

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

BARBARA DE SOUSA PINTO

**MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA UNIDIMENSIONAL NA
DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE FRUTAS CONSIDERANDO O
ENCOLHIMENTO**

BELO HORIZONTE - MG

2021

BARBARA DE SOUSA PINTO

**MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA UNIDIMENSIONAL NA
DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE FRUTAS CONSIDERANDO O
ENCOLHIMENTO**

Proposta de Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Linha de Pesquisa: Simulação e Otimização de Processos.

Orientador (a): Esly Ferreira da Costa Junior.

BELO HORIZONTE – MG

2021

P659m

Pinto, Barbara de Sousa.

Modelagem da transferência de massa unidimensional na desidratação osmótica de frutas considerando o encolhimento [recurso eletrônico] / Barbara de Sousa Pinto. - 2021.

1 recurso online (103 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Esly Ferreira da Costa Junior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 84-103.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia química - Teses.
2. Calor - Transmissão - Teses.
3. Frutas - Conservação - Teses.
4. Massa - Transferência - Teses.
5. Modelagem matemática - Teses. I. Costa Junior, Esly Ferreira da. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 66.0(043)

Ficha catalográfica: Biblioteca Prof^o Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA UNIDIMENSIONAL NA DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE FRUTAS CONSIDERANDO O ENCOLHIMENTO"

Bárbara de Sousa Pinto

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos à obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA**.

281ª DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26 DE FEVEREIRO DE 2021 POR:



Documento assinado eletronicamente por **Esly Ferreira da Costa Junior, Professor do Magistério Superior**, em 26/02/2021, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andrea Oliveira Souza da Costa, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 26/02/2021, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Viviane Santos Birchal, Diretor(a)**, em 26/02/2021, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0578681** e o código CRC **EEC7A53F**.

RESUMO

Desidratação osmótica é uma operação usada para remoção parcial de água de alimentos como frutas e legumes. Nesse processo, os alimentos são colocados em solução hipertônica e por osmose ocorre a perda de água do alimento para a solução. Vários fatores influenciam o processo, tais como o tipo de agente osmótico, concentração de soluto, temperatura da solução, tempo de exposição, agitação, tamanho, forma, área superficial e compactação do material. Uma ferramenta amplamente empregada para avaliar o processo de desidratação é a modelagem matemática. Neste trabalho foram desenvolvidas ferramentas numéricas e computacionais para descrever o processo de transferência de massa unidimensional na desidratação osmótica de frutas. A cinética característica desse processo foi descrita por meio de dois tipos de modelos matemáticos que usam soluções numéricas da equação de difusão. No primeiro, consideraram-se os parâmetros de processo e as dimensões do produto constantes; no segundo, admitiu-se que essas grandezas são variáveis. Para isto a equação de difusão foi discretizada via método das diferenças finitas. As soluções desenvolvidas foram validadas pela comparação com resultados fornecidos por soluções analíticas e com dados experimentais disponíveis na literatura. Além disso, para estimar a difusividade efetiva de transferência de massa, foi resolvido um problema de otimização cuja função objetivo é a Soma do Quadrado dos Resíduos (SQR) entre os valores simulados e os dados experimentais. A estratégia de estimação dos parâmetros desenvolvida mostrou uma capacidade satisfatória para obter os parâmetros necessários ao estudo deste trabalho, conseguindo chegar à região que contém os valores ótimos para os parâmetros. A partir dos dados obtidos da literatura, foram realizadas otimizações a fim de obter expressões para descrição da difusividade efetiva de água. Os resultados obtidos para as difusividades de água estão de acordo com a literatura. 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, conservação de frutas, transferência de calor e massa, lei de Fick, simulação numérica.

ABSTRACT

Osmotic dehydration is an operation used to partially remove water from foods such as fruits and vegetables. Several factors influence the process, such as the type of osmotic agent, solute concentration, solution temperature, exposure time, suspension, size, shape and compacting of the material. A tool widely used to evaluate the dehydration process is mathematical modeling. In this work, numerical and computational tools were developed to describe unidimensional mass transfer process in osmotic dehydration of fruits. The characteristic kinetics of the process was performed using two types of mathematical models that use numerical solutions of the diffusion equation. In the first, the process parameters and product dimensions were considered constant; in the second, it was admitted that these quantities are variable. For this, a diffusion equation was discretized using the finite difference method. The developed solutions were validated by comparison with results provided by analytical solutions and with experimental data available in the literature. In addition, to estimate the physical parameters of the mass transfer processes, was solved an optimization problem whose objective function is the Sum of the Square of Residues (SQR) between the simulated values and the experimental data. The tests indicated that the optimizer is able to obtain the parameters necessary for the study of this work, reaching the region containing the optimal values for the parameters. From the data obtained from the literature, optimizations were performed in order to obtain expressions to describe the effective water diffusivity. The results obtained for the diffusivities of water are in agreement with the literature. 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, fruit conservation, heat and mass transfer, Fick's law, numerical simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo da osmose.....	28
Figura 2 - Fenômenos de transporte de massa durante o processo osmótico	29
Figura 3 - Efeito das condições de secagem na integridade visual de framboesas vermelhas, (a-c) amostras de controle, ou seja, framboesas vermelhas frescas; (d-f) secas à ar a 65°C para diferentes níveis de conteúdo de água; (g – i) secas à ar a 60°C para diferentes níveis de conteúdo de água; (j – l) desidratação osmótica mais secagem à ar, temperatura da solução osmótica 30°C, tempo de imersão de 5 h para atingir 0,7 g de água / g 1 fruta, temperatura do ar 65°C. Fruta (j) apenas foi desidratada osmoticamente	33
Figura 4 - Perda de água durante a desidratação osmótica de manga à pressão atmosférica, em xarope de sacarose 45° (×), 55° (▲) e 65° (●) Brix.	38
Figura 5 - Sistema de agitação padrão de pás duplas ilustrado no trabalho de Barbosa et al. (2013).....	39
Figura 6 - Placa infinita indicando sistema de coordenadas	53
Figura 7 - Gráfico do ajuste para o raio adimensional em função da quantidade de água	60
Figura 8 - Gráfico do ajuste para a espessura adimensional em função da quantidade de água.....	61
Figura 9 - Representação da discretização de domínios unidimensionais	65
Figura 10 - Malha uniforme adimensional	67
Figura 11 - Malha unidimensional não uniforme	68
Figura 12 - Gráficos para as soluções analíticas obtidas para as condições experimentais: (a) 40°C e 40° Brix; (b) 40°C e 60° Brix; (c) 70°C e 40° Brix; (d) 70°C e 60°Brix.....	74
Figura 13 - Superposição entre os gráficos da solução analítica e da solução numérica considerando malha uniforme para as condições experimentais de 40°C e 40°Brix	76
Figura 14 - Gráfico do ajuste para o volume adimensional em função do teor de umidade.....	77
Figura 15 - Amostra in natura (a) e amostra osmoticamente desidratada (b) em solução de 40°Brix e 70°C retirada do trabalho de Silva Júnior (2015)	78

Figura 16 - Gráficos das soluções numéricas (assumindo difusividade variável e encolhimento) obtidas para as condições experimentais: (a) 40°C e 40° Brix; (b) 40°C e 60° Brix; (c) 70°C e 40° Brix; (d) 70°C e 60°Brix..... 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Artigos publicados acerca da desidratação osmótica de frutas empregando diferentes modelos matemáticos	18
Tabela 2 - Vantagens de combinar DO a alta pressão hidrostática, campo elétrico pulsado, nitrogênio líquido, irradiação gama e aplicações de ultrassom em diferentes produtos agrícolas	25
Tabela 3 - Artigos considerando-se secagem convectiva e modelo matemático	34
Tabela 4 - Condições de agitação durante o processo de desidratação osmótica de frutas com a finalidade de aumentar a taxa de transferência de massa.....	40
Tabela 5 - Inter-relação entre magnitude de encolhimento e os fatores: volume de água removido, mobilidade da matriz sólida, taxa de secagem e condições de processamento	45
Tabela 6 - Desidratação osmótica e geometria de placa plana infinita	53
Tabela 7 - Temperatura da desidratação osmótica (T), concentração da solução, teor de umidade inicial (X_i), teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}), raio inicial (R0), comprimento inicial (L0).	59
Tabela 8 - Resultados do trabalho de Silva Júnior (2015) para a otimização da perda de água para as condições experimentais (assumindo difusividade variável e encolhimento)	61
Tabela 9 - Dados experimentais da desidratação osmótica de banana obtidos por Silva Júnior (2015) para cada tratamento.....	62
Tabela 10 - Expressões do volume adimensional para o ajuste aos dados experimentais	70
Tabela 11 - Expressões para Def em função de U	72
Tabela 12 - Resultados para a otimização do teor de umidade para cada condição experimental	74
Tabela 13 - Resultados dos ajustes realizados para os dados do encolhimento na desidratação osmótica	76
Tabela 14 - Resultados para a otimização da difusividade efetiva para as condições experimentais de 40°C e 40°Brix	79

Tabela 15 - Resultados para a otimização da difusividade efetiva para as condições experimentais de 40°C e 60°Brix	79
Tabela 16 - Resultados para a otimização da difusividade efetiva para as condições experimentais de 70°C e 40°Brix	79
Tabela 17 - Resultados para a otimização da difusividade efetiva para as condições experimentais de 70°C e 60°Brix	80

LISTA DE SIGLAS

DO – Desidratação osmótica

EDO – Equação Diferencial Ordinária

MEF – Método dos Elementos Finitos

MDF – Método das Diferenças Finitas

MVF – Método dos Volumes Finitos

LISTA DE SIMBOLOS

a, b, α	Parâmetros de ajuste	[–]
c_w^t	Quantidades de água, obtido da literatura	[–]
D_{ef}	Difusividade efetiva	$[m/s^2]$
L	Dimensão característica	$[m]$
L_0	Espessura no tempo $t = 0$	$[m]$
$L_{placa}(t)$	Espessura da placa plana no tempo t	$[m]$
L^*	Valores adimensionais da espessura	[–]
m_0	Massa inicial do produto	$[g]$
m_t	Massa do produto no tempo t	$[g]$
N_p	Número de dados experimentais	[–]
n_{max}	Número de termos da série que será usado pelo programa para calcular \bar{U}	[–]
n	Número de intervalos de divisão do domínio usado na discretização	[–]
GS	Ganho de sólido	[–]
PA	Perda de água	[–]
PM	Perda de massa	[–]
R_0	Raio no tempo $t = 0$	$[m]$
R	Raio do cilindro	$[m]$
R^*	Valor adimensionais do raio	[–]
R^2	Coefficiente de determinação	[–]
SQR	Soma do quadrado dos resíduos	[–]
SQT	Soma total dos quadrados	[–]
U_i	Teor de umidade adimensional no ponto i	[–]
U_0	Teor de umidade no primeiro ponto da malha	[–]
U_n	Teor de umidade no último ponto da malha	[–]
\bar{U}	Teor de umidade médio adimensional	[–]
\bar{U}_i^{exp}	Valor médio do teor de umidade no ponto i obtido experimentalmente	[–]

\bar{U}_i^{sim}	Valor médio do teor de umidade no ponto i calculado por simulação	[–]
X	Teor de umidade	$\left[\frac{kg \text{ de } H_2O}{kg \text{ de sólido seco}} \right]$
x	Coordenada de posição	[m]
X_{eq}	Teor de umidade de equilíbrio	[–]
X_0	Teor de umidade inicial	[–]
X_i	Fração de água na amostra no tempo inicial, adimensional	[–]
X_t	Fração de água na amostra no tempo t , adimensional	[–]
X_{st}	Fração de sólidos totais da amostra no tempo t , adimensional	[–]
X_{s0}	Fração de sólidos totais da amostra no tempo inicial t_0 , adimensional	[–]
t	Tempo	[s]
τ	Tempo adimensional	[–]
θ	Posição adimensional	[–]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVO	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE FRUTAS	20
3.2	DIFUSÃO MASSÍCA	25
3.3	DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA	27
3.3.1	Mecanismos da desidratação osmótica	27
3.3.2	Secagem convectiva de frutas	30
3.3.3	Temperatura da solução osmótica	34
3.3.4	Tipo e concentração do agente osmótico	35
3.3.5	Agitação durante o processo	38
3.3.6	Geometria do material	40
3.3.7	Duração do processo	42
3.3.8	Parâmetros cinéticos do processo	42
3.4	ENCOLHIMENTO	43
3.5	MODELAGEM MATEMÁTICA	46
3.5.1	Modelagem da desidratação osmótica	47
3.5.2	Ferramentas para solução da equação de difusão	48
3.5.3	Estimativa dos parâmetros para os modelos difusivos	54
3.6	MÉTODO DAS DIFERENÇA FINITAS	56
3.7	LEVANTAMENTO DE DADOS DA LITERATURA	59
4	METODOLOGIA	63
4.1	SOLUÇÃO ANALÍTICA	63
4.2	SOLUÇÃO NUMÉRICA	64
4.2.1	Diferenças Finitas com malha uniforme para placa plana	64
4.2.2	Diferenças finitas com malha variando para placa plana	68
4.2.3	Valor médio do teor de umidade (U)	70
4.3	DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE EFETIVA VIA OTIMIZAÇÃO	71

4.3.1	Função objetivo.....	72
4.3.2	Expressões para a difusividade.....	72
4.3.3	Coeficiente de determinação	73
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
5.1	SOLUÇÃO ANALÍTICA	73
5.2	SOLUÇÃO NÚMERICA.....	75
5.2.1	Malha uniforme	75
5.2.2	Malha não uniforme	76
6	CONCLUSÕES	82
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1 INTRODUÇÃO

As frutas são importantes fontes de minerais, carboidratos e vitaminas, particularmente vitamina A e C (CIURZYŃSKA et al, 2016). O consumo de frutas tem sido valorizado por trazer benefícios à saúde e por contribuir na melhoria da qualidade de vida (DEMCZUK JUNIOR et al 2008), estando diretamente relacionado ao combate à obesidade. O consumo desse tipo de alimento tende a aumentar nos próximos anos, principalmente porque o consumidor brasileiro está cada vez mais interessado em uma alimentação mais saudável (CNA BRASIL, 2017).

Como afirma Penha e Belik (2019), a produção de frutas apresenta taxas crescentes, e isso tem implicações na geração de renda e no desenvolvimento agrícola do Brasil, que é o terceiro maior produtor mundial de frutas. Só perde para China e Índia. Esse ramo gera mais de 6 milhões de empregos, em plantações que se alastram por cerca de 3 milhões de hectares ao longo dos vários centros de produção no país e a produção anual fica em torno de 37 milhões de toneladas (ABRAFRUTAS, 2019).

Apesar da ampla produção de frutas, ocorrem perdas em toda a cadeia produtiva, principalmente na pós-colheita gerando prejuízos econômicos (Costa et al, 2015). Técnicas de conservação incipientes, embalagem, manejo, transporte inadequados e a falta de padronização e seleção favorecem o desperdício deste tipo de alimento. Em adição às causas externas, as frutas são suscetíveis a processos de metabolismo que permanecem após a sua colheita e que conduzem à rápida deterioração (SPAGNOL et al, 2018).

Nesse sentido, empregar alguma técnica de preservação industrial ao alimento é um recurso para o aproveitamento racional das frutas. No entanto, tais técnicas devem ser empregadas conservando ao máximo o valor nutricional e as características que podem ser percebidas pelos sentidos humanos (cor, brilho, odor, textura). Dentre as tecnologias disponíveis para a preservação das frutas pós colheita, destacam-se o tratamento térmico, modificação de atmosfera, desidratação e refrigeração. Além destes quatro métodos físico-químicos, a radiação gama, o ozônio (O₃) em sua fase gasosa ou diluído em meio aquoso e a radiação ultravioleta C (UV-C) também têm sido comumente

estudados para minimizar ou evitar a ação de microrganismos patogênicos que levam a deterioração do alimento (KAWANO et al, 2016).

Neste trabalho, dar-se-á ênfase a técnica de desidratação osmótica, que é uma das técnicas mais utilizadas para a preservação de nutrientes encontrados no fruto *in natura*. Por meio da desidratação tem-se a diminuição da quantidade de água livre no alimento fresco, isso favorece o aumento da vida útil do mesmo. Adicionalmente, essa tecnologia contribui com os fatores relacionados a produção, estocagem, distribuição e comercialização de frutas de qualidade, agregando valor ao produto (SANTANA NETA et al, 2013). Frutas como tâmara e uva-passa ilustram o quanto o processo de desidratação agrega valor.

No processo de desidratação osmótica (DO), impregnação ou saturação, a retirada de água ocorre com a imersão das frutas em solução hipertônica com pressão osmótica alta. A parede celular das células vegetais possui inúmeros interstícios relativamente grandes, o que as torna permeável a água e a pequenos solutos (EGEA e LOBATO, 2014). No que diz respeito ao processo de DO é importante considerar as variáveis positivas e negativas.

Uma das principais desvantagens deste processo é sinalizada pelo aproveitamento inespecífico do grande volume de solução hipertônica gerado na desidratação osmótica. Em contrapartida, as variáveis positivas são representadas pela diminuição de perdas quanto às características sensoriais, melhora na textura, aumento da estabilidade de pigmentos, modificação na proporção de açúcares e maximização da eficiência nos processos de transferência de massa e de calor (EGEA e LOBATO, 2014).

No que se refere ao desenvolvimento prático de processos osmóticos, várias pesquisas científicas retratam o comportamento de diferentes tipos de frutas no decorrer do tratamento. Esse comportamento varia entre um alimento e outro, conforme sua composição e organização da estrutura. Os estudos realizados buscam compreender o transporte de massa interno que ocorre durante a desidratação osmótica dos alimentos. Para esse fim, vários pesquisadores usam a Segunda Lei de Difusão de Fick para estimar a difusividade de massa efetiva da água e do soluto, conduzindo experimentos com condições de contorno e iniciais específicas, cumprindo as premissas envolvidas nesta lei (MERCALI, 2009).

Empregar modelagem matemática para avaliar os parâmetros cinéticos é fundamental para delinear e otimizar o processo de desidratação osmótica, sobretudo ao estabelecer relações entre estes parâmetros e variáveis como conteúdo de água e/ou sólidos, tempo, temperatura e concentração da solução osmótica (MERCALI, 2009).

É oportuno destacar, ainda, que modelos matemáticos, classificados como empíricos, semi-empíricos, modelo de difusão, planejamento fatorial, mecanicista e fenomenológico, são amplamente empregados para estudos do processo de DO (ASSIS et al, 2018). Na Tabela 1, são apresentados alguns artigos publicados no segundo decênio do século XXI em relação ao uso de modelos matemáticos na DO.

Os estudos relativos à desidratação osmótica de frutas possuem algumas limitações. Dentre estas, destaque-se o escasso número de trabalhos que empregam ferramentas numéricas na descrição do processo e o baixo índice de artigos científicos que avaliam o fenômeno de encolhimento. As ferramentas matemáticas são de primordial importância, pois possibilitam, por exemplo, considerar a variação de parâmetros físicos. Nesse sentido, a modelagem matemática foi delineada para adquirir e complementar informações teóricas relativas ao comportamento de diferentes frutas durante a remoção de água considerando-se o processo de desidratação osmótica.

Tabela 1 - Artigos publicados acerca da desidratação osmótica de frutas empregando diferentes modelos matemáticos

Autor/ano	Modelo Matemático	Produto
Khoualdia et al, (2020)	Coeficientes de difusão / segunda lei de Fick	romã
Sulistyawati et al, (2020)	Modelo de Peleg	manga
Pieters et al, (2020)	Modelo de Peleg	maça
Santos et al, (2020)	Modelos de Lewis, Page, Peleg, Handerson e Pabis	Physalis
Filho et al, (2020)	Modelo de difusão	abacaxi
Pinheiro et al, (2020)	Modelo Midilli	cajá
Belay e Abera (2020)	Planejamento fatorial	manga

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho é desenvolver ferramentas numéricas e computacionais para descrever o processo de transferência de massa unidimensional na desidratação osmótica de frutas, considerando-se o encolhimento.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Implementação da solução analítica do processo de difusão unidimensional em placa plana.
- Montagem de um problema de otimização para a estimação do coeficiente de transferência de massa, considerando-se a solução analítica.
- Resolução numérica da equação da difusão unidimensional pelo método das linhas, com discretização na direção espacial por diferenças finitas e integração do sistema de Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs) resultante por Runge-Kutta.
- Análise de convergência da solução a partir da comparação com a solução analítica.
- Proposta de encolhimento não uniforme da malha em função do teor de umidade e discretização do processo de difusão unidimensional por diferenças finitas com malha não uniforme.
- Montagem de um problema de otimização para a estimação do coeficiente de difusão para a solução numérica com malha não uniforme considerando-se o encolhimento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE FRUTAS

É crescente a conscientização quanto aos efeitos do consumo diário de frutas para uma dieta adequada no que se refere ao modelo de sociedade saudável. Tem-se também um aumento na busca por alimentos industrializados à base de frutas, tais como cereais, laticínios, sorvetes, produtos de confeitaria e panificação (SPERS et al, 2008). Do ponto de vista do consumidor, a qualidade dos alimentos depende essencialmente de aspectos sensoriais (cor, sabor, textura), aspectos microbiológicos e nutricionais. Do ponto de vista sensorial, a cor é certamente o critério mais importante para a escolha de um produto. De fato, sabor, textura e aroma, não estão disponíveis para o consumir no momento da compra, sendo a cor o único guia da qualidade (BONAZZI et al., 1996).

Apesar de serem altamente perecíveis, a maioria das frutas tropicais são muito utilizadas artesanalmente como matéria-prima na produção de doces cristalizados, compotas, refrescos, sorvetes, licores e vinhos. Portanto, desenvolver processos alternativos, simples e baratos para estender a conservação e a comercialização dessas frutas são importantes, e a DO pode ser um desses processos (COIMBRA et al, 2017).

Segundo Yadav e Singh (2012) a DO é um dos melhores métodos para aumentar a vida útil das frutas. A deterioração, em outros termos, perda de qualidade, comestibilidade ou valor nutritivo, causado ou acelerado por microorganismos pode ser inviabilizada com a formação dos produtos osmoticamente desidratados (YADAV e SINGH, 2012).

O tempo de vida útil dos produtos osmoticamente desidratados é uma de suas grandes vantagens, mostrando estabilidade microbiológica adequada por até 180 dias, tendo aceitabilidade satisfatória por todo o período de armazenamento (LIMA et al., 2004). O trabalho reportado por Castro et al. (2017), sobre desidratação osmótica de goiabas, apontou uma maior preferência dos consumidores quanto a goiaba tratada osmoticamente. Em termos da avaliação sensorial, a notaram mais doce e agradável ao paladar do que a goiaba *in natura* (sem tratamento). A intensificação quanto ao sabor após

empregar essa tecnologia é relatada por outros autores, como por exemplo, Ramya e Jain (2016), Ladim et al. (2016), Santos et al. (2018).

Entre os subprodutos do processo de desidratação osmótica, pode-se destacar a calda. Esta contém um elevado teor de açúcares, além de realçar o aroma e sabor da fruta (OLIVEIRA et al, 2012). A calda pode ainda ser aproveitada na produção de vinagre, licores e álcool, sendo uma alternativa acessível, eficiente e barata na diminuição de perdas pós-colheita, além de aumentar o valor agregado do produto final (GOMES et al., 2007). Esse aproveitamento é exemplificado por Oliveira et al. (2012), que utilizaram a calda residual da desidratação osmótica do abacaxi para elaboração de uma bebida fermentada.

Avaliando todos os fatores mencionados, é plausível apontar que a desidratação osmótica pode ser uma alternativa em relação a três fatores: excesso de produção, perecibilidade e sazonalidade das frutas (BALKE et al, 2018). Portanto, esse tratamento pode ser uma ferramenta importante no desenvolvimento de novos produtos oriundos de frutas, com propriedades funcionais e valor agregado (EGEA e LOBATO, 2014; RAMYA e JAIN 2016; LADIM et al, 2016; SANTOS et al, 2018).

Nesse contexto, ressalta-se a importância de estudar a influência de fatores, tais como, concentração e temperatura da solução na taxa de remoção de água e sólidos durante a desidratação osmótica (EGEA e LOBATO,2014). Por exemplo, com o intuito de estudar a influência da temperatura e da concentração da solução osmótica no processo de desidratação de banana seguida de secagem com ar, Fernandes et al. (2006) fizeram experimentos com fatias cilíndricas deste fruto. O estudo das variáveis concentração do soluto na solução osmótica e temperatura também foi relatado por Sulistyawati et al. (2020), considerando-se a desidratação osmótica de manga.

