	6,820	16,303	0,748	0,730	0,782
210	6,437	6,697	16,040	0,702	0,717	0,770
240	6,193	6,603	15,860	0,676	0,707	0,761
1440	7,003	6,437	15,630	0,764	0,689	0,750
1800	6,863	6,353	15,547	0,749	0,680	0,746

A.4. Experimento 4: 60 °Brix e 60 °C

Os dados obtidos no Experimento 4 estão na Tabela A.7 e A.8.

Tabela A.7: Cinética da DO realizada a 60 °Brix e 60 °C.

t (min)	\overline{QA} (%)	\overline{QS} (%)
0	100,00	0,000
10	77,420	24,234
30	64,532	33,453
60	53,242	43,118
90	46,511	50,829
120	42,346	55,234
150	38,714	57,073
180	35,912	62,305
210	32,437	64,123
240	26,940	66,231
1440	19,622	86,345
1800	19,501	86,888

Tabela A.8: Dimensões dos pedaços de maçã ao longo do Experimento 4 (60 °Brix e 60 °C).

t (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)	L_x^*	L_y^*	L_z^*
0	9,307	9,023	19,660	1,000	1,000	1,000
10	8,660	8,513	19,137	0,931	0,943	0,973
30	7,937	8,027	18,047	0,853	0,890	0,918
60	7,470	7,630	17,383	0,802	0,846	0,884
90	7,007	7,243	16,647	0,753	0,803	0,847
120	6,800	6,890	15,817	0,731	0,764	0,805
150	6,373	6,540	15,080	0,685	0,725	0,767
180	6,040	6,290	14,750	0,649	0,697	0,750
210	5,727	5,543	14,297	0,615	0,614	0,727
240	5,463	5,513	14,167	0,587	0,611	0,721
1440	5,060	5,443	14,103	0,544	0,603	0,717
1800	4,903	5,293	13,917	0,527	0,587	0,708

B. Cinéticas da secagem

Os dados obtidos na secagem convectiva, nas condições operacionais já mencionadas no Capítulo 3, são mostrados a seguir.

B.1. Secagem a 40 °C

As Tabelas de B.1 a B.4 mostram as cinéticas das secagens realizadas à temperatura de 40 °C com amostras osmoticamente desidratadas.

Tabela B.1: Secagem a 40 °C: DO a 40 °Brix e 40 °C.

t (min)	m (g)	\bar{X} (b.s.) (%)	\bar{X} (b.u.) (%)	\bar{X}^*
0	52,556	65,895	193,216	1,000
5	51,486	65,187	187,246	0,966
10	49,873	64,061	178,247	0,916
15	48,724	63,213	171,837	0,880
20	47,659	62,391	165,895	0,846
30	45,718	60,794	155,066	0,785
40	44,119	59,374	146,145	0,735
50	42,298	57,624	135,985	0,678
60	40,876	56,150	128,052	0,633
70	39,449	54,564	120,090	0,588
80	38,359	53,273	114,009	0,554
100	36,154	50,423	101,707	0,485
120	34,487	48,027	92,407	0,432
140	33,134	45,905	84,858	0,390
170	30,976	42,136	72,819	0,322
200	29,442	39,121	64,260	0,274
230	27,937	35,841	55,864	0,227
290	25,328	29,232	41,308	0,145
350	24,195	25,919	34,987	0,109
410	23,737	24,489	32,431	0,095
470	22,977	21,992	28,191	0,071
530	22,584	20,634	25,999	0,058
590	22,285	19,569	24,331	0,049
650	21,536	16,772	20,152	0,026
710	21,229	15,568	18,439	0,016
770	20,905	14,260	16,631	0,006
830	20,883	14,169	16,509	0,005
890	20,787	13,773	15,973	0,002
950	20,722	13,503	15,610	0,000

Tabela B.2: Dimensões das amostras de maçã durante a secagem a 40 °C: DO a 40 °Brix e 40 °C.