Segundo os autores Shi e Xue (2009), Ciużyńska et al. (2016), Sulistyawati et al. (2020) aplicar uma temperatura amena, entre 30 e 50 °C, durante o processo de DO não danifica a estrutura do tecido do fruto e não causa degradação dos nutrientes pela variação térmica aplicada. Em síntese, a DO possibilita obter alimentos secos com alto valor nutricional e propriedades

sensoriais aceitáveis com menor consumo de energia devido ao processamento a temperaturas mais baixas em comparação com os métodos tradicionais.

Contudo, o método de desidratação osmótica pode causar efeitos adversos na cor e nas propriedades da textura do produto, uma vez que geralmente é necessário um longo tempo de processo, o agente osmótico tem maior impacto na textura, o que causa alterações nos atributos sensoriais, (LANDIMA et al, 2016). Adicionalmente, cada tecido vegetal é constituído por uma permeabilidade variável, e esta por sua vez é dependente do agente osmótico (EGEA e LOBATO, 2014, LANDIM et al, 2016). Landim et al. (2016) fornecem uma visão geral dos estudos mais recentes, avaliando os efeitos da desidratação osmótica sobre os principais atributos relacionados à qualidade sensorial e funcional de frutas desidratadas, principalmente sua capacidade antioxidante, cor e textura.

Portanto, a eficiência dos processos osmóticos é avaliada considerando-se sobretudo os variados agentes osmóticos selecionados, a temperatura e o tempo de processo. Segundo Guiné (2018), a taxa de perda de água por DO é inicialmente alta, mas após 1-2 h é muito reduzida, podendo levar dias até se atingir o equilíbrio. Normalmente, são necessárias 4-6 h para reduzir os alimentos a 50% de seu peso fresco, e, por isso, é usado industrialmente como pré-tratamento para outras operações.

É importante salientar que a DO também tem sido combinada com diferentes métodos como alta pressão hidrostática, campo elétrico pulsado, nitrogênio líquido, irradiação gama, centrifugação e aplicações de ultrassom como pré-tratamentos ou aplicações simultâneas para evitar a perda de vitaminas e minerais solúveis em água, bem como o risco de deterioração microbiana (PARNIAKOV, 2015). A combinação da DO com distintos métodos será ilustrada nas próximas linhas.

Por exemplo, Zahra et al. (2018) buscaram aumentar a eficiência da DO de romãs através da aplicação de ondas de ultrassom com frequências de 25 e 40 kHz em diferentes intervalos. Os resultados mostraram que a ultrassonografia, ao induzir mais descolamento da parede celular, aumentou a perda de água e o ganho de soluto durante a DO. Um incremento de 2 e 2,7 vezes para a perda de água nas frequências de 25 e 40 kHz, respectivamente,

foi observado ao final do processo. Uma melhor qualidade da cor foi um dos impactos positivos da aplicação de ultrassom junto com a desidratação osmótica, contudo, houve uma perda do teor total de antocianina e aumento da dureza, em comparação com as amostras desidratadas osmoticamente.

Os efeitos do ultrassom no modo multifrequência e da tecnologia de vácuo na perda de água (PA) de fatias de alho durante a desidratação osmótica (DO) e seus efeitos na microestrutura do alho foram avaliados por Feng et al. (2018). Um novo método de DO para fatias de alho foi proposto - pré-tratamento a vácuo acoplado à desidratação osmótica assistida por ultrassom (VUOD). Os resultados indicaram que a PA das fatias de alho tratadas com VUOD (21,12%) foi significativamente maior que as fatias tratadas com DO (NOD) (10,67%), pré-tratamento a vácuo (VOD) (14,18%), e o modo assistido por ultrassonografia no modo multifrequencial (UOD) (11,20–13,56%). As propriedades de qualidade (teor de alicina, mudança de cor da superfície e firmeza) das fatias de alho tratadas com VUOD foram predominantemente melhores do que as amostras tratadas com NOD, VOD e UOD.

Alfaro et al. (2019) demonstraram que o pré-tratamento com nitrogênio líquido pode aumentar a permeabilidade da pele de mirtilos, amplificando assim os efeitos da desidratação osmótica através do aumento da transferência de umidade e sólidos. Mirtilos foram imersos em nitrogênio líquido (-196°C) por 10 segundos e descongelados em seguida. As amostras pré-tratadas e não pré-tratadas foram colocadas numa solução de sacarose a 60° Brix (40°C) durante 8 horas, seguido de congelação criogênica. Mirtilos pré-tratados com nitrogênio líquido mostraram maior perda de umidade e ganho de sólidos do que as amostras não-tratadas após a desidratação osmótica, embora tenham apresentado teor de antocianina e fenólicos totais semelhantes.

Ademais, a aplicação do pré-tratamento por campo elétrico pulsado (PEF - *pulsed electric field*) pode ser uma ferramenta eficaz para o aprimoramento da desidratação de diferentes tecidos de frutas e vegetais (PARNIAKOV et al, 2015). Sob o efeito do PFE com força de campo elétrico E de 0,5 a 5 kV / cm e duração de pulso de vários microssegundos a vários milissegundos, as membranas celulares tornam-se eletroporadas e permeáveis para pequenas moléculas ou até mesmo algumas macromoléculas. O processamento, auxiliado

por PFE, também tem um bom potencial de morte microbiana, preservação e permite evitar alterações indesejáveis em materiais que são típicos de outras técnicas, tais como térmicas, químicas e enzimáticas.

A irradiação gama é usada para prolongar a vida útil de produtos frescos, já que ajuda a retardar o crescimento de microrganismos patogênicos, germinação de vegetais, desinfestação de insetos e esterilização de alimentos. Também aumenta a permeabilidade do tecido da planta, danificando a estrutura do tecido interior e maximizando assim a taxa de transferência da massa durante a desidratação osmótica. A irradiação gama influenciou significativamente a cinética de secagem e características de qualidade, ou seja, aparência, razão de reidratação e teor de vitamina C da batata desidratada. Em pesquisas com cenouras, verificou-se que os valores de difusividade para difusão de soluto foram menores, enquanto a infusão de água foi maior durante a reidratação de amostras de cenoura secas osmoticamente e irradiadas com radiação gama. O uso de solução osmótica acima de 10° Brix durante o processo combinado causou o mínimo consumo de água e maior perda de soluto quando comparado ao controle (AHMED et al, 2016).

O processamento em alta pressão hidrostática (HHP) é utilizado em escala industrial para aumentar a estabilidade do produto, inibindo microrganismos e atividades enzimáticas. O pré-tratamento a alta pressão (100–800 MPa) altera a estrutura da parede celular, aumenta a permeabilização e a ruptura celular. Luo et al., (2018) mostrou que a HHP pode ser uma maneira eficiente de acelerar a transferência de massa de frutos de ameixa durante o processo de DO, pois aumentou a taxa inicial e o valor de equilíbrio tanto do ganho de sólidos quanto da perda de água, embora o efeito não tenha sido proporcional à pressão aplicada. O tratamento com HPP promoveu um fluxo de água que flui do vacúolo para o citoplasma, mais pronunciado no tratamento com 400 MPa. Após DO, a aplicação de HPP causou uma distribuição diferente da água nos compartimentos das células. Além disso, os resultados mostraram que a aplicação de 400 MPa provavelmente causou alguns danos irreversíveis às membranas celulares. A observação microscópica permitiu avaliar a perda de viabilidade celular que se completou após o tratamento com 200 MPa.

Na Tabela 1 é ilustrado o quanto combinar a DO com os processos mencionados anteriormente influencia de modo positivo os diferentes produtos agrícolas.

Tabela 2 - Vantagens de combinar DO a alta pressão hidrostática, campo elétrico pulsado, nitrogênio líquido, irradiação gama e aplicações de ultrassom em diferentes produtos agrícolas

Método combinado	Fruta	Tempo	Vantagem
Ultrassom (25 a 40 KHz)	Romã	-	Coloração
Ultrassom multifrequência	Alho	-	Coloração e firmeza
Nitrogênio líquido	Mirtilo	8 hr	Perda de sólidos
Campo elétrico pulsado	Diferentes tecidos	10^{-6} a 10^{-3} s	Morte microbiana
Irradiação gama	Batata, cenoura	-	Cinética de secagem
Alta pressão hidrostática	Ameixa	-	Permeabilização

3.2 DIFUSÃO MASSÍCA

A transferência de massa pode ser definida como massa em trânsito, resultado da diferença de concentração de uma espécie em uma mistura ou a migração de uma ou mais espécies químicas em um dado meio, que pode ser sólido, líquido ou gasoso. O transporte das espécies químicas pode ser realizado por dois mecanismos: difusão e/ou convecção (MERCALI, 2009).

A convecção acontece quando há transferência de massa através de um fluido em movimento. A convecção forçada acontece quando o escoamento do fluido é promovido pela ação de agentes externos, como ventiladores, bombas, centrifugas, ventoinhas. Já a convecção livre ocorre quando uma força de empuxo age sobre um fluido que apresenta gradientes de massa específica (MERCALI, 2009).

A difusão é um processo de transporte em nível molecular, sendo que há uma movimentação aleatória das moléculas devido à diferença de potencial químico das espécies. Dessa forma, em nível macroscópico, há o transporte do soluto das zonas de concentração mais elevada para as zonas de menor concentração (EGEA & LOBATO, 2014).

O processo de difusão é descrito para os três estados de agregação da matéria e para muitos casos, a difusão ocorre como parte integrante de outros

fenômenos. Tratando-se de frutas, deve-se considerar principalmente o estado sólido, onde a difusividade mássica é da ordem de $10^{-11} \text{ m}^2 / \text{s}$ (SILVA et al, 2020).

No escopo do trabalho delineado por Mercali (2009) é ressaltado que a difusividade mássica é distinta da difusividade térmica e da quantidade de movimento. Em seu texto Mercali (2009) também diferencia três tipos de difusividade mássica: molecular, em alimentos e mássica efetiva. De forma sucinta, pode-se considerar que a difusividade mássica molecular é a medida do número de moléculas de uma amostra que pode ser transportada entre as moléculas de outras amostras para eliminar o gradiente de concentração existente. Em contrapartida, a difusividade mássica efetiva é uma quantidade empírica e não uma propriedade física ou química que pode ser mensurada, sendo vastamente empregada nos casos em que o sólido é constituído por uma rede de poros ou sistemas heterogêneos químicos estruturalmente complexo. A difusão mássica relacionada ao alimento vai considerar a transferência de água e massa, avaliando-se simultaneamente a transformação do mesmo considerando-se sobretudo as variações no gradiente de concentração em função do tempo.

Por definição, difusividade efetiva é estabelecida como a taxa de transferência de uma substância que se difunde por meio de um espaço com gradiente de concentração por unidade de área. De modo mais simples é uma propriedade relacionada com a facilidade de saída de água do alimento. Uma vez que a difusividade de massa varia conforme alterações nas condições de secagem ela não é intrínseca ao produto, logo apraza-se denominá-la de difusividade efetiva de massa. No entanto, trata-se de uma propriedade que abarca os efeitos de todos os fenômenos, sendo complexo fazer estimativas precisas dessa propriedade (SILVA, 2010; MAROUSIS et al, 1989).

Cabe salientar que o coeficiente de difusão ou difusividade mássica da fruta é um dos parâmetros fundamentais que regem o processo de secagem. É esperado ainda que, quanto maior o coeficiente de difusão, maior a taxa de secagem. Tal processo é ainda influenciado pela concentração da solução desidratante, considerando a DO (FILHO et al, 2015). A difusividade de massa depende fortemente da temperatura, pressão e dos componentes envolvidos (MERCALI et al, 2011).

Destacam-se aqui artigos publicados considerando-se a difusão mássica na desidratação osmótica. Por exemplo, Zecchi e Gerla (2019) utilizaram o fluxo de difusão mássica em seu modelo matemático para avaliar o efeito do encolhimento e variação do volume da fruta (tomate) durante o processo de DO. Por sua vez, os autores Zielinka e Markowski (2017) chamam atenção para o escasso número de estudos em relação a difusividade efetiva em sólidos durante a desidratação osmótica de *cranberry* inteiros.

A desidratação osmótica de outras frutas, como a goiaba (cortada em pedaços em forma de paralelepípedos), considerando as mudanças que ocorrem durante o processo de difusividade de massa efetiva, também foi estudada. Para tanto, empregou-se uma solução numérica da equação de difusão unidimensional juntamente com um otimizador para determinar os parâmetros envolvidos no processo (SILVA et al, 2014).

Entre as frutas empregadas para avaliar a difusividade mássica, destaca-se, também, o abacaxi (RAMALLO e MASCHERONI 2004), a banana (MERCALI et al, 2010) e o melão (DARVISHI et al, 2015). Segundo estudo conduzido por Ramallo e Mascheroni (2004), assumindo a difusão mássica como unidimensional, o diâmetro da amostra permaneceu quase constante durante a desidratação devido à estrutura particular dos tecidos de abacaxi.

3.3 DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA

3.3.1 Mecanismos da desidratação osmótica

Dependendo das condições de operação e do tipo de produto, muitos mecanismos podem atuar no processo de desidratação osmótica ao mesmo tempo. Estes mecanismos podem ser: osmose, difusão, interação dos fluxos e encolhimento dos produtos, que podem reduzir em até 50% do volume inicial. (RAOULT-WACK; 1994, EGEE & LOBATO, 2014).

A osmose, conforme esquema ilustrado na Figura 2, é o movimento de um solvente, no caso, a água. Tem-se, portanto, um transporte de solvente entre meios com diferentes concentrações de solutos que estão separados por uma

membrana semipermeável. A solução mais concentrada é chamada hipertônica e a de menor concentração é chamada de hipotônica (EGEA & LOBATO, 2014).

No caso da desidratação osmótica de frutas, os tecidos alimentares são normalmente imersos em solução concentrada de substâncias osmoativas, como sacarose, frutose, glicose, xarope de amido, glicerol e cloreto de sódio a temperaturas moderadas, reduzindo assim os danos devido ao calor na textura, sabor e cor dos alimentos (SIMAS et al, 2013). Essas substâncias osmoativas podem ser utilizadas isoladas ou em combinação, sendo a combinação mais comum cloreto de sódio e sacarose, como destacado no trabalho de Mai et al. (2015).

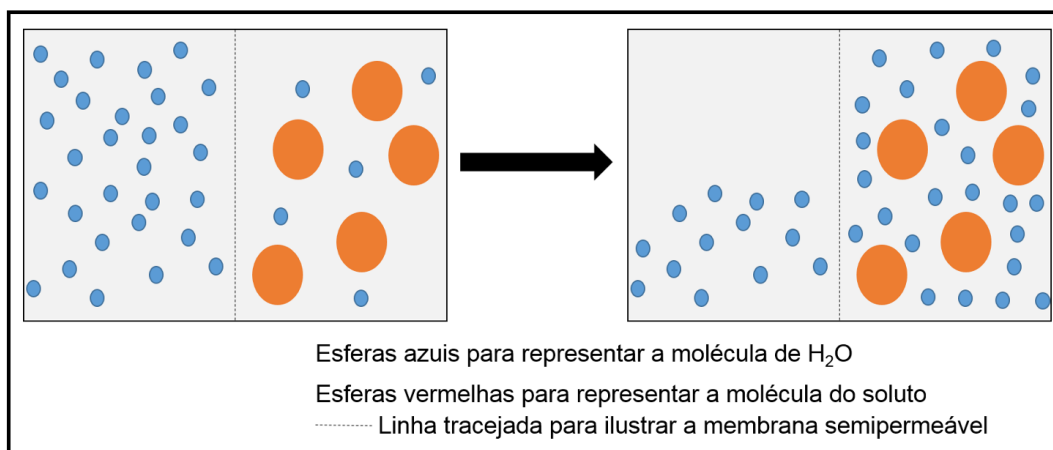


Figura 1 - Esquema representativo da osmose

O fluxo da substância osmoativa adentrando no tecido altera sua composição química, além de resultar em três tipos de fenômenos de transferência de massa. Esses fenômenos compreendem: água saindo do tecido alimentar para a solução osmótica; transferência de soluto da solução para o tecido alimentar; lixiviação dos próprios solutos do tecido alimentar (açúcares, minerais, vitaminas, ácidos orgânicos) em direção à solução (RAMYA e JAIN, 2016). Esses fenômenos são ilustrados na Figura 2.

No terceiro fenômeno, a transferência é insignificante em comparação com os outros dois, mas essencial no que diz respeito à composição do produto. A diferença na pressão osmótica entre as soluções de cada lado da membrana celular é a força motriz do processo (AKHARUME, et al, 2019). Componentes seletivos e de baixa massa molecular na seiva das células, como açúcares e ácidos orgânicos, se difundem para a solução circundante de maior pressão

osmótica. Outros componentes celulares, apenas em pequena medida, passam para fora da membrana. A difusão de água e substâncias de baixa massa molecular da estrutura do tecido durante a desidratação osmótica é acompanhada pela difusão em contracorrente de substâncias osmoativas.

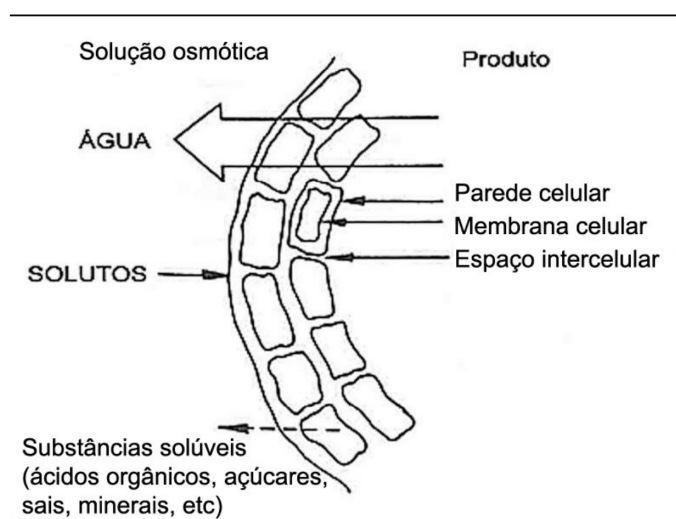


Figura 2 - Fenômenos de transporte de massa durante o processo osmótico

Fonte: adaptado Souza (2007).

Por esta razão, a desidratação osmótica é caracterizada pelo complexo movimento de água, substâncias dissolvidas na seiva celular e substâncias osmoativas (LEWICKI e LENART, 2006; TORTOE, 2010; AKHARUME et al, 2019). Como a solução hipertônica apresenta maior pressão osmótica com menor atividade de água, serve como uma força motriz para a retirada de água da solução de células para a solução osmoativa.

Todas estas trocas de massa entre a solução osmótica e o alimento podem ter um efeito no rendimento global e na qualidade do produto desidratado. Assim, tais condições são importantes nos processos de desidratação osmótica para permitir o contra fluxo de solutos e água (EGEA e LOBATO, 2014). Nas plantas, devido à natureza semipermeável do tecido vegetal e ao baixo tamanho molecular da água, o fluxo de água que sai do alimento é muito maior do que o ganho de soluto da solução osmótica. Isso resulta em uma diminuição do teor de água do produto com o tempo até que a condição de equilíbrio seja estabelecida. Portanto, o peso do alimento diminuirá, assim como a atividade da água. Ruskova et al., 2015, destacaram que até 50% de redução no peso fresco de

frutas ou vegetais pode ser alcançado por desidratação osmótica. Ainda neste trabalho, observou-se, por exemplo, que os valores de redução de peso variaram de 17 a 62% para a desidratação osmótica de cassis ou groselha negra. A temperatura, durante o processo de desidratação de cassis teve maior impacto na redução de peso. As temperaturas de tratamento foram 43, 50, 60, 70, 77°C, onde as temperaturas mais elevadas contribuíram para maior redução de peso (RUSKOVA et al, 2015).

Cabe ainda salientar que um aumento da concentração da solução osmótica resulta em um aumento correspondente na perda de água e na taxa de secagem (CONWAY et al, 1983). Da mesma forma que o processo de secagem, a desidratação osmótica pode causar o encolhimento, que é a redução das dimensões da fruta por causa da modificação na microestrutura do tecido fresco, no qual se constata um maior número de células alongadas e de cavidades, dentre outras alterações estimuladas pelo estresse térmico e pela retirada de umidade. Adicionalmente, a DO contribui para a maciez do tecido e para a redução do encolhimento durante a secagem. Isso é influenciado pela impregnação do soluto desidratante durante o tratamento (EGEA e LOBATO, 2014). O encolhimento ou contração volumétrica, como apontado por Corrêa et al. (2015), é um dos fatores, *a priori*, relacionados à perda de qualidade de alimentos desidratados que pode causar alterações estruturais, tais como mudanças em sua densidade.

3.3.2 Secagem convectiva de frutas

A desidratação osmótica é um pré-tratamento dado a frutas e vegetais, no entanto, ela não remove toda a água presente nos referidos produtos, o que pode influenciar o teor de umidade ideal para que a mesma possa ser armazenada de forma segura. Portanto, é necessário empregar uma técnica de secagem complementar.

A secagem é definida como a remoção de água de substâncias sólidas ou líquidas por evaporação. Na secagem natural, o processo leva muito tempo e o produto se torna suscetível a interações ambientais. Isso pode resultar em depreciação da qualidade e do valor econômico dos produtos. Portanto, às

vezes, é necessário o uso de secadores artificiais, para que o processo de secagem seja reduzido e o prazo de validade dos produtos seja aumentado (DARICI e SEN, 2015).

A desidratação osmótica pode ser associada à secagem por convecção, também denominada secagem convectiva, para melhorar as características físico-químicas das frutas e / ou vegetais a serem processados (MENESES, 2018). Por exemplo, Bustos et al. (2018) avaliaram o efeito da secagem por convecção na cor, compostos bioativos e atividade antioxidante de frutos silvestres e caracterizaram quimicamente a composição polifenólica de framboesa, amora, groselha e groselha.

Ainda segundo Bustos et al. (2018), o estudo da degradação de compostos bioativos em frutos secos é complexo e depende das condições utilizadas durante a secagem. É necessário um melhor entendimento do método de secagem de frutas para melhorar a preservação dos compostos bioativos, não apenas para evitar sua perda durante o processamento e armazenamento, mas também para determinar possíveis implicações para a saúde humana. Além disso, o uso de um método de secagem simples e de baixo custo, como uma secagem por convecção, é uma boa alternativa para incluir o produto seco em outras matrizes alimentares sem aumento considerável de custos.

Em síntese, a secagem convectiva de frutas é a técnica de secagem mais implementada para estabilizar frutas e aumentar sua vida útil. Por definição, secagem via convecção é o processo de remoção de água empregando ar, recorrendo-se a transferência simultânea de calor, massa e momento. O calor necessário é conduzido as frutas por uma corrente de ar quente. A energia é transferida para a superfície do produto por convecção e depois é transferida para o interior por difusão ou convecção, dependendo da estrutura do produto (CASTRO et al, 2018). É oportuno destacar que a secagem por convecção é a técnica mais amplamente adotada na indústria de alimentos, apesar de exigir longos períodos de secagem e altas temperaturas (BUSTOS et al, 2018). Além disso, como já mencionado no tópico 3.1, a DO pode ser combinada com outras técnicas, o mesmo é válido para a secagem convectiva. Tem sido destacado que a desidratação osmótica é um pré-tratamento dado a frutas e vegetais, ou seja, ela não remove toda a água presente nos referidos produtos. Em geral, a

desidratação osmótica retira 30-40% da água contida no alimento (SUTAR et al., 2012), assim, ainda se tem um teor de água alto para sua conservação, sendo necessário um procedimento complementar de secagem para que o produto apresente o teor de umidade ideal para que possa ser armazenado de forma segura. Dessa forma, a maioria dos trabalhos sobre desidratação osmótica, também estudam a secagem complementar, avaliando os efeitos do pré-tratamento no tempo total do processo e na qualidade final do produto. Teles et al. (2006) estudaram a otimização do tempo do processamento conjunto da desidratação osmótica de melão seguida de secagem convectiva. A

Figura 3 ilustra framboesas frescas, secas por secagem convectiva, desidratadas osmoticamente e a combinação desses dois métodos. É nítido como os métodos em conjunto entregaram framboesas com melhor integridade visual e cor.

Da mesma forma que na desidratação osmótica, os modelos difusivos são amplamente empregados para descrever a secagem por convecção de frutas e os processos de transferência de calor e massa. Nos processos que utilizam esses modelos, o uso de soluções analíticas é comum, no entanto, uma das principais vantagens das soluções numéricas é a possibilidade de considerar a variação dos parâmetros físicos e o volume do produto, o que é mais adequado fisicamente. Essas considerações são apontadas no trabalho de Souza et al. (2017).

Souza et al. (2017) avaliaram a cinética de secagem da polpa de pequi empregando secagem convectiva usando como variáveis condições de temperatura (50, 60, 70 e 80°C) e espessura (0,5; 1,0 e 1,5 cm) na velocidade do ar $1,0 \text{ m s}^{-1}$, com adição de adjuvante de secagem. Por intermédio dos dados experimentais de cinética de secagem da polpa de pequi, delinearam-se as curvas de secagem cujos modelos matemáticos (Midilli, Page, Henderson e Pabis e Newton) foram ajustados aos dados experimentais. Sendo que o melhor modelo para ajuste dos dados experimentais foi o modelo de Midilli. Há um consenso entre a comunidade científica em relação ao uso do modelo de Midilli. Trata-se de um modelo matematicamente mais prático, apresentando menor número de parâmetros, tornando mais simples sua aplicação e uso, em simulações de secagem (SOUZA et al, 2017; GONELI et al, 2014). Estes

trabalhos, assim como aqueles mencionados na Tabela 3, ilustram o quanto os modelos matemáticos podem ser importantes para simular uma determinada condição experimental em relação a secagem convectiva.

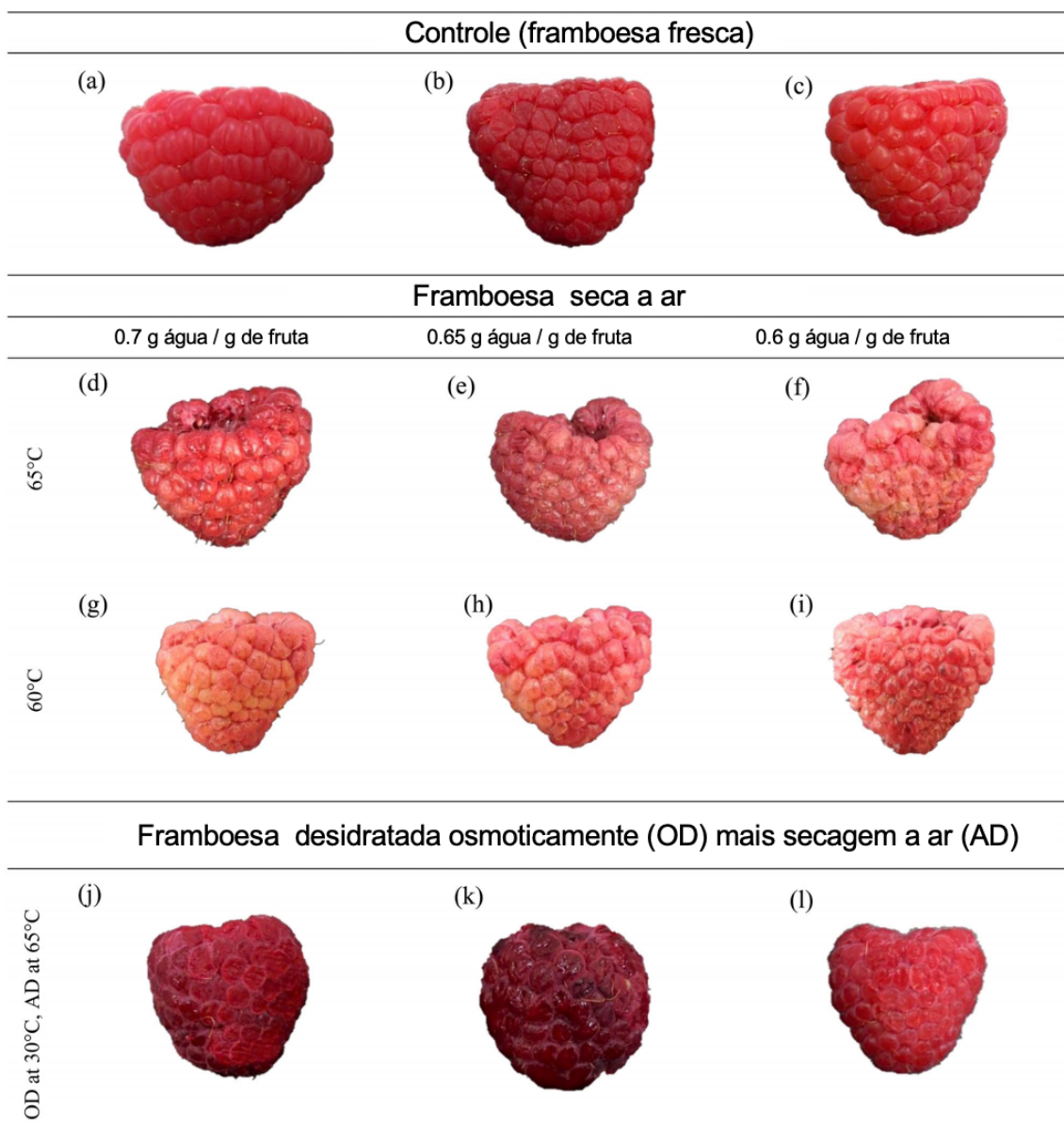


Figura 3 - Efeito das condições de secagem na integridade visual de framboesas vermelhas, (a-c) amostras de controle, ou seja, framboesas vermelhas frescas; (d-f) secas à ar a 65°C para diferentes níveis de conteúdo de água; (g – i) secas à ar a 60°C para diferentes níveis de conteúdo de água; (j – l) desidratação osmótica mais secagem à ar, temperatura da solução osmótica 30°C, tempo de imersão de 5 h para atingir 0,7 g de água / g 1 fruta, temperatura do ar 65°C. Fruta (j) apenas foi desidratada osmoticamente
 Fonte: adaptado QUINTANILLA et al (2020)

Tabela 3 - Artigos considerando-se secagem convectiva e modelo matemático

Autor/ano	Modelo matemático	Condições estabelecidas no estudo
Dotto et al (2017)	Equações parciais diferenciais	O modelo difusivo-convectivo foi capaz de prever os perfis experimentais de umidade e temperatura durante a secagem das peras.
Darici e Sen (2015)	Modelo de Midilli	Em termos de secagem convectiva, os valores experimentais (temperaturas na faixa 50-80°C, velocidades entre 0,5-2,0 m/s, valores de umidade de 5 a 20% e duas espessuras de fatia do Kiwi) e aqueles estimados considerando-se o modelo de Midilli foram próximos.
Santos et al (2019b)	Modelo logarítmico	O modelo logarítmico foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da cinética da secagem das fatias de acuri em todas as condições avaliadas. Fatias de acuri, com espessura de aproximadamente 4,07 mm, foram secas nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C. Os coeficientes de difusão efetivos da ordem de 10^{-10} m ² /s, aumentaram com a elevação temperatura.
Santos et al (2019a)	Modelo de Midilli	As condições de secagem convectiva foram: diferentes temperaturas (40, 50 e 60°C) e espessuras da camada (0,3 e 0,6 cm), com velocidade do ar constante em 1,8 m/s. Sendo que o modelo de Midilli foi o que melhor descreveu a cinética de secagem das amostras de patauá para todas as condições mencionadas.
Araújo et al (2017)	Modelo de Page	Ajuste do modelo matemático (modelo de Page) aos dados experimentais da cinética de secagem dos frutos de amendoim em camada delgada, submetidos a distintas temperaturas (40; 50; 60 e 70°C) do ar de secagem.
Kian-P e Karatas (2019)	Modelo Midilli-Kucuk	Modelo Midilli-Kucuk foi ideal para especificar as características de secagem por convecção das maçãs.

3.3.3 Temperatura da solução osmótica

Em síntese, o processo de transferência de massa durante o pré-tratamento osmótico bem como as mudanças na composição química do alimento depende de muitos fatores, como: temperatura da solução, natureza e peso molecular do agente de desidratação, concentração da solução, razão entre a solução e o produto, geometria e estrutura celular do alimento. Com o aumento da temperatura, tem-se, por exemplo, que a viscosidade da solução osmótica diminui, o que, por sua vez, diminui a resistência externa à taxa de transferência de massa na superfície do produto e, assim, facilita a vazão de água e aumenta a taxa de difusão de soluto nas fatias. Além disso, temperaturas mais altas facilitam o inchaço, plastificação das membranas celulares e, assim, liberam ar retido do tecido. Ainda, elevar a temperatura aumenta também o coeficiente de transferência de calor da superfície, o que influencia a taxa de transferência de calor e massa (BANIWAL e HATHAN, 2015).

O fator mais importante que afeta a taxa de transferência de massa na desidratação osmótica é a temperatura. Aumentar a temperatura do processo acelera a perda de água, enquanto a absorção de sólidos é menos afetada (CONTREAS e SMYRL, 1981; CONWAY et al, 1983; AKBARIAN et al, 2014, EGEE e LOBATO, 2014; AHMED et al, 2016; MENESES, 2018). Contudo, acima de 50°C, pode ocorrer deterioração do sabor e escurecimento enzimático. A retenção de ácido ascórbico e de clorofila também são marcadamente afetadas. Temperaturas maiores que 60°C modificam as propriedades do tecido, favorecendo o fenômeno da impregnação e, portanto, o ganho de sólidos. Inicialmente, a perda de água e o ganho de sólidos aumentam até 50°C, dependendo do fruto e da variedade, e, posteriormente, caem acentuadamente, tornando-se quase constantes a 60°C, o que indica aumento desprezível na taxa de difusão de sacarose acima de 60°C. Como a perda de água é maior em temperaturas mais altas, o equilíbrio osmótico é obtido pelo fluxo de água da célula e não pela difusão sólida (CHANDRA & KUMARI, 2014).

Na literatura referente ao tratamento osmótico, a temperatura em torno de 50°C foi utilizada para hortaliças e frutas devido às seguintes razões: 1) esta temperatura razoável confinou a níveis aceitáveis a deterioração do sabor, textura e compostos termossensíveis dos materiais, 2) escurecimento enzimático e a deterioração do sabor dos frutos teve início na temperatura de 49°C, e 3) essa temperatura também foi eficiente para manter a viscosidade da solução e tempo de infusão adequado, sem alterar a qualidade dos frutos (BANIWAL e HATHAN, 2015; AKBARIAN et al, 2014; RAFIQ et al, 2012).

3.3.4 Tipo e concentração do agente osmótico

A seleção do soluto é um fator crucial por estar conectado com as modificações nas características sensoriais e nutricionais do produto final, além de afetar os custos de processo (EGEE & LOBATO, 2014). O tipo de soluto e sua concentração afetam fortemente a cinética de retirada de água, teor de água de equilíbrio, massa molecular, o estado iônico e o ganho de sólidos. Por exemplo, com aumento da massa molar do soluto, a perda de massa e a desidratação são favorecidas e tanto a taxa de equilíbrio quanto a de secagem

aumentam com o aumento da concentração de xarope osmótico. Por sua vez, o tamanho molecular do soluto osmótico tem resultado significativo na relação entre perda de água e ganho de sólidos. Sendo que, quanto menor o soluto, maior a profundidade e a extensão da penetração do soluto (CHANDRA & KUMARI, 2014).

Embora qualquer soluto que se dissolve em água possa ser usado, os compostos comumente empregados como agente osmótico são açúcares e cloreto de sódio (RAOULT-WACK, 1994). Açúcares foram utilizados na desidratação osmótica de frutas, enquanto o cloreto de sódio, na de hortaliças (CONTRERAS e SMYRL, 1981; AZOUBEL e MURR, 2004; YADAV e SINGH, 2012). Apesar do NaCl ser um excelente agente osmótico, o sabor do produto torna-se salgado, o que pode não ser desejável. Assim, o açúcar tem sido relatado como excelente agente osmótico que proporciona muitos benefícios ao ser inibidor da polifenoxidase, escurecimento oxidativo causado por enzimas em muitos vegetais e frutas. O açúcar também é benéfico no que diz respeito a proteger os compostos voláteis essenciais, sendo bom para restaurar as propriedades sensoriais do material alimentar original (MANCILLA et al, 2013). Os açúcares ainda contribuem com a estabilidade dos pigmentos.

Outra possibilidade refere-se à combinação de solutos para verificar as propriedades dos materiais. Muitos pesquisadores relatam que a adição de uma pequena quantidade de cloreto de sódio à solução de açúcar impulsionou a força de secagem osmótica devido à sua baixa massa molar e maior capacidade de diminuir a atividade da água (LERICI et al., 1985; TAIWO et al., 2003; AZOUBEL e MURR, 2004; YADAV e SINGH, 2012; MIRZAYI et al 2014). Mirzayi et al. (2014), por exemplo, preparam soluções osmóticas combinando as seguintes proporções de cloreto de sódio e sacarose: dois níveis de concentração de açúcar (50 e 60°Brix), três níveis de conteúdo de NaCl (0, 5% e 10% p/v); para avaliar a eficácia de difusividade, perda de água e ganho de sólidos na desidratação osmótica de bananas. Esse estudo revelou que a perda de água aumentou com aumento dos conteúdos de sacarose e sal, sendo que as perdas mínimas e máximas de água observadas foram de 9,0% (com 50°Brix e 0% sal) e 46,5% (com 60°Brix e 10% sal), respectivamente. Ademais, uma porção pequena de sal reduziu o ganho de sólidos enquanto o conteúdo de açúcar

aumentou o mesmo, ou seja, observou-se que o uso de NaCl dificultou a penetração da sacarose nas bananas.

A concentração do agente osmótico também afeta a cinética de transferência de massa durante a desidratação osmótica (AHMED et al, 2016). O aumento na concentração da solução osmótica leva a uma maior taxa de perda de água até que o nível de equilíbrio seja alcançado (TORTOE, 2010). A diferença no potencial osmótico entre a solução e a amostra de fruta resultou em maior taxa de difusão de soluto e água (AHMED et al, 2016). Falade et al. (2007) estudaram o fenômeno de transferência de massa osmótica de placas de melancia usando três diferentes concentrações de solução de sacarose (40°B, 50°B e 60°B). A perda de água e o ganho de sólidos das placas de melancia tratadas com a maior concentração da solução osmótica foram maiores. Da mesma forma, Ispir e Togrul (2009) avaliaram a taxa de transferência de massa do damasco durante a desidratação osmótica. Frutos de damasco foram imersos em três diferentes concentrações de sacarose (40%, 50% e 60%). A maior concentração de sacarose leva a maiores gradientes de pressão, levando a um maior ganho de sólidos e perda de água ao longo do período de tratamento osmótico. Da mesma forma, Mundada (2011) estudou a influência de várias concentrações de sacarose (40, 50 e 60°Brix) na taxa de transferência de massa de arilos de romã durante a desidratação osmótica. Os arilos de romã embebidos em solução de sacarose 60°B apresentaram maior ganho de sólidos e perda de água em comparação com as amostras embebidas em solução osmótica de 40 e 50°Brix. Analogamente, Sousa Neto et al. (2005) estudaram a desidratação osmótica de manga em soluções de sacarose (45, 55 e 65°Brix) e perceberam aumento na perda de água com o aumento da concentração, conforme Figura 4.

No entanto, alguns trabalhos relataram que alta concentração do agente osmótico pode não aumentar o ganho de sólidos (Phisut, 2012). Giraldo et al. (2003) estudaram a transferência de massa durante desidratação osmótica da manga em sacarose com concentrações de 35, 45, 55 e 65°Brix. A taxa de transferência de água aumentou quando a concentração de sacarose aumentou até 45°Brix, mas esse efeito não apareceu entre 55 e 65°Brix, sendo que a taxa foi ligeiramente maior para o tratamento a 55°Brix. Assim, um efeito de endurecimento pode ser responsável pela redução da transferência de massa

na concentração mais alta de sacarose. Quando a solução externa é mais concentrada, a penetração do líquido externo é mais limitada pela viscosidade. (Phisut, 2012).

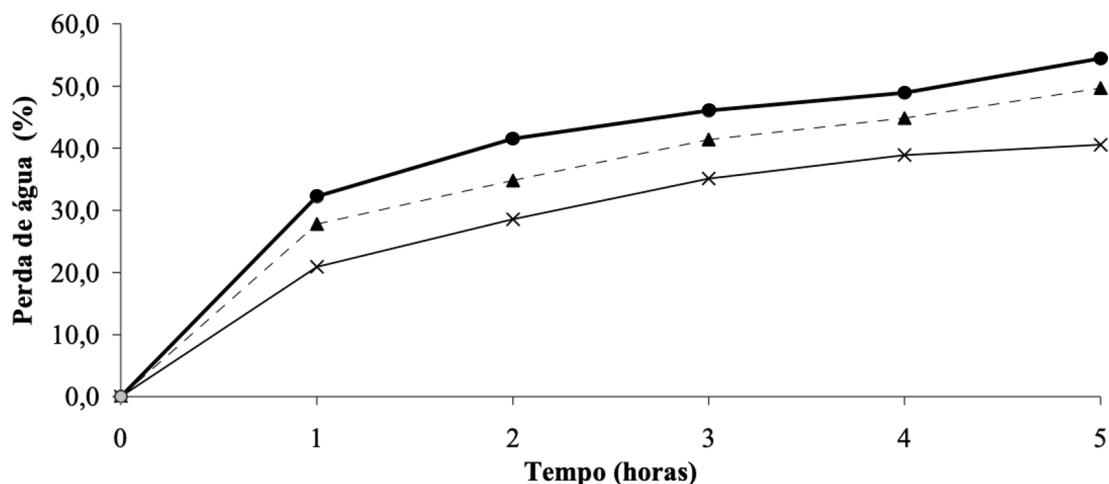


Figura 4 - Perda de água durante a desidratação osmótica de manga à pressão atmosférica, em xarope de sacarose 45° (x), 55° (▲) e 65° (●) Brix.

Fonte: adaptado SOUSA NETO et al (2005)

3.3.5 Agitação durante o processo

A agitação aumenta a taxa de transferência de massa no decorrer do processo osmótico devido à redução da resistência pelo processo de diluição localizado. O uso de soluções altamente concentradas de açúcar cria problemas, ou seja, flutuação das porções de alimentos, dificultando o contato entre a solução osmótica e os materiais alimentares, minimizando assim as taxas de transferência de massa (AHMED et al, 2016). Na Tabela 6, são mostradas algumas das principais condições de agitação para DO de frutas recentemente publicadas. A agitação induz a redução na taxa de ganho de sólidos por um período de processo mais longo. Isso pode ser causado pela maior perda de água, que altera o gradiente de concentração do soluto dentro da partícula de alimento. Uma vez que a difusão do soluto na célula é lenta, a maior parte acumula-se como uma fina camada sub-superficial (TORTOE, 2010; PAPAZOGLU e KATSANIDIS, 2019).

Papazoglou e Katsanidis (2019) pontuam ainda que concentrações mais altas de açúcar aumentam a viscosidade da solução osmótica e, portanto, é

necessária agitação durante o processo, a fim de manter uma concentração uniforme da solução osmótica. Tem-se ainda, que a perda de água é aumentada quando a desidratação osmótica é conduzida sob agitação usando soluções de sacarose a 20°C (MOREIRA et al. 2007; PAPAZOGLU e KATSANIDIS, 2019). Nessa perspectiva, tem-se ainda que aumentar a concentração, temperatura e nível de agitação resulta em maiores taxas de desidratação (ASSIS et al, 2016).

A agitação assegura um contato contínuo da superfície da amostra com a solução osmótica concentrada, garantindo um gradiente alto na interface produto/solução. Portanto, a agitação tem um importante impacto na perda de massa, sempre que a remoção de água é caracterizada por uma grande resistência de transferência de massa externa. Este é o caso quando a água que sai da superfície da partícula atinge um meio de alta viscosidade, de movimento lento ou imóvel e se acumula em uma zona de contato diluída progressivamente. Assim, a agitação é um bom processo complementar para maximizar a taxa de transferência de massa, diminuindo o tempo de contato entre o alimento e a solução osmótica (AHMED et al, 2016; RAMYA e JAIN, 2016). Na Figura 9, tem-se um esquema representativo de um recipiente com agitação empregado na DO.

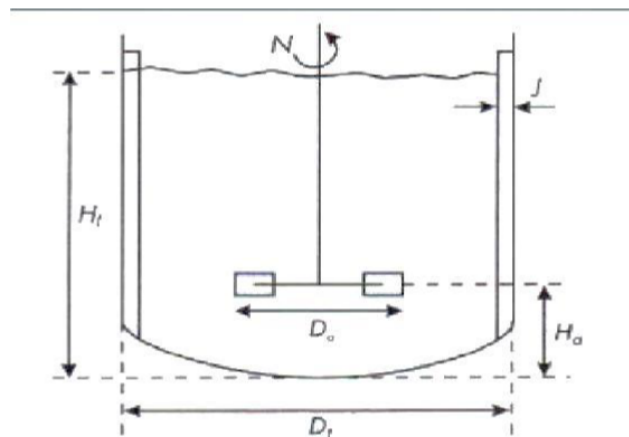


Figura 5 - Sistema de agitação padrão de pás duplas ilustrado no trabalho de Barbosa et al. (2013).

Tabela 4 - Condições de agitação durante o processo de desidratação osmótica de frutas com a finalidade de aumentar a taxa de transferência de massa.

Fruta	Condição de agitação	Autor/ano
Mangaba	Agitação mecânica a 60 rpm	Silva et al, 2020
Banana	Agitação mecânica com agitador magnético. Foi mostrado que agitação mecânica precisa de muito mais tempo para a remoção eficiente da água em comparação com a sonicação.	Farhaninejad et al, 2017
Mamão	Agitação manual por 15 minutos	Mahendranathan et al, 2019
Tomate	A solução de sacarose foi agitada continuamente a 70 rpm durante DO.	Allahdad et al, 2019
Kiwi	As amostras foram colocadas em uma grade metálica dentro de um recipiente hermeticamente fechado com agitação magnética, contendo a solução hipertônica	Brochier et al, 2019
Mexerica	Agitação em incubadora a 55 rpm	Alam et al, 2019
Maça	Agitação mecânica a 50 rpm	Pieters et al, 2020
Morango	Agitador magnético a 100 rpm	Gamboa-Santos, e Campañone, 2018.
Manga	Banho termostaticado com agitação a 30%	Martinez et al, 2019
Limão	Banho de água com agitador rotativo, agitação a 40 °C	Kumari et al, 2020
Goji Berry	Agitação usando copos termostaticados em banhos de água com variações de temperaturas de 45, 55 e 65°C por até 180 minutos.	Dermesonlouoglou e Taoukis, 2018
Abacaxi	Banho termostático com agitação a 60 rpm, por 1, 2, 3, 6 e 24 h.	Fernández et al 2019

3.3.6 Geometria do material

A transferência de massa também é influenciada pela geometria do alimento a ser desidratado. Adicionalmente, a taxa de encolhimento é dependente da geometria da fruta a ser desidratada. A geometria da amostra afeta o comportamento da concentração osmótica devido à variação da área de superfície por unidade de volume (ou massa) e comprimento de difusão da água e solutos envolvidos no transporte de massa (RAMYA e JAIN, 2016).

Agnelli et al. (2005) verificaram que o ganho de sólidos e perda de água, na desidratação osmótica de cubos de maçã sofreram influência do tamanho da aresta do cubo. Ao aumentar a aresta de 1,5 para 2,0 cm, o ganho de sólidos e a perda de água diminuíram de 2% e 5%, respectivamente.

Chavarro–Castrillón et al. (2006), ao desidratar osmoticamente mamão, constataram que a maior redução de massa e perda de água ocorreram para amostras cortadas em forma de cilindro, seguidas de anéis e, por último, aquelas em lâminas. Já o ganho de sólidos foi maior quando a área superficial exposta à solução desidratante foi menor (cilindro < anel < lâmina).

Falade e Adalakun (2007) observaram que a perda de água e o ganho de sólidos aumentaram com a diminuição da espessura das amostras de melancia desidratadas em solução de sacarose a 40°C e 50°Brix. Este fato pode ser explicado pelo aumento da área superficial em contato com a solução osmótica. Maiores valores de perda de água e ganho de sólidos foram obtidos para barras com 10 mm de espessura comparadas com aquelas com 20 e 30 mm.

O tamanho das amostras de frutas apresenta uma influência negativa na perda de umidade durante a desidratação osmótica. O coeficiente de distribuição da umidade diminuiu com o aumento da área superficial, mas mostrou uma tendência crescente com o aumento da espessura (AHMED et al, 2016; PANAGIOTOU et al, 1998).

Em síntese, aumentar a área superficial implica em maiores taxas de desidratação osmótica, sendo que, na maioria dos estudos, são usadas amostras com uma dimensão característica menor ou igual a 10 mm na forma de um retângulo, laje, cubo ou cilindro (PAPAZOGLU e KATSANIDIS, 2019).