t (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)	L_x[*]	L_y[*]	L_z[*]
0	7,79	6,66	17,82	1,00	1,00	1,00
5	7,48	6,28	17,27	0,96	0,94	0,97
10	7,29	6,01	16,66	0,94	0,90	0,93
15	7,23	5,98	16,32	0,93	0,90	0,92
20	6,89	5,92	16,27	0,88	0,89	0,91
30	6,43	5,77	15,88	0,83	0,87	0,89
40	6,40	5,49	15,60	0,82	0,82	0,88
50	6,27	5,42	15,54	0,80	0,81	0,87
60	5,91	5,45	15,29	0,76	0,82	0,86
70	5,90	5,28	15,08	0,76	0,79	0,85
80	5,78	5,25	14,98	0,74	0,79	0,84
100	5,68	5,02	14,12	0,73	0,75	0,79
120	5,64	4,79	14,06	0,72	0,72	0,79
140	5,48	4,77	13,98	0,70	0,72	0,78
170	5,26	4,25	13,78	0,68	0,64	0,77
200	5,17	4,24	13,74	0,66	0,64	0,77
230	5,05	4,18	13,57	0,65	0,63	0,76
290	4,89	4,08	13,50	0,63	0,61	0,76
350	4,50	4,05	13,34	0,58	0,61	0,75
410	4,45	4,02	13,13	0,57	0,60	0,74
470	4,22	4,01	13,01	0,54	0,60	0,73
530	4,10	3,96	12,75	0,53	0,59	0,72
590	4,01	3,90	12,61	0,51	0,59	0,71
650	3,99	3,89	12,52	0,51	0,58	0,70
710	3,98	3,88	12,51	0,51	0,58	0,70
770	3,97	3,85	12,51	0,51	0,58	0,70
830	3,97	3,83	12,51	0,51	0,58	0,70
890	3,97	3,83	12,42	0,51	0,57	0,70
950	3,95	3,82	12,40	0,50	0,57	0,70

Tabela B.3: Secagem a 40 °C: DO a 60 °Brix e 40 °C.

t (min)	m (g)	\bar{X} (b.s.) (%)	\bar{X} (b.u.) (%)	\bar{X}^*
0	39,758	55,355	123,989	1,000
5	39,471	55,030	122,372	0,985
10	38,476	53,867	116,766	0,934
15	37,571	52,756	111,668	0,887
20	36,517	51,393	105,730	0,833
30	35,304	49,722	98,896	0,771
40	34,386	48,380	93,724	0,723
50	33,401	46,858	88,175	0,673
60	32,417	45,245	82,631	0,622
70	31,322	43,331	76,462	0,565
80	30,108	41,046	69,623	0,503
100	29,304	39,428	65,093	0,461
120	28,455	37,621	60,310	0,418
140	27,070	34,429	52,507	0,346
170	26,314	32,545	48,248	0,307
200	25,739	31,039	45,008	0,278
230	24,909	28,741	40,332	0,235
290	24,086	26,306	35,696	0,193
350	23,403	24,155	31,848	0,157
410	22,587	21,415	27,251	0,115
470	21,899	18,946	23,375	0,080
530	21,219	16,349	19,544	0,045
590	20,684	14,185	16,530	0,017
650	20,529	13,537	15,656	0,009
710	20,407	13,020	14,969	0,003
770	20,376	12,888	14,794	0,001
830	20,347	12,764	14,631	0,000

Tabela B.4: Dimensões das amostras de maçã ao longo da secagem a 40 °C: DO a 60 °Brix e 40 °C.