Conforme destacado por Castro et al. (2018), durante a conceitualização da modelagem, é essencial definir a geometria e a dimensão do sistema, o que implica a direção da transferência de massa na geometria definida. Os autores ainda chamam atenção que algumas pesquisas escolhem geometrias conhecidas, os mesmos ainda reforçam que a geometria escolhida preferencialmente é a retangular e em alguns casos a cilíndrica (CASTRO et al, 2018).

A partir de uma abordagem fenomenológica, os fenômenos de transferência de massa durante a DO costumam ser modelados pela segunda lei de difusão de Fick. Esse tipo de modelo tem sido usado por vários autores (AZOUBEL et al, 2004; NICOLIN et al, 2015; RAMYA e JAIN, 2016; PAPAZOGLU e KATSANIDIS (2019). SILVA et al (2020) relataram que na maioria dos casos considera-se sólidos rígidos e geometrias simples (retângulos, cilindros ou esferas) para simplificar a descrição da forma real do produto e das equações do modelo associadas.

3.3.7 Duração do processo

O tempo de duração, a saber, o tempo de contato entre fruto a ser desidratado e solução osmótica, é outro fator determinante a ser considerado na ótica da transferência de massa (EGEA e LOBATO, 2014). Segundo Sulistyawati et al. (2020) a perda de água, redução de massa e ganho de solubilidade do sólido aumentaram com o tempo de desidratação osmótica. Além disso, minimizar o tempo de secagem é primordial para reduzir perdas de nutrientes (GUINÉ, 2018, SULISTYAWATI et al, 2020).

É importante destacar que, perda no teor de água e ganho no teor de sólidos solúveis é uma função do tempo. Em geral, à medida que o tempo de tratamento aumenta, a perda de massa aumenta, mas a taxa em que isso ocorre diminui. A máxima perda de água (redução de 50%) ocorre dentro das primeiras duas a três horas, dependendo do tipo de frutos (CHANDRA & KUMARI, 2014).

3.3.8 Parâmetros cinéticos do processo

Inyang et al. (2018) pontuam que confiar apenas nas práticas experimentais de secagem sem considerações matemáticas para a cinética da secagem, pode afetar significativamente a eficiência do processo, aumentar o custo de produção e reduzir a qualidade do produto seco. Os autores (Inyang et al, 2018) destacam ainda que a modelagem dos parâmetros cinéticos é muito útil em processos alimentares. Os processos envolvidos são principalmente reações (bio) químicas e físicas. Essas mudanças prosseguem a um certo ritmo e com certa cinética. A modelagem cinética permite descrever essas mudanças e suas taxas quantitativamente. Na modelagem cinética, tem-se uma ferramenta poderosa que pode ajudar a desvendar mecanismos básicos de reação. O entendimento dos mecanismos básicos é vital para a modelagem e o controle da qualidade.

A avaliação da cinética da desidratação osmótica envolve, basicamente, a determinação de variáveis como a perda de massa (PM), a perda de água (PA) e o ganho de sólidos (GS) pelo produto durante o período de imersão na solução osmótica. A perda da massa (PM) corresponde ao percentual de

diminuição de massa da amostra em relação à sua massa inicial; a perda de água (PA) refere-se à quantidade de água (g ou mL) que sai da amostra para cada $100 g$ de sua massa total inicial; o ganho de sólidos (GS) é designado pela massa de sólidos solúveis e insolúveis transportada para o interior do produto em relação à massa inicial da amostra. Os valores de PM , PA e GS são determinados, respectivamente, pelas Equações (3.1), (3.2) e (3.3) (Silveira et al., 1996; LIMA et al, 2004; PESSOA et al, 2016; ASSIS et al, 2018).

$$PM(\%) = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \cdot 100 \quad (3.1)$$

$$PA(\%) = \frac{m_0 X_0 - m_t X_t}{m_0} \cdot 100 \quad (3.2)$$

$$GS(\%) = \frac{m_t X_{st} - m_0 X_{s0}}{m_0} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Em que:

m_0 = massa inicial do produto, g ;

m_t = massa do produto no tempo t , g ;

X_0 = fração de água na amostra no tempo inicial, adimensional;

X_t = fração de água na amostra no tempo t , adimensional;

X_{s0} = fração de sólidos totais da amostra no tempo inicial t_0 , adimensional;

X_{st} = fração de sólidos totais da amostra no tempo t , adimensional.

3.4 ENCOLHIMENTO

Os mais variados tipos de frutas são classificados como alimentos sólidos e semi-sólidos altamente heterogêneos que podem ser considerados como consistindo em uma rede ou matriz sólida tridimensional contendo geralmente grandes quantidades de uma fase líquida, na maioria dos casos uma solução aquosa (MAYOR e SERENO, 2004). A estrutura específica das frutas e as características mecânicas de seus elementos em equilíbrio definem o volume da amostra e determinam seu tamanho e forma. Quando a água é removida da

fruta, um desequilíbrio de pressão é produzido entre o interior da fruta e a pressão externa, gerando tensões de contração que levam ao encolhimento ou colapso da fruta, alterações de forma e, ocasionalmente, rachaduras no produto.

Uma das alterações físicas mais importantes que o alimento sofre durante a secagem é a redução de volume. A perda de água e o aquecimento geram stress na estrutura celular do alimento, provocando modificações no formato e, por conseguinte, diminuição nas suas dimensões.

Rachaduras na superfície é um outro fenômeno que pode acontecer durante a secagem. Isto ocorre quando o encolhimento se dá de forma não uniforme ao longo do processo, o que leva a formação de tensões não equilibradas e, conseqüentemente, gera rachaduras no material. Este comportamento foi relatado por vários autores (AKIYAMA & HAYAKAWA, 2000; GOGUS & LAMB, 1998; MENSAH et al., 1984).

Essas deformações apresentam conseqüências negativa na qualidade do produto desidratado. Mudanças na forma, perda de volume ou aumento da dureza causam, na maioria dos casos, uma impressão negativa ao consumidor. Dessa forma, buscar métodos que diminuam o encolhimento durante o processo de remoção de água é de suma importância para garantir a qualidade do produto final. Contudo, também há produtos secos que tradicionalmente apresentam um aspecto encolhido como os produtos em forma de passas (ARAÚJO, 2005).

A magnitude de encolhimento está inter-relacionada ao volume de água removido (1), mobilidade da matriz sólida (2), taxa de secagem (3) e as condições de processamento (4). A influência de tais fatores no percentual de encolhimento está resumida na Tabela 5.

Como exposto e exemplificado anteriormente, vários trabalhos encontrados na literatura estão relacionados à desidratação osmótica de frutas. No entanto, somente alguns incluem o encolhimento nas descrições do processo, apesar da transferência de massa e o encolhimento do tecido ocorrem simultaneamente durante o processo de desidratação osmótica (RAMYA e JAIN, 2016). O encolhimento que ocorre durante o processo de DO modifica a estrutura interna das frutas, afetando a difusividade efetiva.

Cabe destacar que assumir a variação da difusividade efetiva sem considerar o encolhimento pode resultar em um erro maior do que o de

considerar a difusividade efetiva constante (SILVA JÚNIOR et al, 2016). Além disso, diferentes modelos matemáticos para prever o encolhimento durante a DO de frutas e legumes têm sido relatados (ZECCHI e GERLA, 2020; AIRES et al, 2017; AIRES et al, 2016; SILVA et al, 2016).

Tabela 5 - Inter-relação entre magnitude de encolhimento e os fatores: volume de água removido, mobilidade da matriz sólida, taxa de secagem e condições de processamento

Fator	Magnitude encolhimento
(1)	Em geral, o encolhimento das frutas é ampliado com o volume de água removido, pois quanto mais a água é removida, mais tensões de contração são originadas no material. Em alguns casos, o equilíbrio mecânico é alcançado quando o encolhimento da fruta é igual ao volume de água removida.
(2)	A mobilidade da matriz sólida está intimamente correlacionada ao seu estado físico. Sendo que, alta mobilidade corresponde a um comportamento viscoelástico típico de um estado emborrachado, enquanto baixa mobilidade corresponde a um comportamento elástico típico de um estado vítreo adaptado. Secagem sob vácuo, como na liofilização, leva, em geral, a muito menos encolhimento. O encolhimento é mais intenso quando a liofilização ocorre em temperaturas mais altas.
(3)	A umidade da fruta é determinante para a seleção de altas ou baixas taxas de secagem. Rachaduras, endurecimento, quebra total da estrutura, deterioração acentuada da cor, importante depleção fitoquímica, redução significativa da atividade antioxidante e taxas consideráveis de encolhimento são os principais danos que ocorrem durante altas temperaturas.
(4)	Relação entre mudança de volume e temperatura, velocidade do ar e/ou umidade relativa do ar. Aumentar a velocidade do ar produz menos encolhimento. O aumento na influência da umidade aumenta o encolhimento. Combinar tais condições pode ainda facilitar o processo de secagem o que é determinante para o tipo e extensão de encolhimento. Tem-se, por exemplo, encolhimento severo durante a secagem com ar quente até 80% para frutas e kiwi.

Fonte: adaptado MAYOR e SEVERO (2004); KARAM et al (2016).

Há ainda diferenças significativas quanto às taxas de encolhimento quando se emprega pré-tratamentos osmóticos. Shekar e Javadi (2019) salientam que a secagem por convecção pode causar encolhimento severo especialmente em altas temperaturas. O encolhimento depende da temperatura e do tempo de secagem, sendo que maiores taxas de encolhimento são observadas quando a temperatura e o tempo de secagem são aumentados. Estes autores indicam que a aplicação da desidratação osmótica assistida por ultrassom leva a uma diminuição no encolhimento (SHEKAR e JAVADI, 2019). Dehghannya et al. (2015) também relataram que a aplicação de desidratação osmótica assistida por ultrassom levou a uma diminuição significativa no encolhimento (de 76,41 para 64,05%).

3.5 MODELAGEM MATEMÁTICA

O objetivo principal da modelagem matemática é descrever os mais diversos fenômenos (físicos, químicos, biológicos, econômicos, entre outros) empregando relações matemáticas. Um modelo matemático pode ser descrito como uma representação de um sistema real, ou seja, um modelo deve simular um sistema e a forma como ocorrem as modificações no mesmo. Para modelar um processo é necessário descrever matematicamente um fenômeno real, compreendê-lo e estudá-lo criando hipóteses e reflexões sobre tal fenômeno (BALKE, 2016; ALVES e SILVA, 2019).

Um modelo matemático consiste em um conjunto de equações que representam de uma forma quantitativa, as hipóteses que foram utilizadas para construí-lo, as quais se apoiam sobre o sistema real. Essas equações são resolvidas em função de alguns valores conhecidos ou previstos pelo modelo real e podem ser testadas por meio da comparação com os dados conhecidos ou previstos com as medidas realizadas no mundo real (SODRÉ, 2007).

A modelagem matemática permite prognosticar e simular o comportamento de alguns parâmetros e processos utilizando modelos empíricos e fenomenológicos. Os modelos empíricos, apesar de normalmente não apresentarem embasamento teórico, são, em geral, mais simples e de fácil aplicação, uma vez que estão baseados na análise de dados experimentais, na análise dimensional e na análise estatística. Em contrapartida, os modelos fenomenológicos fundamentados em teorias e leis são mais complexos e envolvem parâmetros que conjecturam com boa justaposição ao sentido físico do sistema, podendo esses parâmetros também serem obtidos com a finalidade de representar o sistema real (ALVES e SILVA, 2019).

Por exemplo, a experimentação é onerosa e demanda tempo de execução, o que nem sempre é viável para a indústria alimentícia, sobretudo quando se considera alimentos tão perecíveis quanto as frutas. Deste modo, a modelagem permite estimar parâmetros e respostas necessárias para a redução de variáveis experimentais acelerando esse processo. Além disso, modelos matemáticos que também avaliem aspectos estatísticos são, *a priori*, essenciais para reduzir o número de experimentos a serem executados, com consequente diminuição do

uso de reagentes e da carga de trabalho em laboratório (ALVES e SILVA, 2019). No entanto, determinar o tipo de modelo a ser usado dependerá da situação a ser analisada, das variáveis selecionadas e dos recursos disponíveis (LIMA et al, 2004).

3.5.1 Modelagem da desidratação osmótica

A modelagem matemática da cinética de desidratação osmótica é importante para a descrição e otimização de processos, relacionando as variáveis de resposta (conteúdo de água e conteúdo de sólidos) com as variáveis do processo (tempo, temperatura, concentração da solução, soluto utilizado e agitação) (SILVA et al., 2003).

A desidratação osmótica, como mencionado, é um processo complexo e dependente de vários fatores e, em particular, da heterogeneidade do material biológico processado. O desenvolvimento de modelagens matemáticas que descrevem esse processo tem sido objetivo de estudo de muitos pesquisadores por décadas. Diversas abordagens foram propostas para explicar o mecanismo de transporte de massa dentro do produto durante a desidratação osmótica. Mercali et al. (2011) ressalta três abordagens que explicam o transporte de massa:

- Modelos desenvolvidos em função da estrutura do tecido celular e o transporte de água é modelado com base na termodinâmica de processos reversíveis.
- Modelos baseados em expressões macroscópicas da taxa de transferência.
- Modelos difusivos, baseado na Segunda Lei de Fick.

Atualmente, há várias propostas de modelos empíricos e semi-empíricos que correlacionam variáveis de processamento com perda de água ou ganho de sólido. Eles não levam em consideração os fenômenos subjacentes e incluem regressões multivariáveis, análise de superfície de resposta, modelos derivados de balanços de massa. Apesar de modelos mecanicistas permitirem uma descrição do mecanismo de transferência de massa, a abordagem de difusão tem várias suposições difíceis de acontecer e a difusividade efetiva se torna um

parâmetro cinético ajustável que depende fortemente das condições experimentais e das propriedades físicas da fruta (MERCALI, 2009).

Além disso, uma abordagem da fisiologia celular depende do conhecimento de muitas propriedades biofísicas, como permeabilidade da membrana e propriedades do material da parede celular, por exemplo, módulo de elasticidade, fração de espaço vazio e tortuosidade, que nem sempre estão disponíveis. Por outro lado, mesmo que os modelos empíricos e semi-empíricos propostos na literatura forneçam um ajuste razoável aos dados experimentais, seu uso é limitado porque são capazes apenas de representar dados em condições semelhantes àsquelas em que esses modelos foram desenvolvidos e não podem levar em consideração a complexidade do processo (ÍSPIR & TOGRUL, 2009).

A maioria dos modelos existentes para o estudo da cinética de desidratação osmótica foi desenvolvido a partir de dados experimentais e da Segunda Lei de Fick, que se baseia na equação de difusão, em que o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração entre o sólido e a solução, de acordo com a equação (3.4).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

C = concentração da espécie

D = coeficiente de difusão da espécie de concentração C

t = tempo

3.5.2 Ferramentas para solução da equação de difusão

Existem dois tipos de ferramentas para resolver uma equação diferencial: as soluções analíticas e as soluções numéricas. As soluções analíticas fornecem o valor exato da variável de interesse em qualquer ponto e em qualquer tempo. Contudo, em casos mais complexos, como ao se considerar a variação dos parâmetros físicos ou das dimensões do material, ainda não há soluções analíticas. Nessa situação, são empregadas soluções numéricas, que viabilizam

um tratamento mais complexo da situação analisada. Independentemente da opção escolhida, as soluções dependem da geometria do domínio e das condições iniciais e de contorno (AIRES, 2016).

A riqueza e a vantagem de se ter mais de uma vertente matemática elucidando um mesmo fenômeno é que, na pluralidade das vezes, tais vertentes impetram prenciar os mesmos resultados fundamentais e, por vezes, chegar a acuradas peculiaridades. Essa diversidade acende novos caminhos para que ideias possam ser desdobradas para outros tipos de fenômenos e, em algumas situações, para outras áreas de pesquisa (VIEIRA, 2015).

3.5.2.1 Condições de contorno

As condições de contorno, que existem na forma de equações matemáticas, exercem um conjunto de restrições adicionais ao problema em limites especificados. O conceito de condições de contorno se aplica a equações diferenciais ordinárias e parciais (MIYAOKA et al, 2017). 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, por exemplo, tipo de produto e as condições experimentais (AIRES, 2016).

Pinto e Lage (2001) destacam que há três tipos de condições de contorno lineares. A condição de contorno é de primeiro tipo quando o valor da variável dependente é dado no contorno, sendo facilmente utilizada nas equações discretizadas. A condição de contorno de primeiro tipo também é conhecida como condição de Dirichlet ou condição prescrita. Esta condição é caracterizada quando o valor de equilíbrio da grandeza de interesse é instantaneamente assumido no contorno do domínio.

Por sua vez, quando a condição de contorno é de segundo tipo, o valor da derivada da variável dependente é dado no contorno. Tal condição de contorno tem que ser discretizada para ser combinada com o sistema algébrico discretizado (PINTO e LAGE, 2001). Outras denominações para o segundo tipo são: condição de fluxo prescrito ou condição de Newmann. A segunda condição

de contorno é aplicada quando se conhece o fluxo da grandeza de interesse no contorno do sistema (AIRES, 2016).

A terceira condição de contorno é empregada quando a grandeza de interesse na superfície não entra em equilíbrio com o meio em que está inserida de forma instantânea. Em outros termos, há certa resistência, e o equilíbrio leva algum tempo para ser alcançado (AIRES, 2016). A estrutura geral da terceira condição de contorno ou condição de contorno convectiva ou Cauchy é representada na equação (3.5), onde a , b e c são constantes conhecidas e x_c é o valor de x no contorno (PINTO e LAGE, 2001). O seu tratamento é similar ao dado às condições de contorno de segundo tipo:

$$x = x_c, \quad a\dot{y} + by = c \quad (3.5)$$

3.5.2.2 Ferramentas analíticas

As equações que delinham os processos de transferência de calor e massa demandam considerável conhecimento de cálculo numérico, para sua solução analítica. A resolução da equação de difusão pode ser determinada analiticamente pelo método de separação de variáveis. Essa solução matemática é utilizada quando frutas, vegetais ou legumes são dispostos na forma de geometrias simples, tais como, placa infinita, paralelepípedos, cilindros e esferas. Para tanto, as condições de contorno devem ser simplificadas, supondo-se, portanto, que volume e difusividade sejam constantes. Além disso, a distribuição de umidade inicial deverá ser uniforme, para isso admite-se que o meio seja homogêneo e isotrópico. O maior benefício deste método é que, por se tratar de um domínio contínuo, a variável de interesse é conhecida em qualquer ponto deste domínio e em qualquer instante de tempo (CRANK, 1992; NI, 2011).

Dentre os trabalhos que adotam modelos difusivos no estudo da desidratação osmótica, vários pesquisadores usam a solução analítica da equação de difusão reduzindo-a ao primeiro termo da série que a representa (RASTOGI e RAGHAVARAO, 2004; FALADE et al., 2007; URIBE et al., 2011; RODRÍGUEZ et al., 2013). Contudo, essa escolha pode acarretar erros de

truncamentos significativos, sobretudo nos primeiros instantes de tempo. Por outro lado, mesmo utilizando um número maior de termos da série, alguns trabalhos adotam a condição de contorno do primeiro tipo, impondo o teor de água de equilíbrio na superfície do produto durante todo o processo (AIRES, 2015). Embora esta imposição seja adequada, principalmente na presença de agitação do meio osmótico, na maioria das aplicações físicas existe alguma resistência na superfície do produto (SILVA et al., 2014). Desta forma, algumas pesquisas adotam a condição de contorno do terceiro tipo, impondo a igualdade entre os fluxos difusivo e convectivo na superfície do produto (SILVA et al., 2014).

Definir as condições de contorno implica em considerar, primeiramente, as seguintes possibilidades: a difusão líquida é o único mecanismo de transporte de água no interior do sólido; a distribuição inicial de umidade deve ser uniforme; as dimensões do sólido e a difusividade de água são invariáveis durante a difusão de água; no decorrer da difusão de água o coeficiente convectivo de transferência de massa é constante; o sólido é considerado homogêneo e isotrópico (CRANK, 1992; NI, 2011). Cabe destacar um impasse ao considerar tais possibilidades: os sólidos devem ter forma geométrica simples, como corpos semi-infinitos, placas planas, cilindros e esferas.

Outro aspecto importante em relação ao uso de soluções analíticas da equação de difusão, relaciona-se à geometria utilizada. Nesse contexto, muitos trabalhos restringem-se à difusão unidimensional, com a geometria de uma placa ou de um cilindro infinito. Modelos bidimensionais, na forma de cilindro finito, também são encontrados (DEROSSI et al., 2008, PORCIUNCULA et al., 2013). Por fim, algumas pesquisas fazem uso da geometria tridimensional (RASTOGI et al., 2004; SILVA et al., 2012, SILVA et al., 2014).

De acordo com Porciuncula et al. (2013), a utilização da Segunda Lei de Fick é uma aproximação macroscópica do processo de transferência de massa durante a desidratação osmótica que ajuda a compreender a cinética de forma simplificada. Os autores ainda afirmaram que as soluções analíticas para as equações diferenciais provenientes de tais modelos microscópicos precisam de valores de equilíbrio, que são utilizados para normalizar os dados e torná-los adimensionais.

Andrade et al. (2007) avaliaram o coeficiente de transferência de massa de água e sacarose no intervalo de tempo de 0 a 60h, e concluíram que o tempo de imersão não exerce influência significativa nesses coeficientes. Chenlo et al. (2007) utilizaram um modelo de três parâmetros para estimar os valores de equilíbrio necessários utilizando dados experimentais. Eles também afirmaram que esse modelo se ajustou satisfatoriamente aos dados experimentais e possibilitou estimar os parâmetros cinéticos para qualquer concentração de soluto osmótico, operando nas temperaturas e nos tempos de tratamento.

Dessa forma, a partir dos valores de equilíbrio estimados, é possível calcular o coeficiente de transferência de massa através na solução analítica da Segunda Lei de Fick (CASTRO, 2015).

3.5.2.3 Solução analítica para geometria de uma placa plana infinita

Um paralelepípedo pode ser considerado como uma parede infinita se o comprimento e a largura são consideravelmente maiores do que a espessura (LUIKOV, 1968). Neste caso, considera-se apenas o fluxo na direção de x , da espessura.

Portanto, admitindo-se a forma geométrica de uma placa plana infinita de espessura $2L$ (Figura 6), em que a transferência de umidade durante a secagem é predominantemente unidirecional e considerando a difusividade efetiva constante (CRANK, 1992), a equação (3.4) se reduz a:

$$\frac{\partial X(x, t)}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X(x, t)}{\partial x^2} \quad \text{Na região } 0 < x < L \text{ e } t > 0 \quad (3.6)$$

onde

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

X = teor de umidade no tempo e no espaço (kg de H_2O/kg de sólido seco)

x = coordenada de posição

t = tempo (s)

L = dimensão característica (meia espessura do material, m)

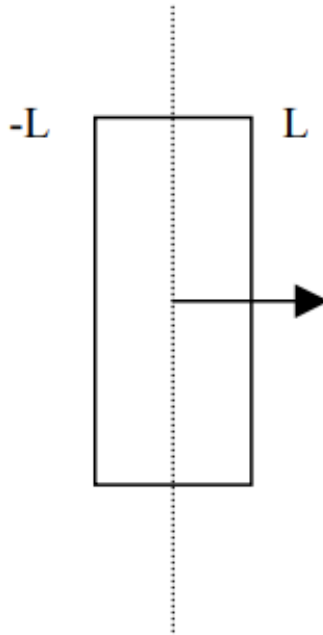


Figura 6 - Placa infinita indicando sistema de coordenadas

Um sistema é considerado infinito se uma das dimensões que delineiam o sólido é muito maior que as outras dimensões. Deste modo, se o comprimento e a largura são bem maiores do que a sua espessura, tem-se que a placa plana pode ser considerada infinita. Na Tabela 6, estão listados trabalhos cuja geometria adotada para a realização da modelagem foi de placa plana infinita.

Tabela 6 - Desidratação osmótica e geometria de placa plana infinita

Autor	Fruta	Considerações
Araújo et al (2005)	Nectarina	Os dados experimentais foram ajustados inicialmente para o modelo difusional de Fick, considerando geometria de placa plana infinita, para o cálculo da difusividade efetiva da água (Def). Os dados também foram ajustados utilizando-se o modelo de Page.
Duarte et al (2012)	Jacas	A geometria selecionada para a realização dos cortes foi de placa plana (28,80 mm x 28,70 mm) cuja espessura média foi de 5,80 mm. As frutas fatiadas foram dispostas em soluções de sacarose nas concentrações de 40 e 50 °Brix, respectivamente, para incorporação de açúcar.
Antônio et al (2004)	Mamão	O efeito da temperatura (30, 40 e 60°C), concentração de sacarose (45, 55 e 65° Brix), concentração de ácido láctico (0; 0,05 e 0,1 M) e geometria (placa cúbica e plana) na perda de água, perda de peso e ganho de sólido durante o processo de desidratação osmótica do mamão foram avaliados. O ganho de sólidos é favorecido pela geometria de placa plana.
Brochier et al (2019)	Kiwi	A Segunda Lei de Fick foi empregada para determinação da difusividade da massa de água. Os cálculos foram feitos considerando uma placa plana infinita com espessura de 2L.

3.5.2.4 Métodos numéricos para solução de problemas difusivos

Como expresso anteriormente, uma modelagem matemática mais adequada aos fenômenos físicos presentes no processo difusivo precisa de considerações tais como: difusividade variável e encolhimento. Nestes casos, é necessária uma solução numérica. Por exemplo, um modelo que considera o encolhimento e a difusividade efetiva variável da umidade descreve bem a desidratação osmótica para condições experimentais previamente selecionadas e permite também prever as distribuições de umidade e sacarose a qualquer momento estipulado (SILVA et al, 2014). Silva et al. (2014) salientam que até o momento em que desenvolveram seu trabalho não existia nenhum artigo que levasse em consideração tanto o encolhimento quanto a difusividade variável da massa na descrição da transferência de massa na goiaba, sendo o seu trabalho o pioneiro. Nesse trabalho, foi desenvolvida uma solução numérica unidimensional da equação de difusão com condição de contorno do primeiro tipo, obtida pelo método dos volumes finitos (SILVA et al, 2014).

Para conseguir uma solução numérica, o domínio contínuo é substituído por um domínio discreto e a equação diferencial parcial é transformada em equações algébricas (SILVA, 2015).

Para se obter as equações algébricas as derivadas existentes na equação diferencial precisam ser substituídas por valores discretos da função incógnita (MALISKA, 2013). A forma usada para integrar a equação diferencial em questão é o que especifica o método numérico usado. Dentre os diversos métodos existentes, destacam-se:

- Método dos Elementos Finitos (MEF);
- Método das Diferenças Finitas (MDF);
- Método dos Volumes Finitos (MVF).

3.5.3 Estimativa dos parâmetros para os modelos difusivos

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.

Mercali (2009) pontua que é difícil e complexo predizer com exatidão os valores para a concentração de equilíbrio e a difusividade efetiva em sistemas alimentícios. Apesar dessa dificuldade, é possível determinar a concentração de equilíbrio, através da extrapolação do gráfico da taxa de desidratação osmótica em função da umidade, sendo a concentração de equilíbrio alcançada quando a taxa de desidratação equivale a zero (CÓRDOVA et al., 2006). Além disso, soluções analíticas da equação de difusão acopladas a otimizadores para a determinação dos parâmetros de processo da desidratação osmótica de frutas e alguns vegetais têm sido empregadas, como ressalta Silva et al. (2014).

Os métodos inversos têm despertado um crescente interesse por parte de alguns pesquisadores na busca pelos melhores parâmetros para o processo (SILVA et al., 2014; SILVA et al., 2010; AIRES et al., 2017). 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.

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.

Por exemplo, Singh et al. (2008) estudaram a cinética de desidratação osmótica de cubos de cenoura sob diversas situações operacionais. O processo foi modelado por meio da solução analítica da equação de difusão numa placa infinita, com condição de contorno do primeiro tipo. Para determinar a difusividade efetiva de massa no processo, foi elaborado um programa

computacional, na linguagem C++, usando uma técnica iterativa, na qual, inicialmente, calcula-se a difusividade, D , usando apenas o primeiro termo da série que representa a solução analítica da equação de difusão mencionada. Em seguida, incrementa-se o valor de D e, com esse novo valor, calcula-se o teor de água usando 6 termos da série representativa da solução, para um instante de tempo especificado. Caso o valor absoluto da diferença entre os valores do teor de água, calculado e experimental, nesse instante de tempo, seja maior do que uma tolerância especificada, a difusividade é mais uma vez atualizada e o procedimento anterior é repetido até que a tolerância estipulada seja atingida. Com esse algoritmo, determinam-se os valores para difusividade em vários instantes e, posteriormente, calcula-se a difusividade média. Segundo os autores, esse valor foi condizente com os encontrados na literatura.

3.6 MÉTODO DAS DIFERENÇA FINITAS

O método das diferenças finitas (MDF) é o mais antigo dentre as técnicas de discretização para equações diferenciais parciais. Muitos esquemas numéricos modernos para fenômenos de transporte traçam suas origens para aproximações de diferenças finitas desenvolvidas no final da década de 1950 até o início da década de 1980. A derivação e implementação do MDF são particularmente simples em malhas estruturadas que são topologicamente equivalentes a uma grade cartesiana uniforme (GÓMEZ, 2013).

O método das diferenças finitas pode ser usado para resolver problemas de valor de contorno ou valor inicial, envolvendo equações diferenciais ordinárias ou parciais. Assim, este método pode ser usado para solucionar as equações de modelos a parâmetros concentrados ou distribuídos (PINTO e LAGE, 2001).

O MDF é um método de discretização de equações diferenciais. Isto significa que ele transforma uma função contínua em uma representação discreta (pontos). O objetivo desse método é transformar um problema composto por equações diferenciais em um problema formado por equações algébricas. A partir das expressões obtidas para aproximar a derivada em um ponto através de expressões algébricas, pode-se transformar um problema de valor de contorno em um conjunto de equações algébricas, sendo que para cada ponto

do domínio discreto será atribuída uma equação. Esta é uma característica importante dos métodos de diferenças finitas: para que a resolução seja possível, deve-se atribuir uma equação para cada ponto do domínio discreto (PINTO e LAGE, 2001).

A primeira etapa da aplicação do método consiste exatamente em definir a região em que se deseja obter a solução, ou seja, a discretização do domínio da variável independente. A discretização consiste em dividir o domínio de cálculo em um certo número de subdomínios. Para um domínio finito, o número de subdomínios também é finito, quando o domínio é infinito, haverá infinitos subdomínios. Em ambos, estipula-se os pontos que delimitam os subdomínios, no caso de um domínio finito, o número de pontos será igual ao número de subdomínios mais um (PINTO e LAGE, 2001).

O segundo passo é gerar aproximações para as derivadas das variáveis dependentes que aparecem nas equações diferenciais, nos pontos discretos. A estratégia do MDF consiste em buscar equações algébricas que aproximem a solução em cada ponto i . Para isso, as derivadas são aproximadas como relações algébricas envolvendo a solução em diferentes valores de i . Esta aproximação pode ser realizada de diferentes formas, dependendo da precisão desejada e da natureza do problema e das condições de contorno. Porém, a origem destas aproximações sempre é uma aproximação em série de Taylor em torno de cada ponto i .

O MDF consiste em substituir o domínio contínuo do problema por uma malha de diferenças finitas (TANNEHILL et al., 1997). Para uma melhor compreensão, suponha-se que a função incógnita da equação diferencial parcial em questão seja $f(x)$. Por definição, a derivada da função $f(x)$, em relação a x , num ponto x_0 é dada por:

$$\frac{df}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (3.7)$$

Para Δx finito, mas suficientemente pequeno, pode-se fazer a seguinte aproximação:

$$\frac{df}{dx} \approx \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (3.8)$$

Considerando:

$$f_{i+1} = f(x_0 + \Delta x) \quad (3.9)$$

$$f_{i-1} = f(x_0 - \Delta x) \quad (3.10)$$

Deste modo, através da Série de Taylor, obtém-se aproximações tais como

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_i \approx \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.11)$$

$$\left. \frac{d^2f}{dx^2} \right|_i \approx \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{(\Delta x)^2} \quad (3.12)$$

Maliska et al. (2004) chamam atenção para o uso de MDF na mecânica dos fluídos. O MDF também tem sido usado em diversos trabalhos de secagem e desidratação osmótica (AIRES, 2015; SILVA 2010; SILVA, 2015). Porciuncula et al. (2013) empregaram MDF na desidratação osmótica de banana, buscando comparar as difusividades de massa obtidas pelo método numérico e através da solução analítica bidimensional, com configuração cilíndrica. Para tanto, simulações com três tipos distintos de coeficiente de difusão de massa foram conduzidas: constante, linearmente dependente do teor de umidade e dependente do teor de umidade segundo uma função exponencial. O encolhimento do fruto foi desprezado em todas as etapas do processo. Os dados obtidos reforçaram que o comportamento exponencial para o coeficiente de difusão é mais apropriado (PORCIUNCULA et al, 2013).

3.7 LEVANTAMENTO DE DADOS DA LITERATURA

Silva Júnior (2015) estudou a modelagem da cinética da difusão de água, baseada na Segunda Lei de Fick, durante a desidratação osmótica da banana maça em diferentes concentrações de solução binária de água destilada e açúcar cristal comercial e em diferentes temperaturas de processo. O autor também desenvolveu ferramentas numéricas para descrever o processo de desidratação osmótica. Nessa pesquisa foram realizados experimentos de desidratação osmótica de banana em concentrações de 40 e 60°Brix em temperaturas de 40 e 70°C e as bananas foram cortadas em fatias cilíndricas. As condições experimentais para os quatro experimentos realizados no trabalho de Silva Júnior (2015) estão descritas na Tabela 7. Já na Tabela 9 encontram-se as medidas das quantidades de água (c_w^t), do raio (R) e da espessura (L) para cada instante de tempo.

Tabela 7 - Temperatura da desidratação osmótica (T), concentração da solução, teor de umidade inicial (\bar{X}_i), teor de umidade de equilíbrio (\bar{X}_{eq}), raio inicial (R_0), comprimento inicial (L_0).

Tratamento	T (°C)	Concentração (°Brix)	\bar{X}_i (bs)	\bar{X}_{eq} (bs)	$R_0 \times 10^3$ (m)	$L_0 \times 10^3$ (m)
1	40	40	3,3202	1,2226	17,317	10,507
2	40	60	3,1077	0,8370	16,030	10,593
3	70	40	2,9484	0,4208	16,665	10,457
4	70	60	2,9913	0,4101	17,465	10,053

Fonte: adaptado de Silva Júnior (2015).

Para se obter expressões únicas para o raio e a espessura que pudessem ser usadas em todas as condições experimentais, Silva Júnior (2015) converteu os dados das variações dessas dimensões em valores adimensionais usando as seguintes equações:

$$R^* = \frac{R_t}{R_0} \quad (3.13)$$

$$L^* = \frac{L_t}{L_0} \quad (3.14)$$

onde R^* e L^* , são os valores adimensionais do raio e espessura, respectivamente, no tempo t , e R_t e L_t são os valores (em metros) do raio e comprimento, respectivamente, no tempo t , e R_0 e L_0 são os valores (em metros) do raio e comprimento, respectivamente, no tempo $t = 0$. A partir dos dados experimentais, o autor realizou ajustes de curvas a fim de se obter expressões para R^* e L^* em função da quantidade de água e encontrou as seguintes expressões:

$$R^* = 1/(-0,4792 \times 10^{-2} c_w^t + 1,477) \quad (3.15)$$

$$L^* = 0,6595 \cosh(0,9493 \times 10^{-2} c_w^t) \quad (3.16)$$

onde c_w^t representa a quantidade média de água no tempo t . Na Figura 7 e na Figura 8 são apresentados os gráficos dos ajustes obtidos por Silva Júnior (2015) para o raio e a espessura em função da quantidade da água, respectivamente. O indicador estatístico R^2 para cada curva foi 0,8341 e 0,7634, respectivamente.

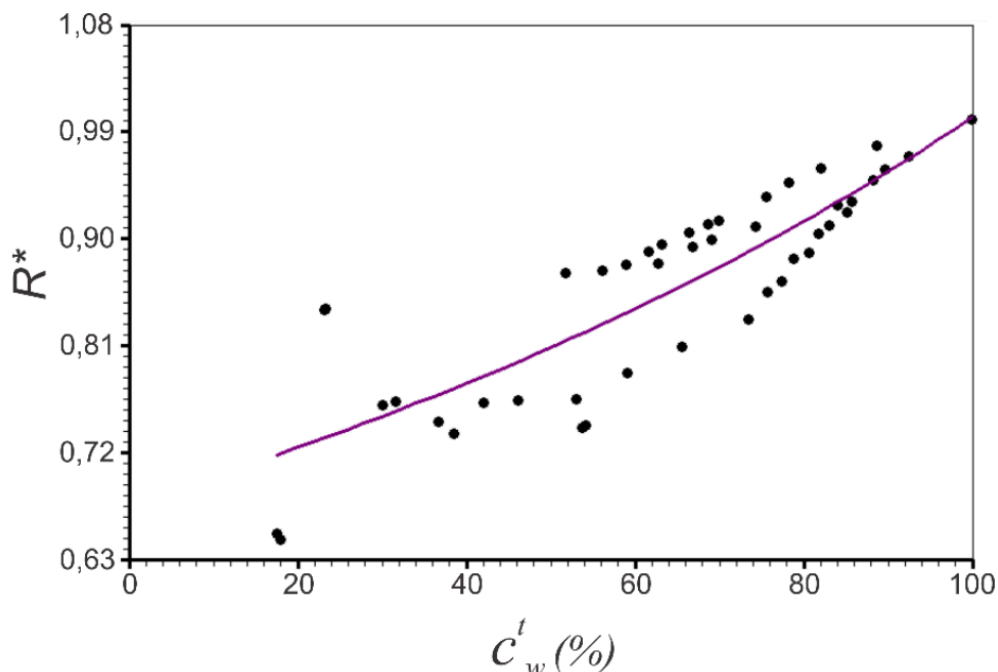


Figura 7 - Gráfico do ajuste para o raio adimensional em função da quantidade de água
 Fonte: adaptado de Silva Júnior (2015).

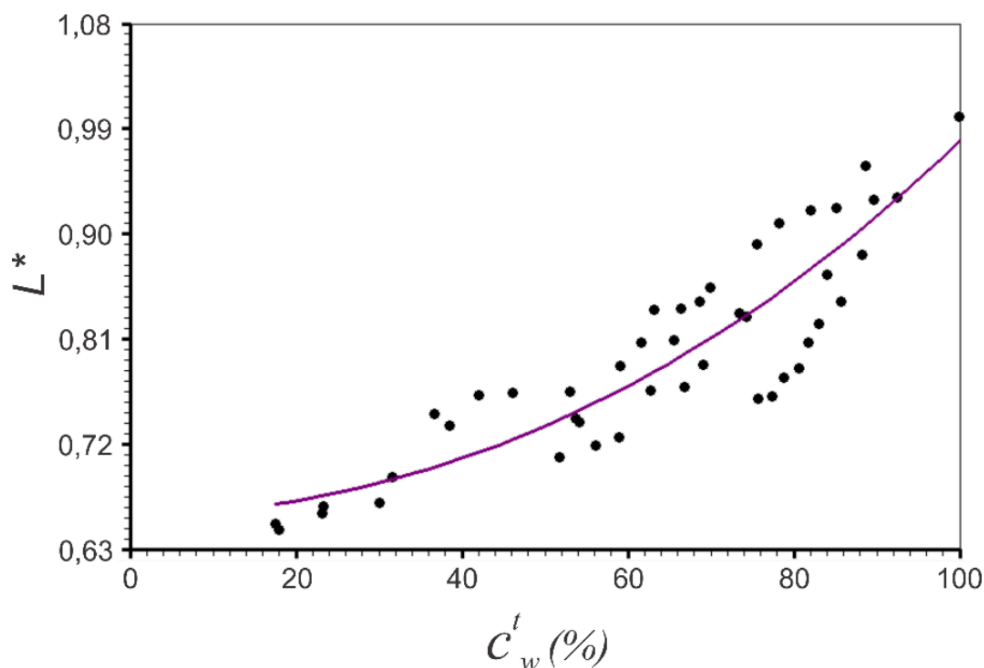


Figura 8 - Gráfico do ajuste para a espessura adimensional em função da quantidade de água
 Fonte: adaptado de Silva Júnior (2015).

Para descrever o processo difusivo na banana, Silva Júnior (2015) discretizou a equação de difusão, considerando um cilindro finito (caso bidimensional), via método dos volumes finitos. Além disso, a fim de obter expressões para descrição das difusividades efetivas de água, o autor desenvolveu um otimizador acoplado às soluções numéricas. Os resultados obtidos pelo autor para as quatro condições experimentais, considerando a melhor expressão para a difusividade de água, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados do trabalho de Silva Júnior (2015) para a otimização da perda de água para as condições experimentais (assumindo difusividade variável e encolhimento)

Experimento	Expressão para D_{ef}	a	b	R^2
1	$a \cdot x + b$	$1,6905 \times 10^{-10}$	$7,4495 \times 10^{-11}$	0,9907
2	$a \cdot x^2 + b$	$2,0554 \times 10^{-12}$	$4,8992 \times 10^{-9}$	0,9945
3	$a \cdot x^2 + b$	$9,5823 \times 10^{-13}$	$1,0553 \times 10^{-8}$	0,9984
4	$a \cdot x^2 + b$	$3,3335 \times 10^{-12}$	$1,4572 \times 10^{-8}$	0,9972

Tabela 9 - Dados experimentais da desidratação osmótica de banana obtidos por Silva Júnior (2015) para cada tratamento.

Experimento	Tempo (min)	c_w^t (%)	$R \times 10^3$ (m)	$L \times 10^3$ (m)
1	0	100	17,317	10,507
1	10	92,49	16,786	9,785
1	30	88,26	16,438	9,265
1	60	85,73	16,133	8,845
1	90	83,03	15,773	8,65
1	120	81,75	15,651	8,473
1	150	80,59	15,376	8,245
1	180	78,85	15,291	8,16
1	210	77,44	14,966	7,99
1	240	75,65	14,806	7,977
1	1440	54,2	12,868	7,763
1	1800	53,7	12,823	7,793
2	0	100	16,030	10,593
2	10	88,66	15,685	10,147
2	30	82,01	15,372	9,750
2	60	78,25	15,183	9,630
2	90	75,53	14,990	9,441
2	120	69,87	14,677	9,047
2	150	68,69	14,617	8,920
2	180	66,38	14,502	8,860
2	210	63,21	14,353	8,840
2	240	61,69	14,252	8,547
2	1440	31,56	12,235	7,327
2	1800	30,01	12,187	7,097
3	0	100	16,665	10,457
3	10	89,59	15,968	9,717
3	30	83,97	15,473	9,050
3	60	74,29	15,175	8,667
3	90	69,08	14,977	8,233
3	120	66,82	14,885	8,037
3	150	62,78	14,648	8,005
3	180	58,89	14,635	7,587
3	210	56,16	14,548	7,520
3	240	51,83	14,508	7,407
3	1440	23,25	14,007	6,975
3	1800	23,16	14,005	6,905
4	0	100	17,465	10,053
4	10	85,13	16,105	9,245
4	30	73,43	14,530	9,218
4	60	65,59	14,127	9,200
4	90	59,13	13,740	8,815
4	120	53,05	13,360	8,877
4	150	46,12	13,337	8,843
4	180	42,11	13,300	8,785
4	210	36,74	13,022	8,965
4	240	38,51	12,842	8,756
4	1440	17,58	11,387	8,820
4	1800	17,90	11,283	8,590

4 METODOLOGIA

No presente trabalho, consideram-se hipóteses que possibilitem descrever melhor a complexidade do problema de transferência de massa, tais como: a variação de volume do material e a variação da difusividade efetiva. Uma vez que as soluções analíticas existentes em geral não contemplam tais hipóteses, soluções numéricas serão necessárias. Nesta seção serão apresentados a solução analítica, o método numérico usado para a discretização da equação de difusão, a formulação adotada, além das discretizações para os casos de malha uniforme e malha variável. As soluções numéricas apresentadas foram desenvolvidas no *Matlab*.

4.1 SOLUÇÃO ANALÍTICA

Para a obtenção da solução analítica, foram assumidas as seguintes hipóteses:

- A fruta possui formato cilíndrico com raio R e espessura $2L$, sendo $R \gg L$, assim a geometria adotada é de placa plana infinita de espessura $2L$;
- O sólido é homogêneo e isotrópico;
- A distribuição da grandeza de interesse no interior do sólido tem simetria bilateral;
- O único mecanismo de transporte de massa dentro do sólido é o mecanismo da difusão;
- A difusividade efetiva de massa permanece constante;
- A transferência do teor de umidade interna durante a secagem é predominantemente unidimensional;
- As resistências externas às transferências de massa são desprezíveis.

Admitindo condições de contorno de primeiro tipo, o teor de umidade será constante na superfície e igual a umidade de equilíbrio: $X(L, t) = X_{eq}$. Além disso, considerando que a taxa de evaporação é nula no centro da placa, o teor

de umidade no centro é dado por: $\frac{\partial X}{\partial x}(0, t) = 0$, em $x = 0$ e $t > 0$. Como condição inicial, temos que a umidade ao longo da placa é igual a umidade inicial: $X(x, 0) = X_0$, na região $0 < L$ e $t = 0$.

A solução analítica fornecida por Cranck (1975) para a Equação (3.6) para uma placa infinita, atendendo às hipóteses mencionadas e as condições de contorno e inicial apresentadas, é dada por:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = -\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right]} \quad (4.1)$$

Adimensionalização:

$$\bar{U} = -\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n_{max}} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 \tau}{4}\right]} \quad (4.2)$$

Sendo:

$$\bar{U} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \text{teor de umidade médio adimensional}$$

$$\tau = \frac{D_{ef}}{L^2} \cdot t, \text{ tempo adimensional}$$

n_{max} = número de termos da série que será usado pelo programa para calcular \bar{U}

4.2 SOLUÇÃO NUMÉRICA

4.2.1 Diferenças Finitas com malha uniforme para placa plana

Para se resolver a equação de difusão unidimensional, em coordenadas cartesianas, usando o método das diferenças finitas, é necessário discretizar seu domínio de validade. Dessa forma, o processo de discretização da equação da difusão (3.6) em um intervalo $0 \leq x \leq L$, será considerado um domínio discreto como o apresentado na Figura 14, onde o domínio físico contínuo (região entre 0 e L) é dividido em $N + 1$ pontos.

Para a obtenção da solução numérica usando malha uniforme, foram feitas as mesmas considerações da solução analítica. Devido à hipótese da simetria ($x = 0$, centro da fruta), como foi ilustrado na Figura 6, foi considerada apenas metade da placa, na qual foi criada uma malha uniforme unidimensional como mostra a Figura 9.

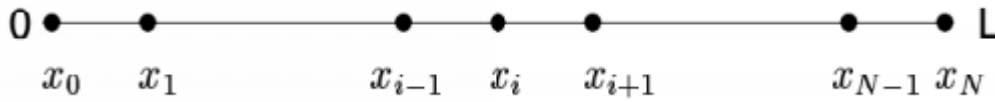


Figura 9 - Representação da discretização de domínios unidimensionais

Adimensionalizando a umidade e o espaço:

$$U = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (4.3)$$

$$X = (X_0 - X_{eq}) \cdot U + X_{eq} \quad (4.4)$$

$$\theta = \frac{x}{L} \quad (4.5)$$

Onde:

θ = dimensão espacial adimensional

Derivando a equação (4.4) em relação ao tempo, encontra-se:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = (X_0 - X_{eq}) \frac{\partial U}{\partial t} \quad (4.6)$$

Derivando duas vezes a equação (4.4) em relação a x , encontra-se:

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = (X_0 - X_{eq}) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (4.7)$$

Derivando-se a equação (4.6) em relação a θ , tem-se:

$$\frac{\partial x}{\partial \theta} = L \rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{1}{L} \quad (4.8)$$

Substituindo-se (4.8) em (4.7), temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right) \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right) = \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial U}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial U}{\partial \theta} \frac{1}{L} \right) \\ \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} &= \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Substituindo (4.6) e (4.9) na equação (3.6) encontra-se que:

$$(X_0 - X_{eq}) \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{D_{ef}}{L^2} \cdot (X_0 - X_{eq}) \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} \quad (4.10)$$

Logo:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{D_{ef}}{L^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} \quad (4.11)$$

Conforme visto na seção anterior, usando o método das diferenças finitas, podemos aproximar a derivada primeira de $U(\theta)$ em um ponto i por:

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = \frac{U_{i+1} - U_{i-1}}{2\Delta\theta} \quad (4.12)$$

E a derivada segunda de $U(\theta)$ em um ponto i pode ser aproximada por:

$$\frac{\partial^2 U_i}{\partial \theta^2} = \frac{U_{i-1} - 2U_i + U_{i+1}}{\Delta\theta^2} \quad (4.13)$$

Substituindo a equação (4.13) em (4.11), encontra-se:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = \frac{D_{ef}}{L^2} \cdot \frac{U_{i-1} - 2U_i + U_{i+1}}{\Delta\theta^2} \quad (4.14)$$

A representação da malha uniforme adimensional pode ser vista na Figura 10, na qual n é o número de intervalos de discretização.