t (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)	L_x[*]	L_y[*]	L_z[*]
0	6,25	6,15	15,57	1,00	1,00	1,00
5	5,88	5,85	14,82	0,94	0,95	0,95
10	5,67	5,70	14,76	0,91	0,93	0,95
15	5,55	5,67	14,73	0,89	0,92	0,95
20	5,31	5,54	14,52	0,85	0,90	0,93
30	5,30	5,36	14,49	0,85	0,87	0,93
40	5,26	5,25	14,41	0,84	0,85	0,93
50	4,99	5,09	14,39	0,80	0,83	0,92
60	4,72	5,05	14,27	0,76	0,82	0,92
70	4,63	5,05	14,24	0,74	0,82	0,91
80	4,62	5,05	13,84	0,74	0,82	0,89
100	4,43	5,04	13,71	0,71	0,82	0,88
120	4,38	4,91	13,69	0,70	0,80	0,88
140	4,24	4,85	13,66	0,68	0,79	0,88
170	4,02	4,69	13,59	0,64	0,76	0,87
200	4,02	4,48	13,27	0,64	0,73	0,85
230	4,01	4,48	13,19	0,64	0,73	0,85
290	4,01	4,21	13,01	0,64	0,68	0,84
350	3,98	4,18	12,89	0,64	0,68	0,83
410	3,90	4,04	12,88	0,62	0,66	0,83
470	3,88	3,98	12,75	0,62	0,65	0,82
530	3,75	3,98	12,65	0,60	0,65	0,81
590	3,67	3,93	12,61	0,59	0,62	0,81
650	3,65	3,91	12,60	0,58	0,65	0,81
710	3,64	3,95	12,55	0,58	0,64	0,81
770	3,61	3,89	12,48	0,58	0,63	0,80
830	3,60	3,88	12,48	0,58	0,63	0,80

B.2. Secagem a 60 °C

As Tabelas de B.5 a B.8 mostram as cinéticas das secagens realizadas à temperatura de 60 °C com amostras osmoticamente desidratadas.

Tabela B.5: Cinética da secagem a 60 °C: DO a 40 °Brix e 60 °C.

t (min)	m (g)	\bar{X} (b.s.) (%)	\bar{X} (b.u.) (%)	\bar{X}^*
0	46,857	58,529	141,133	1,000
5	44,571	56,402	129,369	0,908
10	41,793	53,504	115,073	0,795
15	39,220	50,454	101,832	0,691
20	37,764	48,544	94,339	0,633
30	35,444	45,175	82,400	0,539
40	33,434	41,880	72,056	0,458
50	31,875	39,037	64,034	0,395
60	30,781	36,870	58,404	0,350
70	29,719	34,614	52,938	0,307
80	27,730	29,924	42,703	0,227
100	26,483	26,625	36,286	0,177
120	25,457	23,667	31,006	0,135
140	24,456	20,543	25,854	0,095
170	23,890	18,661	22,942	0,072
200	23,578	17,584	21,336	0,059
230	23,281	16,533	19,808	0,047
290	22,914	15,196	17,919	0,032
350	22,756	14,607	17,106	0,026
410	22,496	13,620	15,768	0,016
470	22,283	12,795	14,672	0,007
530	22,249	12,661	14,497	0,006
590	22,221	12,551	14,353	0,004
650	22,156	12,295	14,018	0,002
710	22,111	12,116	13,787	0,000

Tabela B.6: Dimensões das amostras de maçã ao longo da secagem a 60 °C: DO a 40 °Brix e 60 °C.