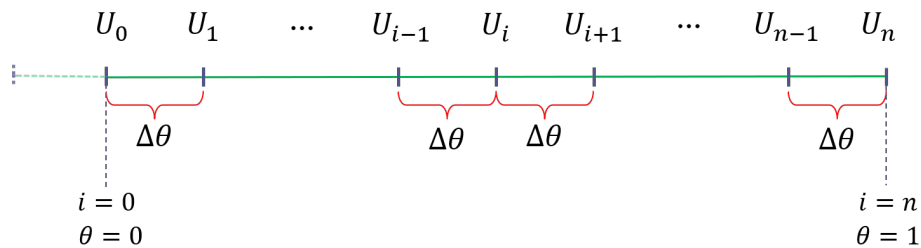


Figura 10 - Malha uniforme adimensional

É importante lembrar que pelas condições de simetria, $U_{-1} = U_1$. Assim, no centro da fruta, no ponto $x = 0$, temos:

$$\frac{\partial U_0}{\partial t} = \frac{D_{ef}}{L^2} \cdot \frac{U_{-1} - 2U_0 + U_1}{\Delta\theta^2} = \frac{D_{ef}}{L^2} \cdot \frac{-2U_0 + 2U_1}{\Delta\theta^2} \quad (4.15)$$

A outra condição de contorno é dada no ponto $i = n$. Considerando-se que na superfície da fruta o equilíbrio é atingido rapidamente, ou seja, $U_n = X_{eq}$, temos que:

$$\frac{\partial U_n}{\partial t} = 0 \quad (4.16)$$

Por fim, integra-se a EDO da equação (4.14) pelo método de Runge-Kutta em função de t . Assim, o método das linhas foi utilizado, já que para resolver a EDO, uma variável, espaço, foi discretizada, mas outra variável, o tempo, foi mantida contínua.

4.2.2 Diferenças finitas com malha variando para placa plana

A fim de se considerar o encolhimento da fruta que ocorre ao longo da desidratação osmótica, propõe-se adotar uma discretização com malha variável. Assim, à medida que o comprimento L do alimento diminuir em função da redução da umidade, o domínio de discretização também diminuirá, sendo que a distâncias entre cada ponto nodal também será menor, mas essas distâncias não serão iguais, como no caso da malha uniforme. Cada intervalo terá sua dimensão reduzida conforme a variação da umidade.

Dessa forma, o processo de discretização da equação da difusão (3.6) em um intervalo $0 \leq x \leq L$, será considerado um domínio discreto como o apresentado na Figura 11, onde o domínio físico contínuo (região entre 0 e L) é dividido em $N + 1$ pontos, notando que cada subdomínio pode ter um tamanho diferente.

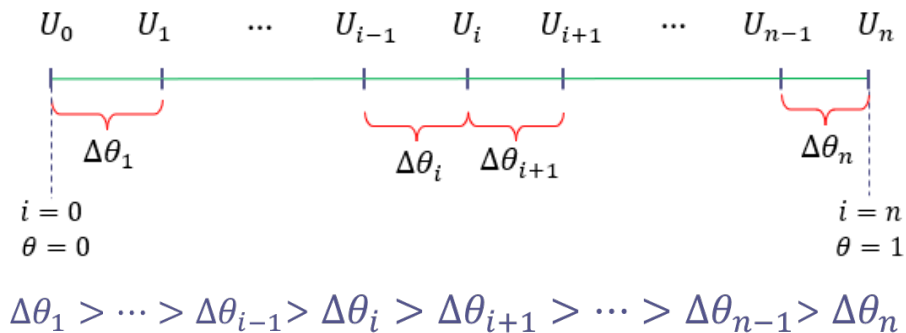


Figura 11 - Malha unidimensional não uniforme

A derivada primeira pode ser aproximada por (PINTO e LAGE, 2001):

$$\frac{\partial U_i}{\partial \theta} = \frac{(\Delta\theta_i)^2 U_{i+1} + ((\Delta\theta_i)^2 + (\Delta\theta_{i+1})^2) U_i - (\Delta\theta_{i+1})^2 U_{i-1}}{(\Delta\theta_i)^2 \cdot \Delta\theta_{i+1} + \Delta\theta_i \cdot (\Delta\theta_{i+1})^2} \quad (4.17)$$

A derivada segunda pode ser aproximada por (PINTO e LAGE, 2001):

$$\frac{\partial^2 U_i}{\partial \theta^2} = \frac{\Delta\theta_i U_{i+1} - (\Delta\theta_i + \Delta\theta_{i+1}) U_i + \Delta\theta_{i+1} U_{i-1}}{\Delta\theta_{i+1} \cdot \Delta\theta_i \cdot \frac{\Delta\theta_{i+1} + \Delta\theta_i}{2}} \quad (4.18)$$

Substituindo a equação (4.18) em (4.11), temos:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = 2 \cdot \frac{D_{ef}}{L^2} \cdot \frac{\Delta\theta_i U_{i+1} - (\Delta\theta_i + \Delta\theta_{i+1}) \cdot U_i + \Delta\theta_{i+1} U_{i-1}}{\Delta\theta_{i+1} \cdot \Delta\theta_i \cdot (\Delta\theta_{i+1} + \Delta\theta_i)} \quad (4.19)$$

Novamente, pela condição de simetria, no centro da fruta, no ponto $x = 0$, temos:

$$\frac{\partial U_0}{\partial t} = \frac{D_{ef}}{L^2} \cdot \frac{(-2U_0 + 2U_1)}{\Delta\theta_1 \cdot \Delta\theta_1} \quad (4.20)$$

Finalmente, a EDO (4.19) é integrada pelo método de Runge-Kutta em função de t , aplicando novamente o método das linhas.

4.2.2.1 Representação do encolhimento

Analisando os dados do encolhimento do trabalho de Silva Júnior (2015) percebe-se que houve maior perda de água na direção da espessura do que na direção radial. Além disso, quando uma dimensão encolhia mais, a outra encolhia menos. Então, representar o encolhimento só para L ou só para R , separadamente, em função da umidade resultou em um ajuste com grande flutuação de pontos.

Dessa forma, a proposta deste trabalho é representar o encolhimento em apenas uma variável calculando-se o volume. Para encontrar a curva que melhor se ajusta aos dados experimentais retirados do trabalho de Silva Júnior (2015), foram propostas seis expressões para o volume adimensional em função da umidade. Primeiramente, não se multiplica a umidade inicial e depois se insere a umidade inicial com expoente variando até cinco, conforme Tabela 10. Assim, pretende-se representar a diminuição do volume com a umidade usando-se apenas um parâmetro (α).

No trabalho de Silva Júnior (2015), considerou-se um encolhimento uniforme da banana na modelagem. Contudo pelos dados experimentais, percebe-se que o encolhimento não ocorreu de forma uniforme. Isto porque a umidade decresce mais rapidamente próximo à superfície e por isto o encolhimento não é uniforme. Entretanto, a representação do encolhimento não

uniforme em duas dimensões seria extremamente complexa, já que o cilindro se deforma durante o processo de encolhimento. Dessa forma, a proposta deste trabalho é considerar que o encolhimento na direção θ é proporcional à concentração em cada ponto da banana, ou seja, na superfície onde há maior perda de água, o encolhimento será maior. Como considera-se uma placa plana, o encolhimento modifica apenas a distância entre os pontos da malha, mas não há mudança na geometria. O tamanho de cada subdomínio será dado, então, em função da média da umidade nos pontos que o delimitam e pela expressão que melhor representar a variação do volume:

$$\Delta\theta_i = \frac{\Delta\theta_0}{\left[1 + \alpha \cdot \left(1 - \frac{U_i + U_{i-1}}{2}\right) \cdot X_0^c\right]} \quad (4.21)$$

sendo c o expoente de X_0 .

Tabela 10 - Expressões do volume adimensional para o ajuste aos dados experimentais

Índice	Expressão
1	$\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - U)]}$
2	$\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - U) \cdot X_0]}$
3	$\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - U) \cdot X_0^2]}$
4	$\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - U) \cdot X_0^3]}$
5	$\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - U) \cdot X_0^4]}$
6	$\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - U) \cdot X_0^5]}$

4.2.3 Valor médio do teor de umidade (\bar{U})

A cada intervalo de tempo, a solução numérica fornece o valor da grandeza de interesse em cada ponto nodal. O valor médio da grandeza de interesse, em cada intervalo, é calculado através da seguinte média ponderada:

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \cdot \left(\left(\frac{U_0 + U_n}{2} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} U_i \right) \quad (4.22)$$

sendo que n é o número de intervalos de divisão do domínio usado na discretização, U_i é o teor de umidade no ponto i e \bar{U} é o teor de umidade médio. Lembrando que o valor da umidade no primeiro (U_0) e o último ponto (U_n) precisa ser dividido por dois, já que cada ponto representa a umidade entorno desse ponto com uma distância de metade de um segmento. Contudo, nos pontos nos extremos, deve-se considerar apenas a metade dentro da malha.

4.3 DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE EFETIVA VIA OTIMIZAÇÃO

Abordou-se um problema direto, que é a obtenção de valores simulados da grandeza de interesse, através de modelos de difusão, pressupondo-se conhecidos os parâmetros de processo. Foi proposta uma solução para esse tipo de problema por meio de soluções numéricas das equações de difusão unidimensional. Dessa forma, conhecendo-se os parâmetros de processo, pode-se resolver o problema direto que, no caso específico desta pesquisa, possibilita a simulação dos processos de desidratação osmótica mediante modelos de difusão. Contudo, inicialmente, esses parâmetros não são conhecidos e precisam ser estimados. Essa estimativa é feita por meio de uma proposta de solução para o problema inverso descrito a seguir (processo de otimização).

O problema inverso consiste em estimar os parâmetros do processo a partir do conhecimento de valores específicos da grandeza de interesse (valores experimentais obtidos da literatura). No caso particular deste estudo, consiste na determinação da difusividade efetiva.

Como proposta de solução para o problema inverso descrito, propõe-se um algoritmo iterativo de otimização. Neste sentido, fixa-se inicialmente uma função objetivo para medir a qualidade do ajuste da curva simulada (obtida através da solução do problema direto) aos dados experimentais. A finalidade do algoritmo de otimização consiste em encontrar os valores das constantes que definem os parâmetros de processo que minimizem essa função objetivo e, conseqüentemente, promovam um melhor ajuste entre a curva simulada e os dados experimentais. Os valores ótimos para as mencionadas constantes são definidos como aqueles que minimizam a função objetivo.

4.3.1 Função objetivo

No desenvolvimento do algoritmo de otimização, a cada iteração, é feita uma comparação, por meio de uma função objetivo, entre os valores médios simulados da grandeza de interesse e os valores experimentais correspondentes previamente obtidos. Na presente pesquisa a função objetivo a ser minimizada é a soma do quadrado dos resíduos (SQR), que é definida como segue:

$$SQR = \sum_{i=1}^{N_p} \left(\bar{U}_i^{exp} - \bar{U}_i^{sim}(D_{ef}) \right)^2 \quad (4.23)$$

em que \bar{U}_i^{exp} é o valor médio da grandeza de interesse referente ao i -ésimo ponto experimental, \bar{U}_i^{sim} é o valor médio da grandeza de interesse calculado por simulação como uma função de D_{ef} e N_p é o número de dados experimentais. Assim, a função objetivo depende de D_{ef} . Para o caso da malha uniforme, D_{ef} é constante. Já para o caso da malha variável D_{ef} será uma função, com até dois parâmetros, a e b .

4.3.2 Expressões para a difusividade

Para o caso da malha variável, considera-se que a difusividade de massa, D_{ef} , é uma função que depende do valor local da grandeza de interesse U e de 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. Na Tabela 11 encontra-se uma relação com quatro funções que podem representar a difusividade. Essas expressões são testadas nos processos de otimização a fim de se obter a que melhor representa a difusividade efetiva de água em função da quantidade de água.

Tabela 11 - Expressões para D_{ef} em função de U

Índice	Expressão para D_{ef}
1	$a \cdot U + b$
2	$a \cdot U^2 + b$
3	$a \cdot \sqrt{U} + b$
4	$a \cdot \exp(b \cdot U)$

4.3.3 Coeficiente de determinação

Para a aferição da qualidade do ajuste da curva simulada aos dados experimentais usa-se também, neste trabalho, o coeficiente de determinação, R^2 , definido como o quadrado do coeficiente de correlação. Para uma sequência de valores experimentais x_{exp} e outra de valores simulados x_{sim} , o coeficiente de determinação é definido por:

$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQT} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (x_{exp,i} - x_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^{N_p} (x_{exp,i} - x_{médio})^2} \quad (4.24)$$

Em que $x_{médio}$ é a média dos valores experimentais e SQT é a Soma Total dos Quadrados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo dispõe sobre os resultados obtidos no transcurso da pesquisa no que diz respeito aos modelos matemáticos utilizados, à estimativa da difusividade efetiva e à simulação dos processos de desidratação osmótica por meio dos modelos matemáticos propostos.

5.1 SOLUÇÃO ANALÍTICA

A viabilização da simulação dos processos de desidratação osmótica de frutas, por meio de modelos de difusão, pressupõe o conhecimento dos parâmetros de processo. Nesta pesquisa, tal estimativa é feita por meio de um otimizador, baseado no método inverso, acoplado as soluções analíticas e numéricas da equação de difusão unidimensional em coordenadas cartesianas.

Para a simulação, foram adotados os dados levantados na revisão bibliográfica que dispõe sobre a desidratação osmótica de banana. Os valores de D_{ef} e R^2 encontrados para cada condição experimental estão apresentados na Tabela 12. A solução analítica não considera o encolhimento detectado

experimentalmente e o pior ajuste obtido foi para a condição experimental 1, com $R^2 = 0,9219$.

Tabela 12 - Resultados para a otimização do teor de umidade para cada condição experimental

Experimento	$D_{ef} (m^2/s)$	R^2
1	$1,0441 \times 10^{-8}$	0,9219
2	2.7480×10^{-8}	0,9897
3	2.7026×10^{-8}	0,9796
4	5.0790×10^{-8}	0,9918

Na Figura 12 são apresentadas as simulações da cinética de perda de água para as quatro condições experimentais, sem considerar o encolhimento e a difusividade de água constante. É possível observar que alguns pontos estão fora da curva, principalmente para tempos maiores de processo. Isso se deve, provavelmente, porque quanto maior o tempo de processo, maior o efeito do encolhimento que não é considerado.

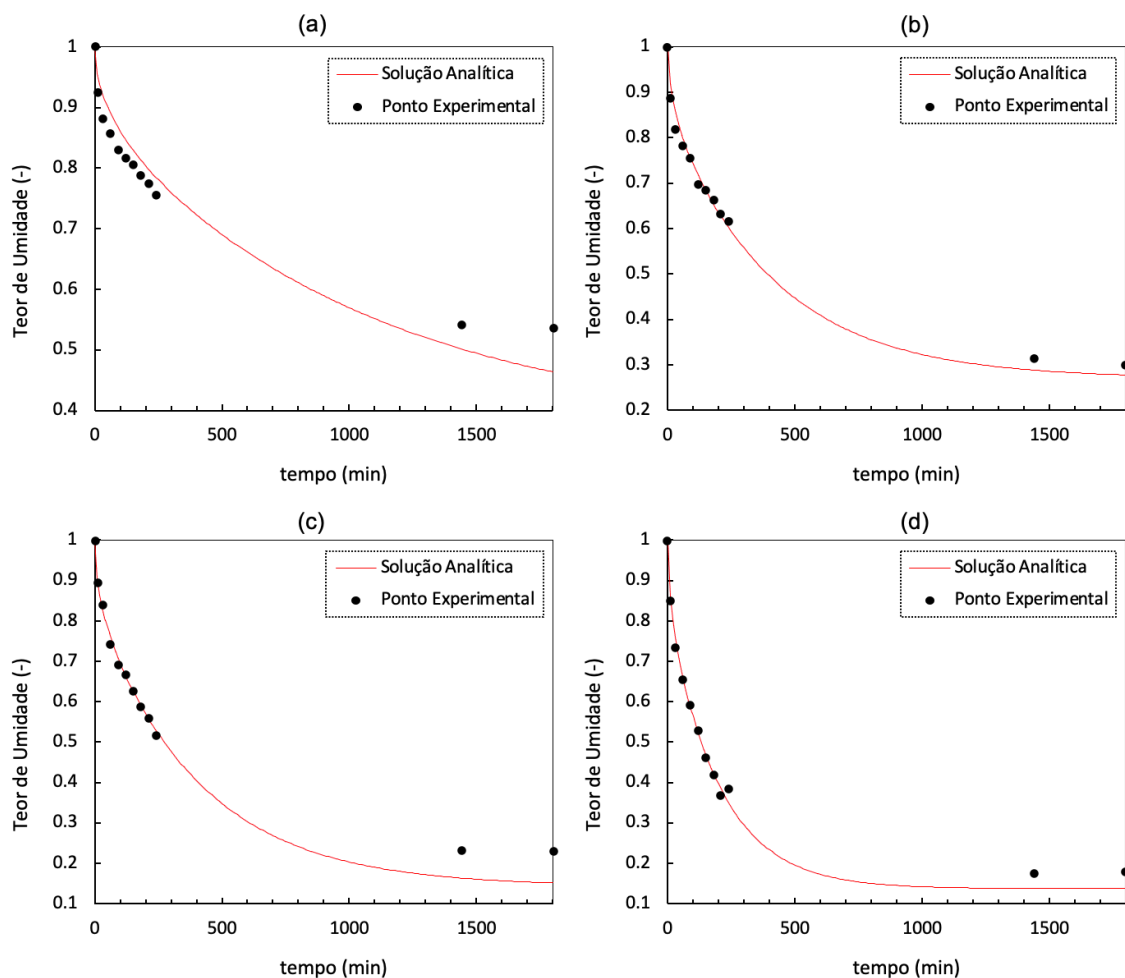


Figura 12 - Gráficos para as soluções analíticas obtidas para as condições experimentais: (a) 40°C e 40° Brix; (b) 40°C e 60° Brix; (c) 70°C e 40° Brix; (d) 70°C e 60° Brix.

5.2 SOLUÇÃO NÚMERICA

5.2.1 Malha uniforme

Uma vez obtida uma solução numérica, esta deve ser validada tendo em vista a avaliação dos resultados obtidos. Um dos métodos mais usados é a comparação dos resultados obtidos por uma solução analítica para um determinado problema conhecido com os resultados obtidos pela solução numérica aplicada a este mesmo problema. Para a validação da solução numérica obtida para o caso da malha uniforme, foram analisados processos difusivos considerando a difusividade efetiva e o volume constantes, sendo os dados experimentais destes processos obtidos da literatura. Os resultados fornecidos pela solução numérica foram, então, comparados com aqueles fornecidos por uma solução analítica.

Neste caso particular, as soluções numéricas devem coincidir com as soluções analíticas, constituindo um meio importante de validação para as soluções numéricas.

A simulação foi feita usando o valor da difusividade efetiva de massa (D_{ef}) estimado por meio de otimização já mencionada. No que se refere aos dados experimentais, usou-se os dados do tratamento 1 (condições experimentais de 40°C e 40°Brix).

Na Figura 13 vê-se a superposição dos gráficos correspondentes às soluções analítica e numérica, ratificando a boa concordância entre as duas soluções. Além disso é possível observar a convergência da solução numérica à medida que se aumenta o número de pontos da malha, e que usando uma malha de 50 pontos, já temos a sobreposição da curva analítica com a numérica.

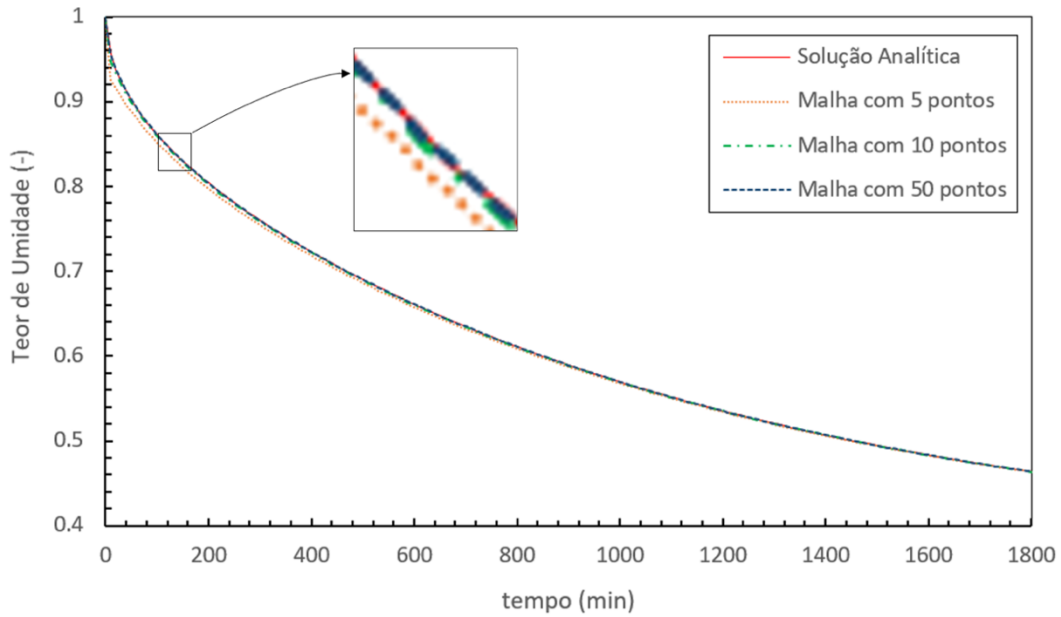


Figura 13 - Superposição entre os gráficos da solução analítica e da solução numérica considerando malha uniforme para as condições experimentais de 40°C e 40°Brix

5.2.2 Malha não uniforme

5.2.2.1 Representação do encolhimento

Como mencionado na metodologia, para representar o encolhimento não uniforme foi determinada uma correlação para representar a variação do volume em função da umidade. Como considera-se uma placa plana, a mesma variação de volume poderá ser aplicada à espessura da placa no entorno de cada ponto de discretização, conforme apresentado na equação (5.1). Na Tabela 13 estão dispostos os valores de α e R^2 para cada expressão testada.

Tabela 13 - Resultados dos ajustes realizados para os dados do encolhimento na desidratação osmótica

Expressão para o Volume Adimensional	α	R^2
$\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - U)]}$	192,0543	0,8691
$\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - U) \cdot X_0]}$	62,62868	0,8887
$\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - U) \cdot X_0^2]}$	20,3900	0,9029
$\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - U) \cdot X_0^3]}$	6,6282	0,9116
$\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - U) \cdot X_0^4]}$	2,1515	0,9143
$\frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - U) \cdot X_0^5]}$	0,6974	0,9109

Observa-se na tabela 13 que a expressão que melhor se ajusta é aquela que considera a umidade inicial elevada a quatro, com $R^2 = 0,9143$. Dessa forma, mesmo utilizando-se apenas um parâmetro e uma única função, obteve-se um ajuste melhor do que Silva Júnior (2015) que utilizou duas funções e dois parâmetros em cada, obtendo valores para R^2 de 0,8341 (para o raio) e 0,7634 (para a espessura). Então, modelar o encolhimento usando o volume em função da umidade elevada à quarta potência, usando apenas um parâmetro, resultou em um ajuste com menor dispersão dos pontos, como também pode ser visto na Figura 14.

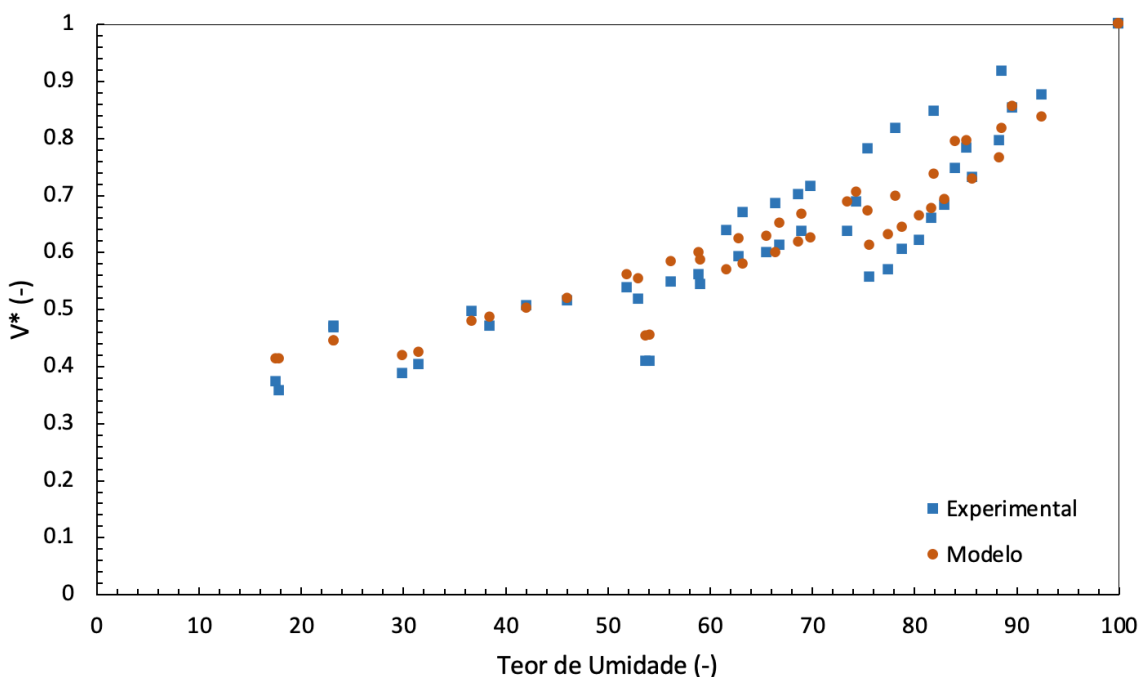


Figura 14 - Gráfico do ajuste para o volume adimensional em função do teor de umidade

Na Figura 15, retirada do trabalho de Silva Júnior (2015), observa-se que a fatia de banana que inicialmente tinha uma forma cilíndrica, acaba perdendo essa forma no decorrer do processo de desidratação osmótica. Assim, como a espessura L é bem maior que o diâmetro ($2R$), o modelo proposto de placa plana se mostrar uma boa alternativa. Numa placa plana, o volume e a espessura se reduzem na mesma proporção, como o volume da banana varia de acordo com a correlação encontrada acima, a variação da espessura da placa plana, $L_{placa}(t)$, ao longo do tempo é dada por:

$$\frac{L_{placa}(t)}{L_{placa,0}} = \frac{1}{[1 + \alpha \cdot (1 - \bar{U}_i(t)) \cdot X_0^4]} \quad (5.1)$$

E o tamanho de cada subdomínio será dado, então, por:

$$\Delta\theta_i = \frac{\Delta\theta_0}{\left[1 + 2,1515 \cdot \left(1 - \frac{U_i + U_{i-1}}{2}\right) \cdot X_0^4\right]} \quad (5.2)$$

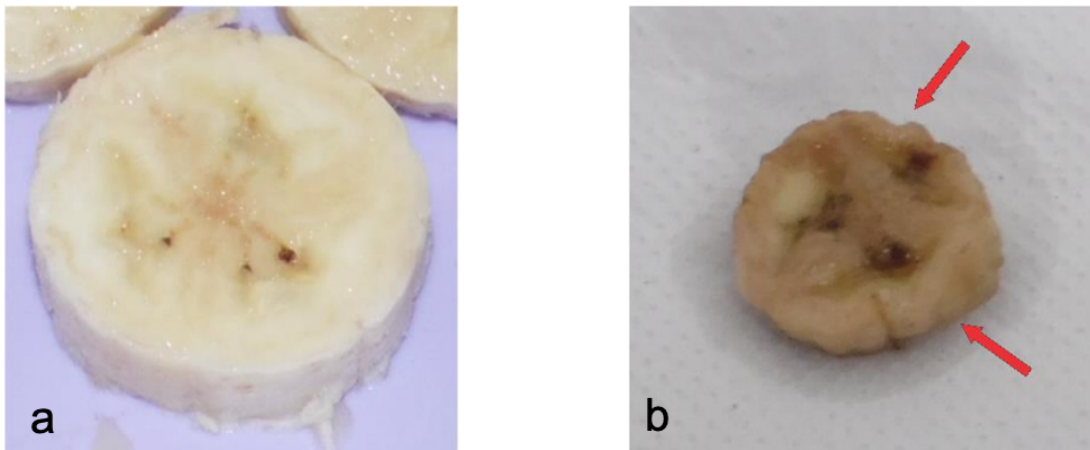


Figura 15 - Amostra in natura (a) e amostra osmoticamente desidratada (b) em solução de 40°Brix e 70°C retirada do trabalho de Silva Júnior (2015)

5.2.2.2 Determinação da correlação da difusividade efetiva via otimização

A próxima etapa é encontrar uma expressão adequada para descrever a variação da difusividade efetiva de água para cada condição experimental. As expressões dispostas na Tabela 11 foram testadas nos processos de otimização a fim de obter a que melhor representa a difusividade efetiva de água em função da quantidade de água.

Na Tabela 14 encontram-se os valores obtidos pelo processo de otimização para cada expressão para a condição experimental de 40°C e 40°Brix, juntamente com o coeficiente de determinação. A melhor expressão para a difusividade foi a de número 1, com $R^2 = 0,9931$. Para essa mesma condição, Silva Júnior também obteve o melhor resultado com a expressão 1, mas com um R^2 um pouco menor (0,9907).

Tabela 14 - Resultados para a otimização da difusividade efetiva para as condições experimentais de 40°C e 40°Brix

Índice	Expressão para D_{ef}	a	b	R^2
1	$a \cdot x + b$	$2,3114 \times 10^{-8}$	$-1,1218 \times 10^{-8}$	0,9931
2	$a \cdot x^2 + b$	$1,5883 \times 10^{-8}$	$-3,6553 \times 10^{-8}$	0,9929
3	$a \cdot \sqrt{x} + b$	$3,9187 \times 10^{-8}$	$-2,7510 \times 10^{-8}$	0,9930
4	$a \cdot \exp(b \cdot x)$	$7,6016 \times 10^{-12}$	$7,8649 \times 10^0$	0,9912

Na Tabela 15 encontram-se os valores obtidos pelo processo de otimização para cada expressão para a condição experimental de 40°C e 60°Brix, juntamente com o coeficiente de determinação. A melhor expressão para a difusividade foi a de número 4, com $R^2 = 0,9954$. Para essa mesma condição, Silva Júnior obteve o melhor resultado com a expressão 2, mas com um R^2 também menor (0,9945).

Tabela 15 - Resultados para a otimização da difusividade efetiva para as condições experimentais de 40°C e 60°Brix

Índice	Expressão para D_{ef}	a	b	R^2
1	$a \cdot x + b$	$1,7963 \times 10^{-8}$	$-3,6558 \times 10^{-9}$	0,9950
2	$a \cdot x^2 + b$	$1,5096 \times 10^{-8}$	$9,2382 \times 10^{-10}$	0,9952
3	$a \cdot \sqrt{x} + b$	$2,6924 \times 10^{-8}$	$-1,3323 \times 10^{-8}$	0,9949
4	$a \cdot \exp(b \cdot x)$	$1,039 \times 10^{-9}$	$2,8704 \times 10^0$	0,9954

Na Tabela 16 encontram-se os valores obtidos pelo processo de otimização para cada expressão para a condição experimental de 70°C e 40°Brix, juntamente com o coeficiente de determinação. A melhor expressão para a difusividade foi a de número 3, com $R^2 = 0,9991$. Para essa mesma condição, Silva Júnior obteve o melhor resultado com a expressão 2, mas com um R^2 novamente menor (0,9984).

Tabela 16 - Resultados para a otimização da difusividade efetiva para as condições experimentais de 70°C e 40°Brix

Índice	Expressão para D_{ef}	a	b	R^2
1	$a \cdot x + b$	$1,9963 \times 10^{-8}$	$-3,4549 \times 10^{-9}$	0,9990
2	$a \cdot x^2 + b$	$1,9625 \times 10^{-8}$	$5,0781 \times 10^{-11}$	0,9988
3	$a \cdot \sqrt{x} + b$	$2,7795 \times 10^{-8}$	$-1,2066 \times 10^{-8}$	0,9991
4	$a \cdot \exp(b \cdot x)$	$6,5464 \times 10^{-10}$	$3,6771 \times 10^0$	0,9987

Na Tabela 17 encontram-se os valores obtidos pelo processo de otimização para as cada expressão para a condição experimental de 70°C e 60°Brix, juntamente com o coeficiente de determinação. A melhor expressão para a difusividade foi a de número 1, com $R^2 = 0,9988$. Para essa mesma

condição, Silva Júnior obteve o melhor resultado com a expressão 2, mas com um R^2 também menor (0,9973).

Tabela 17 - Resultados para a otimização da difusividade efetiva para as condições experimentais de 70°C e 60°Brix

Índice	Expressão para D_{ef}	a	b	R^2
1	$a \cdot x + b$	$3,3484 \times 10^{-8}$	$-5,0657 \times 10^{-9}$	0,9988
2	$a \cdot x^2 + b$	$3,6552 \times 10^{-8}$	$2,2983 \times 10^{-8}$	0,9984
3	$a \cdot \sqrt{x} + b$	$4,3183 \times 10^{-8}$	$-1,7340 \times 10^{-8}$	0,9987
4	$a \cdot \exp(b \cdot x)$	$1,5572 \times 10^{-9}$	$3,3848 \times 10^0$	0,9974

Na Figura 16 são apresentadas as simulações da cinética de perda de água para as quatro condições experimentais, considerando o encolhimento e a melhor expressão para a difusividade de água. Como os indicadores estatísticos das Tabelas 14-17 já indicavam, os ajustes apresentados na Figura 16 sugerem que a modelagem desenvolvida para a descrição da perda de água no processo de desidratação osmótica foi adequada.

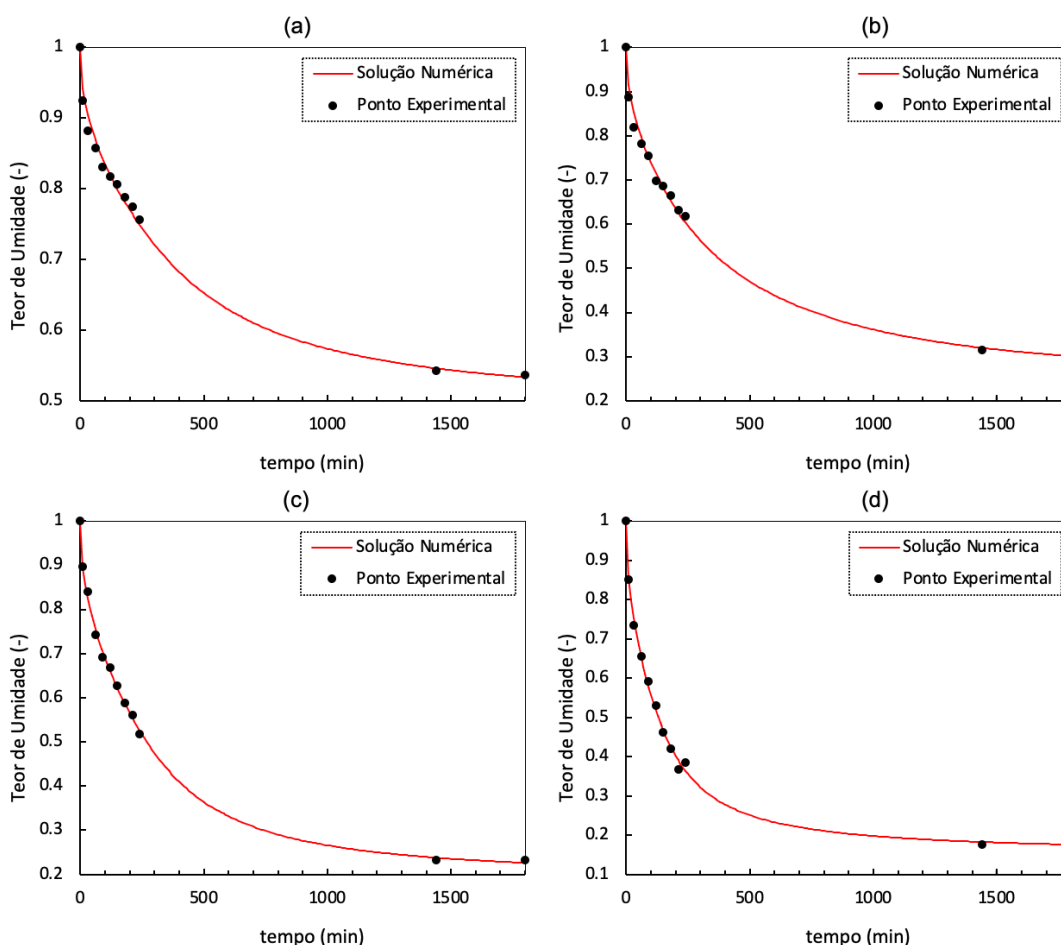


Figura 16 - Gráficos das soluções numéricas (assumindo difusividade variável e encolhimento) obtidas para as condições experimentais: (a) 40°C e 40° Brix; (b) 40°C e 60° Brix; (c) 70°C e 40° Brix; (d) 70°C e 60°Brix.

5.2.2.3 Discussão sobre os resultados obtidos pela otimização

Pelos resultados apresentados nas Tabelas 14-17, é possível concluir que o processo de otimização forneceu resultados compatíveis com os disponíveis na literatura. O número de trabalhos que consideram a difusividade variável na desidratação osmótica é muito pequeno. No trabalho de Silva Júnior (2015) a expressão 2 (Tabela 11) foi considerada a mais adequada para representar a variação da difusividade de água na desidratação osmótica de banana. No entanto, essa expressão foi testada nos processos de otimização do presente trabalho, e não apresentou os melhores indicadores estatísticos. Contudo, as quatro expressões testadas mostraram um resultado final melhor do que os obtidos por Silva Júnior (2015).

Como esperado, as soluções numéricas considerando o encolhimento e a difusividade variável apresentaram melhor ajuste do que as soluções analíticas, que não consideram o encolhimento e a difusividade é constante. Enquanto o melhor valor de R^2 para a solução analítica foi 0,9918, o pior R^2 para a solução numérica com malha variável foi 0,9912.

No presente trabalho utilizou-se um modelo unidimensional para descrever o processo de difusão ao longo da desidratação osmótica e os ajustes aos dados experimentais foram melhores do que os ajustes do trabalho de Silva Júnior (2015), que usou um modelo bidimensional. Ou seja, mesmo usando um modelo mais simples, obteve-se resultados melhores em todos os casos. Isso mostra que a proposta desse trabalho de considerar a banana como uma placa plana não é apenas válida, como pode ser mais adequada do que se considerar a banana como um cilindro. Isso ocorre provavelmente pelo fato do cilindro se deformar ao longo da desidratação, como observado na Figura 15. Adicionalmente, a espessura da fatia da banana é realmente bem menor do que o diâmetro dela.

Além disso, em seu trabalho, Silva Júnior (2015), adota o encolhimento uniforme. Enquanto o presente trabalho representa o encolhimento de forma não uniforme, o que traz uma abordagem física mais representativa do processo, já que durante o mesmo, o interior da banana, ainda com alto teor de umidade, provavelmente não encolhe na mesma proporção da superfície com umidade

bem inferior. Assim, representar o encolhimento como função da umidade permite representar o processo de desidratação osmótica de forma mais consistente.

6 CONCLUSÕES

No Capítulo 5 apresentaram-se os resultados e discussões atinentes às simulações e estimativas da difusividade efetiva que, em síntese, permitem as seguintes conclusões:

- A utilização de técnicas numéricas possibilitou o desenvolvimento de um programa computacional para solucionar numericamente a equação de difusão em coordenadas cartesianas, regime transiente e condição de contorno do primeiro tipo. Os testes realizados comparando os resultados obtidos pela solução numérica e pelos obtidos pela solução analítica validaram a solução numérica desenvolvida.
- As cinéticas de desidratação osmótica obtidas pela solução analítica e pela solução numérica concordaram entre si (na validação da solução numérica), admitindo parâmetros físicos constantes.
- A estratégia de estimação dos parâmetros desenvolvida mostrou uma capacidade satisfatória em encontrar valores ótimos para o problema estudado, mesmo variando a quantidade de ponto da malha e mesmo quando utilizados dados iniciais relativamente distantes dos valores ótimos.
- A solução numérica desenvolvida apresentou bons ajustes aos dados experimentais, considerando a difusividade efetiva de água constante (sem encolhimento) e a difusividade efetiva de água variável (com o encolhimento). No entanto, quando foram considerados o encolhimento e a difusividade efetiva de água variável, os valores do indicador estatístico R^2 melhoraram. Deste modo, como era esperado, a modelagem desenvolvida no presente trabalho (com o encolhimento e a difusividade variável) apresentou melhor descrição do problema de perda de água no processo de desidratação osmótica.

- Modelar a redução do volume com a umidade ao invés de modelar a redução do raio e da espessura separadamente apresentou um melhor ajuste aos dados experimentais e possibilitou desenvolver um modelo com encolhimento não uniforme. Dessa forma, mesmo usando um modelo unidimensional, foi possível obter resultados melhores do que os observados na literatura usando modelo bidimensional.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros têm-se:

- Aplicar as ferramentas numéricas e computacionais desenvolvidas à desidratação osmótica de outros produtos;
- Utilizar a metodologia proposta neste trabalho para outras geometrias;
- Utilizar a metodologia proposta neste trabalho para descrever o processo de ganho de sólidos durante a desidratação osmótica;
- Aplicar as ferramentas numéricas e computacionais desenvolvidas a outros processos difusivos tais como resfriamento, aquecimento e pausterização.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAFRUTAS. Os rumos da produção de frutas no Brasil, 2019. Disponível em <<https://abrafrutas.org/2019/11/04/os-rumos-da-producao-de-frutas-no-brasil/>> data de acesso: 08 de janeiro de 2021.

ANTONIO, G. C.; AZOUBEL, P. M.; ALVES, D. G.; EL-AOUAR, A. A.; MURR, F. E. X. Osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.): influence of process variables. In: 14th International Drying Symposium, 2004, São Paulo. Proceedings of the 14th International Drying Symposium, p. 1998-2004, 2004.

AGNELLI, M. E.; MARANI, C. M.; MASCHERONI, R. H. Modeling of heat and mass transfer during (osmo) dehydrofreezing of fruits. **Journal of Food Engineering**, Oxford, n. 69, p. 415-424, 2005.

AHMED, I.; QAZI, M. I.; JAMAL, S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 34, p. 29-43, 2016.

AIRES, K. L. C. de A. F. **Desidratação osmótica e secagem convectiva de maçã cortada em forma de paralelepípedo descritas por solução numérica tridimensional da equação de difusão**. 2016. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2016.

AIRES, J. E. F.; SILVA, W. P.; AIRES, K. L. C. A.; SILVA JÚNIOR, A. F.; CASTRO, D. S.; SILVA, C. M. D. P. S. Guava osmotic dehydration: description by two-dimensional diffusion models considering shrinkage and variations in process parameters. **International Journal of Food Engineering**, v. 12, p. 527–536, 2016.

AIRES, J. E. F.; SILVA, W. P.; AIRES, K. L. C. A.; SILVA JÚNIOR, A. F.; SILVA, C. M. D. P. S. Description of osmotic dehydration of apple using two-dimensional

diffusion models considering shrinkage and variations in process parameters. **Drying Technology**, v.35, p. 815–826, 2017.

AIRES, J. E. F; SILVA. **Uso de soluções numéricas da equação de difusão em coordenadas cartesianas na descrição da desidratação osmótica de frutas**. 2015. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2015.

AKBARIAN, M; GHASEMKHANI, N; MOAYEDI, F. Osmotic dehydration of fruits in food industrial: A review. **International Journal of Biosciences**, v. 3, p. 1-16, 2014.

ALFARO, L; SIRAMARD, S; CHOULJENKO, A; SATHIVEL, S. Effects of liquid nitrogen pretreatment on the osmotic dehydration and quality of cryogenically frozen blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.). **Food Bioscience**, v. 22, p. 165–169, 2018.

ALLAHDAD, Z; NASIRI, M; VARIDI, M; VARIDI, M. J. Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils. **Journal of Food Engineering**, v. 244, p. 202-211, 2018.

ALAM, M. S; KAUR, M; RAMYA, H. G. Mass Transfer Kinetics for Osmotic Dehydration of Kinnow Fruit in Sugar Solution. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, v. 89, p. 361–370 2019.

ALVES, D. G; SILVA, W. G. **Modelagem Matemática Aplicada à Otimização e à Análise de Processos**. 1. ed. PALMAS: EDUFT, 2019. v. 1. 98p.

ANDRADE, S. A. C. et al. Evaluation of water and sucrose diffusion coefficients during osmotic dehydration of jenipapol (*Genipa americana* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 551-555, 2007.

ARAÚJO, E. A. F. **Estudo do processo de desidratação osmótica e secagem de nectarina (prunus persica)**. 2005. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

ARAÚJO, W. D; GONELI, A. L. D; CORRÊA, P. C; HARTMANN FILHO, C. P; MARTINS, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Ciência Agrônômica**, v. 48(3), p. 448-457, 2017.

ASSIS, F. R; MORAIS, R. M. S. C. de; MORAIS, A. M. M. B. Mass Transfer in Osmotic Dehydration of Food Products: Comparison Between Mathematical Models. **Food Engineering Reviews**, v. 8(2), p. 116–133, 2015.

ASSIS, F. R; MORAIS, R. M. S. C. de; MORAIS, A. M. M. B. Mathematical modelling of the osmotic dehydration of physalis. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21(0), 2018.

AKHARUME, F; SMITH, A; SIVANANDAN, L; SINGH, K. Recent Progress on Osmo-convective Dehydration of Fruits. **Journal of Food Science & Technology**, v. 4(9) p. 956-96, 2019.

AZOUBEL, P. M; MURR, F. E. X. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p.291-295, 2004.

BALKE, M. E. **Desidratação de Pêssego em Diferentes Processos: Modelagem Matemática e Análise Empreendedora**. 2016. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Reg. Int. do Alto do Uruguai e das Missões, Erechim, 2016.

BALKE, M. E.; STEFFENS, J.; SOASRES, M. A. Avaliação das características de pêssegos dos cultivares chimarrita e eragil desidratados por diferentes processos. **Revista brasileira de produtos agroindustriais**, v. 19, p. 207-215, 2018.

BANIWAL, P; HATHAN, B. S. Process Parameter Optimization for the Development of Ready-to-Eat Instant Sand Pear Candy Using Response Surface Methodology. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39(6), p. 3098–3109, 2015.

BARBOSA. J; JHON, ERICKSON; VILLADA, DORA C; MOSQUERA, S. A. Concepção e construção de uma equipe de desidratação osmótica de desenvolvimento de novos produtos alimentos. **Rev.Bio.Agro** [online], v.11, n.1, p.37-46, 2013.

BONAZZI, C. et al. Food drying and dewatering. **Drying Technology**, v. 14, n.9, p. 2135-2170, 1996.

BROCHIER, B; INÁCIO, J. M; NOREÑA, C. P. Z. Study of osmotic dehydration of kiwi fruit using sucrose solution. **Brazilian Journal of Food and Technology**, v. 22, p. 1-9, 2019.

BUSTOS, M. C; ROCHA-PARRA, D; SAMPEDRO, I; DE PASCUAL-TERESA, S; LEÓN, A. E. The Influence of Different Air-Drying Conditions on Bioactive Compounds and Antioxidant Activity of Berries. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66(11), p. 2714–2723, 2018.

CASTRO, A. M; MAYORGA, E. Y; MORENO, F. L; Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. **Journal of Food Engineering**. v. 223, p.152–167, 2018.

CASTRO, D. S. de; SILVA, W. P. da; GOMES, J. P; AIRES, J. E. F; AIRES, K. L. C. de A. F; SILVA JUNIOR, A. F. da. Desenvolvimento e avaliação sensorial de goiaba-passa desidratada osmoticamente. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.21(0), 2017.

CASTRO, S. S. **Desidratação osmótica de frutas: estudo do processo e**

desenvolvimento de um sistema piloto para o pré-processamento de jaca (artocarpus integrifolia l.) E cupuaçú (theobroma grandiflorum). 2015. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politecnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

CHANDRA, S; KUMARI, D. Recent Development in Osmotic Dehydration of Fruit and Vegetables: A Review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 55, p. 552-561, 2014.

CHAVARRO-CASTRILLÓN, L. M.; OCHOA-MARTINEZ, C. I.; AYALAAPONTE, A. Efecto de la madurez, geometría y presión sobre la cinética de transferencia de masa en la deshidratación osmótica de papaya (Carica papaya L. var. Maradol). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, n. 3, v. 26, p. 596-603, 2006.