t (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)	L_x[*]	L_y[*]	L_z[*]
0	6,83	6,21	15,52	1,00	1,00	1,00
5	6,75	6,11	15,28	0,99	0,98	0,98
10	6,23	5,93	14,99	0,91	0,95	0,97
15	6,19	5,82	14,94	0,91	0,94	0,96
20	5,93	5,79	14,89	0,87	0,93	0,96
30	5,89	5,55	14,78	0,86	0,89	0,95
40	5,77	5,52	14,56	0,84	0,89	0,94
50	5,58	5,48	14,30	0,82	0,88	0,92
60	5,47	5,42	14,14	0,80	0,87	0,91
70	5,08	5,30	14,06	0,74	0,85	0,91
80	4,91	4,87	13,58	0,72	0,78	0,88
100	4,86	4,52	13,20	0,71	0,73	0,85
120	4,80	4,45	13,01	0,70	0,72	0,84
140	4,78	4,29	12,98	0,70	0,69	0,84
170	4,73	4,16	12,79	0,69	0,67	0,82
200	4,72	3,99	12,75	0,69	0,64	0,82
230	4,68	3,98	12,72	0,69	0,64	0,82
290	4,68	3,92	12,70	0,69	0,63	0,82
350	4,59	3,92	12,65	0,67	0,63	0,82
410	4,60	3,91	12,60	0,67	0,63	0,81
470	4,70	3,90	12,59	0,69	0,63	0,81
530	4,70	3,90	12,59	0,69	0,63	0,81
590	4,70	3,90	12,59	0,69	0,63	0,81
650	4,70	3,90	12,59	0,69	0,63	0,81
710	4,70	3,90	12,59	0,69	0,63	0,81

Tabela B.7: Cinética da secagem a 60 °C: DO a 60 °Brix e 60 °C.

t (min)	m (g)	\bar{X} (b.s.) (%)	\bar{X} (b.u.) (%)	\bar{X}^*
0	45,941	36,645	57,84	1,000
5	43,403	34,378	52,389	0,886
10	41,053	31,273	45,503	0,742
15	39,873	28,744	40,339	0,634
20	38,950	27,809	38,522	0,596
30	37,469	25,627	34,457	0,511
40	36,348	23,224	30,249	0,423
50	35,534	21,317	27,093	0,357
60	34,998	20,237	25,372	0,321
70	34,507	19,095	23,602	0,284
80	34,067	17,008	20,494	0,219
100	33,524	15,431	18,247	0,172
120	33,304	13,721	15,904	0,123
140	32,996	12,200	13,895	0,081
170	32,751	11,793	13,369	0,070
200	32,560	11,080	12,461	0,051
230	32,328	10,202	11,361	0,028
290	32,304	9,698	10,739	0,015
350	32,188	9,502	10,500	0,010
410	32,126	9,424	10,405	0,008
470	32,094	9,306	10,261	0,005
530	32,069	9,227	10,165	0,003
590	32,031	9,149	10,070	0,001
650	32,023	9,109	10,022	0,000

Tabela B.8: Dimensões das amostras de maçã ao longo da secagem a 60 °C: DO a 60 °Brix e 60 °C.

t (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)	L_x[*]	L_y[*]	L_z[*]
0	7,38	5,80	15,28	1,00	1,00	1,00
5	7,28	5,64	15,16	0,99	0,97	0,99
10	7,20	5,42	15,10	0,98	0,93	0,99
15	7,13	5,30	15,09	0,97	0,91	0,99
20	6,97	5,25	15,08	0,94	0,91	0,99
30	6,78	5,21	15,01	0,92	0,90	0,98
40	6,57	4,98	14,95	0,89	0,86	0,98
50	6,52	4,89	14,74	0,88	0,84	0,96
60	6,48	4,68	14,54	0,88	0,81	0,95
70	6,42	4,36	14,36	0,87	0,75	0,94
80	6,08	4,01	14,29	0,82	0,69	0,94
100	6,01	3,97	14,13	0,81	0,68	0,92
120	5,98	3,90	14,01	0,81	0,67	0,92
140	5,68	3,86	13,96	0,77	0,67	0,91
170	5,63	3,85	13,89	0,76	0,66	0,91
200	5,62	3,83	13,88	0,76	0,66	0,91
230	5,57	3,81	13,87	0,75	0,66	0,91
290	5,52	3,72	13,87	0,75	0,64	0,91
350	5,49	3,72	13,87	0,74	0,64	0,91
410	5,50	3,72	13,85	0,75	0,64	0,91
470	5,51	3,72	13,86	0,75	0,64	0,91
530	5,51	3,72	13,86	0,75	0,64	0,91
590	5,51	3,72	13,86	0,75	0,64	0,91
650	5,51	3,72	13,86	0,75	0,64	0,91