CHENLO, F; MOREIRA, R; FERNÁNDEZ-HERRERO, C; VÁZQUEZ, G. Osmotic dehydration of chesnut with sucrose, Mass transfer processes and global kinetics modelling. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 765-774, 2007.

CIURZYŃSKA, A; KOWALSKA, H; CZAJKOWSKA, K; LENART, A. Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food. **Trends in Food Science & Technology**, v. 50, p. 186-192, 2016.

CNA BRASIL. Fruticultura, 2017. Disponível em <<https://www.cnabrasil.org.br/areas-de-atuacao/fruticultura>> data de acesso: 09 de maio de 2020.

COIMBRA, L. M. P. de L; ARRUDA, H. A. S. de; MACHADO, E. de C. L; SALGADO, S. M; ALBUQUERQUE, S. S. M. C. de; ANDRADE, S. A. C. Water and sucrose diffusion coefficients during osmotic dehydration of sapodilla (Achras zapota L.). **Ciência rural**, v. 47, p. 1-7, 2017.

CONTRERAS, J. M; SMYRL, T. G. An evaluation of Osmotic Concentration of apple rings using corn syrup solids. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal**, v. 14, p. 301-314, 1981.

CONWAY, J, F; CASTAIGNE, G; PICARD, X. V. Mass transfer considerations in the osmotic dehydration of apples. **Canadian Institute of Food Science Technology Journal**, 16, 25-29, 1983.

CÓRDOVA, K. R. V. **Desidratação osmótica e secagem convectiva de maçã Fuji comercial e industrial**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CORRÊA, L. C; ANDRADE, E. T. de; MARTINAZZO, A. P; D'ANDREA, E. M; SOUSA, F. A. de; FIGUEIRA, V. G. Cinética de secagem, contração volumétrica e análise da difusão líquida do figo (*Ficus carica* L.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19(8), p.797–802, 2015.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. Oxford Science Publications, New York. 1992.

DARICI, S; ŞEN, S. Experimental investigation of convective drying kinetics of kiwi under different conditions. **Heat and Mass Transfer**, v. 51(8), p. 1167–1176, 2015.

DEHGHANNYA, J; GORBANI, R; GHANBARZADEH, B. Shrinkage of mirabelle plum during hot air drying as influenced by ultrasound-assisted osmotic dehydration. **International Journal of Food Properties**, 19(5), 1093-1103, 2016.

DEMCZUK JUNIOR, B; FACHIN, D. T; RIBANI, R. H; FREITAS, R. J. S. Degradação da cor e do ácido ascórbico na desidratação osmótica de kiwi. **Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, Curitiba, v. 26,

n. 2, p. 229-238, 2008.

DEREJE, B; ABERA, S. Effect of pretreatments and drying methods on the quality of dried mango (*Mangifera Indica* L.) slices. **Cogent Food & Agriculture**, 6(1), 2020.

DERMESONLOUOGLOU, E; CHALKIA, A; TAOUKIS, P. Application of osmotic dehydration to improve the quality of dried goji berry. **Journal of Food Engineering**, v. 232, p. 36–43, 2018.

DOTTO, G. L; SOUZA, T. B; SIMOES, M. R; MOREJON, C. F. M; Moreira, M. F. P. Diffusive-convective model considering the shrinkage applied for drying of pears. **Journal of food process engineering**, v. 40, p. 1-8, 2017.

DUARTE, M. E. M; UGULINO, S. M. P; MATA, M. E. R. M. C; GOUVEIA, D. S; QUEIROZ, A. J. de M. Desidratação osmótica de fatias de jaca. **Revista Ciência Agronômica** (UFC. Online), v. 43, p. 478-483, 2012.

EGEA, M. B; LOBATO, L. P. A desidratação osmótica como pré-tratamento para frutas e hortaliças. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 73(4), p. 316-24, 2014.

FALADE, K. O.; ADELAKUN, T. A. Effect of pre-freezing and solutes on mass transfer during osmotic dehydration and colour of oven-dried African star apple during storage. **International Journal of Food Science and Technology**, n. 42, p. 394-402, 2007.

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**, v. 80, p. 979-985, 2007

FAN, K; ZHANG, M; MUJUMDAR, A. S. Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 39, p. 47–57, 2017.

FANTA, S. W; ABERA, M. K; AREGAWI, W. A; HO, Q. T; VERBOVEN, P; CARMELIET, J; NICOLAI, B. M. Microscale modeling of coupled water transport and mechanical deformation of fruit tissue during dehydration. **Journal Food Engineering**, v. 124, p. 86-96, 2014.

FARHANINEJAD, Z; FATHI, M; SHAHEDI, M; SADEGHI, M. Osmotic Dehydration of Banana Slices Using Direct and Indirect Sonication: Optimization and Microstructure Analysis. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40(1), 2015.

FASOGBON, B. M; GBADAMOSI, S. O; TAIWO, K. A; Studies on the Osmotic Dehydration and Rehydration Characteristics of Pineapple Slices. **Journal of Food Processing & Technology**, v. 4, p. 220-228, 2013.

FENG, Y; YU, X; YAGOUB, A. E. XU, B-G; WU, B; ZHANG, L; ZHOU, C. Vacuum pretreatment coupled to ultrasound assisted osmotic dehydration as a novel method for garlic slices dehydration. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 50, p. 363-372, 2018.

FERNANDES, F. A. N; RODRIGUES, S; GASPARETO, O. C. P; OLIVEIRA, E. L. Optimization of osmotic dehydration of bananas followed by air-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 77, p. 188–193, 2006.

FERNÁNDEZ, P. R; MASCHERONI, R. H; RAMALLO, L. A. Ascorbic acid and calcium uptake in pineapple tissue through different sucrose concentrations of impregnation solution. **Journal of Food Engineering**, v. 261, p. 150–157, 2019.

FIOREZE, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária, 2004. 229 p.

GAMBOA-SANTOS, J; CAMPAÑONE, L. A. Application of osmotic dehydration and microwave drying to strawberries coated with edible films. **Drying**

Technology, p.1002-1012, 2018.

GIRALDO, G., TALENS, P., FITO, P.; CHIRALT, A. Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. **Journal of Food Engineering**, v. 58, p. 33-43, 2003.

GOMES, A. T; CEREDA, M. P; VILPOUX, O. Desidratação Osmótica: uma tecnologia de baixo custo para o desenvolvimento da agricultura familiar. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 3, n. 3, p. 212-226, set-dez 2007.

GÓMEZ, D. A. O. **Modelagem de problemas de fluxo na escala granular usando o método Lattice Boltzmann**. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2013.

GONELI, A. L. D; VIEIRA, M. do C; VILHASANTI, H. C. B; GONCALVES, A. A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical** (Online), v. 44, p. 56-64, 2014.

GUINÉ, R. P. F. The Drying of Foods and Its Effect on the Physical-Chemical, Sensorial and Nutritional Properties. **International Journal of Food Engineering**, v. 4(2), p. 93-100, 2018

HASANUZZAMAN, M; KAMRUZZAMAN, M; ISLAM, M; KHANOM, S; RAHMAN, M; LISA, L; PAUL, D. A Study on Tomato Candy Prepared by Dehydration Technique Using Different Sugar Solutions. **Food and Nutrition Sciences**, v. 5, p. 1261-1271, 2014.

INYANG, U; OBOH, I; ETUK, B. Kinetic Models for Drying Techniques - Food Materials. **Advances in Chemical Engineering and Science**, v. 8, p. 27-48, 2018.

KARAM, M. C; PETIT, J; ZIMMER, D; BAUDELAIRE D. E; SCHER, J. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. **Journal of Food Engineering**, 188, 32–49, 2016.

KAWANO, B. R; SILVA, R. F; MORES, G. de V; CUGNASCA, C. E. Tecnologias para a conservação pós-colheita. **Agroanalysis** (FGV), v. 36, n. 11, p. 29, 2016.

KHOUALDIA, B; BEN-ALI, S; HANNACHI, A. Pomegranate arils osmotic dehydration: effect of pre-drying on mass transfer. **Journal of Food Science and Technology**, 2020.

KIAN-P, N; KARATAS, S. Impact of different geometric shapes on drying kinetics and textural characteristics of apples at temperatures above 100 °C. **Heat and Mass Transfer**, 2019.

KUMARI, V; YADAV, B. S; B. YADAV, R; NEMA, P. K. Effect of osmotic agents and ultasonication on osmo-convective drying of sweet lime (*Citrus limetta*) peel. **Journal of Food Process Engineering**, v.43, 2020.

LANDIM, A. P. M; BARBOSA, M. I. M. J; JÚNIOR, J. L. B. Influence of osmotic dehydration on bioactive compounds, antioxidant capacity, color and texture of fruits and vegetables: A review. **Ciência Rural**. v.46(10), p. 1714–1722, 2016.

LERICI, C. R; PINNAVAIA, G; ROSA, M. D; BARTOLUCCI, L. Osmotic Dehydration of Fruit: Influence of Osmotic Agents on Drying Behavior and Product Quality. **Journal of Food Science**, v. 50(5), p. 1217–1219, 1985.

LEITE FILHO, M. T; MARTINS, J. H; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M; SILVA, A. L. C; MARTINS, I. T. A. Drying kinetics of pineapple agro-industrial residues: a new approach. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, p. 3928-3949, 2020.

LEWICKI, P; LENART, A. 28 Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables. **Handbook of Industrial Drying**, Fourth Edition, 2006.

LIMA, A. da S; FIGUEIREDO, R. W; MAIA, G. A.; LIMA, J. R; SOUSA, N. M. A. de. Estudo das variáveis de processo sobre a cinética de desidratação osmótica do melão. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas-SP, v. 24, n.2, p. 282-286, 2004.

LUO, W; TAPPI, S; WANG, C; YU, Y; ZHU, S; ROCCULI, P. Study of the Effect of High Hydrostatic Pressure (HHP) on the Osmotic Dehydration Mechanism and Kinetics of Wumei Fruit (*Prunus mume*). **Food and Bioprocess Technology**, v. 11, p. 2044–2054, 2018.

LUIKOV, A. V. **Analytical Heat Diffusion Theory**. New York: Academic Press, 1968.

MAI, S. C; FRIEDRICH, G. B; FONSECA, C; MENONCIN, S; Ternus, R. Z; DALCANTON, F. Avaliação do pré-tratamento osmótico com cloreto de sódio e diferentes tempos sobre a secagem da abóbora Cabotiá. **Revista CSBEA**, v. 1, p. 1-8, 2015.

MAHENDRANATHAN, M.; PRASANTHA, B. D. R.; HETTIARACHCHI, D. N. Determination of suitable osmotic solution concentration and time for dehydration of papaya slices. In: PROCEEDINGS OF THE VAVUNIYA CAMPUS INTERNATIONAL RESEARCH SYMPOSIUM, 2019. **Anais de Proceedings of the Vavuniya Campus International Research Symposium**, Sri Lanka: Vavuniya Campus of the University of Jaffna, 2019. p. 94-98.

MANCILLA Y. N; WON M. P; URIBE, E; GALVEZ A. V; SCALA K. D. Osmotic dehydration under high hydrostatic pressure: Effects on antioxidant activity, total phenolics compounds, vitamin C and color of strawberry (*Fragaria vesca*). **L.W.T. Food Science Technology**, v.52: p.151-156, 2013.

MAROUSIS, S. N; KARATHANOS, V. T; SARAVACOS, G. D. Effect of Sugars on the Water Diffusivity in Hydrated Granular Starches. **Journal of Food Science**, v. 54(6), p. 1496–1552, 1989.

MARTINEZ, C. A. B; SÁNCHEZ-SÁENZ, C. M; QUIROGA, S. D. A. Efecto de la deshidratación osmótica con azúcar de caña entera en el secado por convección del mango (Tommy Atkins) y en algunas propiedades fisicoquímicas. **DYNA**, v. 86, n. 210, p. 91-97, 2019.

MAYOR, L; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. **Journal of Food Engineering**, v.61, p.373-383, 2004.

MENESES, J. Osmoconvective dehydration in fruits and vegetables: A review of recent developments. **Agroindustrial Science** v. 8(1), p. 67 – 72, 2018.

MERCALI, G. D. **Estudo da Transferência de Massa na Desidratação Osmótica de Banana (*Musa sapientum*, *shum.*)**. 2009. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MERCALI, G. D; TESSARO, I. C; NOREÑA, C. P. Z; MARCZAK, L. D. F. Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum*, *shum.*). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, p. 2281–2289, 2010.

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.*). **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, p. 82-91, 2011.

MIRZAYI, B; HEYDARI, A; JABBARI, A. The effects of Sucrose/NaCl/Time interactions on the osmotic dehydration of banana slices. **Brazilian Journal of Food Technology**, v: 21, 2018.

MOREIRA, R; CHENLO, F; TORRES, M. D; VAZQUEZ, G. Effect of stirring in the osmotic dehydration of chestnut using glycerol solutions. **LWT- Food Science and Technology**, v. 40, p. 1507-1514, 2007.

NI, W. M. **The Mathematics of Diffusion**, CBMS-NSF Regional Conf. Ser. in Appl. Math., vol. 82, SIAM, Philadelphia, 2011.

NICOLIN, D. J; ROSSONI, D. F; JORGE, L. M. de M. Estudo das incertezas no ajuste da difusividade da Segunda Lei de Fick da difusão com o uso do método bootstrap. In: XXXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2015, São Carlos. **Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. São Paulo: Editora Edgard Blücher. v. 2. p. 1353-1379.

OLIVEIRA, L. A; LORDELO, F. dos S; TAVARES, J. T. de Q; CAZETTA, M. L. Elaboração de bebida fermentada utilizando calda residual da desidratação osmótica de abacaxi (*Ananas Comosus L.*). **Revista brasileira de tecnologia agroindustrial**, 2012.

PANAGIOTOU, N. M; KARATHANOS, V. T; MAROULIS, Z. B. Mass transfer modeling of the osmotic dehydration of some fruits. **International Journal of Food Science and Technology**, 33, 267-284, 1998.

PAPAZOGLU, D; KATSANIDIS, D. E. Osmotic Processing of Meat: Mathematical Modeling and Quality Parameters. **Food Engineering Reviews**, v. 12, 2019.

PARNIAKOV, O; LEOVKA, N. I; BALS, O; VOROBIEV, E. Effect of electric field and osmotic pre-treatments on quality of apples after freezing–thawing. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v.29, p. 23-30, 2015.

PENHA, T. A. M; BELIK, W. O impacto das certificações nas cadeias globais de

valor agrícolas: o caso das frutas frescas no Nordeste brasileiro. **Redes** (Santa Cruz do Sul. Online), v. 24, p. 187-211, 2019.

PESSOA, T; SILVA, D. R. S; GURJAO, F. F; DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. Cinética de desidratação osmótica e características físico-químicas de goiaba *Paluma*. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 10, p. 77-82, 2016.

PIETERS, B; ASSIS, F. R.; MORAIS, R. M. S. C; MORAIS, A. M. M. B. Qualidade de maçã Royal Gala cortada durante a desidratação osmótica. **Brazilian Journal of Food Technology**. [online], v.23, 2020.

PINHEIRO, G. K. I; OLIVEIRA, D. E. C; FERREIRA JUNIOR, W. N; RESENDE, O. Drying kinetics of yellow mombin (*Spondias mombin L.*) epicarp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 121-127, 2020.

PINTO, J. C; LAGE, P. L. da C. **Métodos Numéricos em Problemas de Engenharia Química**. 1. ed. Rio de Janeiro - RJ: E-Papers, 2001. v. 1. 350p.

POKHARKAR, S. M. Kinetic model for osmotic dehydration of green peas prior to air drying. **Journal of Food Science and Technology**, v. 38(6), p. 557-560, 2001.

PORCIUNCULA, B. D.A; ZOTARELLI, M. F; CARCIOFI, 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**, n. 119, p. 490-496, 2013.

QUINTANILLA, A.; MENCIA, A.; POWERS, J.; RASCO, B.; TANG, J.; SABLANI, S. Developing vacuum-impregnated dehydrofrozen red raspberries with improved mechanical properties. **Drying Technology**, p. 1-11, 2020.

RAMYA, V; JAIN, N. K; A Review on Osmotic Dehydration of Fruits and

Vegetables: An Integrated Approach. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40(3), 2016.

RASTOGI, N. K; RAGHAVARAO, K. S. M. S. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. **Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie**, v. 37, n. 1, p. 43-47, 2004.

RAFIQ K. M. Osmotic dehydration technique for fruits preservation-A review, **Pakistan Journal of Food Sciences** v. 22(2), p.71-85, 2012.

RODRÍGUEZ, 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**, v. 6, p. 2708–2720, 2013.

RUSKOVA, M., ALEKSANDROV, S.; PETROVA, T.; GOTCHEVA, V.; PENOV, N. Effect of Osmotic Dehydration Variables on the weight reduction of blackcurrants. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PRACTICAL CONFERENCE, Food, Technologies and Health, 2015, Plovdiv, Bulgaria. p.81-86, 2015.

SANTANA NETA, L.G.; MIRANDA, M. P. S; NEGREIROS, C. V. B; SILVA, I. R. C. Tecnologias patenteadas para produção e frutas tropicais desidratadas. **Anais do simpósio internacional de inovação tecnológica - simtec**, v. 1, p. 464-477, 2013.

SANTOS, F. S; MARTINS, A. N. A; ARAÚJO, K. T. A; ARAÚJO, A. C.; COSTA, M. S; GOMES, J. P. Physical properties of Sugaone grapes submitted to the osmotic dehydration. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.13, n. 2, p. 250-254, 2018.

SANTOS, D. C; COSTA, T. N; FRANCO, F. B; CASTRO, R. C; SOUZA, M. A. S. Cinética de secagem e propriedades termodinâmicas da polpa de pataúá

(*Oenocarpus bataua Mart.*). **Brazilian Journal of Food and Technology**, v. 22, p. 1-11, 2019a.

SANTOS, D. C; LEITE, D. D. F; LISBOA, J. F; FERREIRA, J. P. L; LIMA, T. L. B; FIGUEIRÊDO, R. M. F; COSTA, T. N. Modelagem e propriedades termodinâmicas da secagem de fatias de acuri. **Brazilian Journal of Food and Technology**, v. 22, p. 1-12, 2019b.

SILVA, A. L; SILVA, G. F; MONTEIRO, L. F; LIMA, Á. S; ALSINA, O. L. S. Water Diffusion in Intermittent Solar Drying of Mangaba (*Hancornia speciosa*). **Defect and Diffusion Forum**, v. 399, p. 196–201, 2020.

SILVA, C. K. F. **Estimação de Parâmetros de Secagem de Alimentos - Formulação de Luikov e Uso da Transformada Integral Generalizada**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – PPGEM, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

SILVA, F. D.; MATA, M. E. E. M. C.; DUARTE, M. E. M.; SOUZA, J. A.; SILVA, Y. C. Desidratação osmótica de banana da terra (*Musa sapientum*): aplicação de modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, n.1, p. 65-70, 2003.

SILVA JÚNIOR, 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. 269 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2015.

SILVA JÚNIOR, A. F; SILVA, W. P; AIRES, J. E. F; AIRES, K. L. C. A. F; CASTRO, D. S. Osmotic dehydration kinetics of banana slices considering variable diffusivities and shrinkage. **International Journal of Food Properties**. v. 20, p. 1313–1325, 2017.

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. **LWT - Food Science and Technology**, v. 55, p. 1-8, 2014.

SILVA, W. P; SILVA, C. M. D. P. S; SILVA, D. D. P. S; SILVA, C. D. P. S. Numerical Simulation of the Water Diffusion in Cylindrical Solids. **International Journal of Food Engineering**, v.4, p. 1556-3758, 2008.

SILVA, W. P; AIRES, J. E. F.; CASTRO, D. S; SILVA, C. M. D. S.; GOMES, J. P. Numerical description of guava osmotic dehydration including shrinkage and variable effective mass diffusivity. **LWT - Food Science and Technology**, v. 59(2), p. 859–866, 2014.

SILVEIRA, E.T.F.; RAHMAN, M.S.; BUCKLE, K.A. Osmotic dehydration of pineapple: kinetics and product quality. **Food Research International**, Amsterdam, v.29, n.3-4, p.227-233, 1996.

SODRÉ, U. Modelos Matemáticos, Notas de aulas. Dep. de Matemática da UEL, 27p, 2007.

SHEKAR F; JAVADI A; The effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of apple slices (var.Golab). **Journal of Food Bioscience Technology**, v. 9, p. 83-94, 2019.

SHI, J; SOPHIA. J. X. **Application and Development of Osmotic Dehydration Technology in Food Processing**, 2008.

SINGH, B.; PANESAR, P.S.; NANDA, V. Osmotic dehydration kinetics of carrot cubes in sodium chloride solution. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 43, p. 1361–1370, 2008.

SOUSA, E. P. de; FIGUEIRÊDO, R. M. F. de; GOMES, J. P.; QUEIROZ, A. J. de M.; CASTRO, D. S. de; LEMOS, D. M. Mathematical modeling of pequi pulp drying and effective diffusivity determination. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental** (impresso), v. 21, p. 493-498, 2017.

SOUZA, T. S. **Desidratação osmótica de frutículos de jaca (artocarpus integrifolia L.): aplicação de modelos matemáticos**. 2007. 65 f. Dissertação (Mestrado em Concentração em Engenharia de Processos de Alimentos) - Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2007.

SOUZA NETO, M. A. et al. Desidratação osmótica de manga seguida de secagem convencional: avaliação das variáveis de processo. **Ciênc. agrotec.** Lavras, v. 29, n. 5, p. 1021-1028, 2005.

SPAGNOL, W. A; SILVEIRA JUNIOR; V.; PEREIRA, E; GUIMARAES F., N. Monitoramento da cadeia do frio: novas tecnologias e recentes avanços. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.21, 2018.

SPERS, E. E; BEGIATO, G. F.; NEVES, M. F; CASTRO, L. T. E. Novos Produtos - Mercado de Frutas Secas. **AGROANALYSIS** (FGV), v. 28, p. 13-14, 2008.

SULISTYAWATI, I; VERKERK, R; FOGLIANO, V; DEKKER, M. Modelling the kinetics of osmotic dehydration of mango: Optimizing process conditions and pre-treatment for health aspects. **Journal of Food Engineering**, v. 280, 2020.

SUTAR, P. P.; RAGHAVAN, G. V. S.; GARIEPY, Y.; PRASAD, S.; TRIVEDI, A. Optimization of Osmotic Dehydration of Potato Cubes Under Pulsed Microwave Vacuum Environment in Ternary Solution. **Drying Technology**, v. 30 (13), p. 1449-1456, 2012.

SUTAR, N.; SUTAR, P. P. Developments in osmotic dehydration of fruits and vegetable-a review. **Trends in Post-Harvest Technology** v.1 (1), p. 20-36, 2013.

SPIESS, W; BEHSNILIAN, D. Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetable. 13th **World Congress of Food Science & Technology**, 2006.

TANNEHILL, J. C; ANDERSON, D. A; PLETCHER, R. H. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**. Taylor & Francis: USA, 1997, 781 p.

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. **International Journal of Food Science and Technology**. v. 41, p. 674–680, 2006.

TORTOE, C. A review of osmodehydration for food industry. **African Journal of Food Science**, v. 4(6), p. 303–324, 2010.

URIBE, E.; MIRANDA, M.; VEGA-GÁLVEZ, A.; QUISPE, I.; CLAVERÍA, R.; DI SCALA, K. Mass Transfer Modelling During Osmotic Dehydration of Jumbo Squid (*Dosidicus gigas*): Influence of Temperature on Diffusion Coefficients and Kinetic Parameters. **Food Bioprocess Technology**. v. 4, p. 320–326, 2011.

VIEIRA, D. S. **Equações de difusão e o cálculo fracionário**. 2015. 186 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Programa de Pós-graduação em Física, da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

WINICZENKO, R; GÓRNICKI, K; KALETA, A; MARTYNENKO, A; JANASZEK-MAŃKOWSKA, M; TRAJER, J. Multi-objective optimization of convective drying of apple cubes. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 145, p. 341–348, 2018.

YADAV, A. K; SINGH, S. V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51(9), p.1654–1673, 2012

ZHANG, M; CHEN, H; MUJUMDAR, A. S; TANG, J; MIAO, S; WANG, Y. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.57(6), p.1239–1255, 2015.

ZECCHI, B; GERLA, P. Effective diffusion coefficients and mass flux ratio during osmotic dehydration considering real shape and shrinkage. **Journal of Food Engineering**, 109821, 2019.

ZIELINSKA, M; MARKOWSKI, M. Effect of microwave-vacuum, ultrasonication, and freezing on mass transfer kinetics and diffusivity during osmotic dehydration of cranberries. **Drying Technology**, v.36(10), p.1158–1169, 2017.