



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

THAYZE RODRIGUES BEZERRA PESSOA

**OTIMIZAÇÃO DA DESIDRATAÇÃO OSMO-CONVECTIVA DE
CUBOS DE MANDIOCA**

CAMPINA GRANDE, PB

NOVEMBRO – 2018

THAYZE RODRIGUES BEZERRA PESSOA

**OTIMIZAÇÃO DA DESIDRATAÇÃO OSMO-CONVECTIVA DE
CUBOS DE MANDIOCA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Processos.

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos
Orientador: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

CAMPINA GRANDE, PB

NOVEMBRO – 2018

P475o

Pessoa, Thayze Rodrigues Bezerra.

Otimização da desidratação osmo-convectiva de cubos de mandioca /
Thayze Rodrigues Bezerra Pessoa. – Campina Grande, 2018.
195 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal
de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".

Referências.

1. Mandioca. 2. Desidratação Osmótica – Mandioca. 3. Mandioca –
Processo Híbrido de Secagem. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de.
II. Título.

CDU 633.493(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **THAYZE RODRIGUES BEZERRA PESSOA** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado **aprovada** em 30 de novembro de 2018.

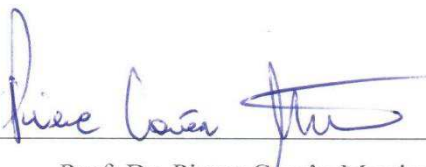
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima (UFCG)
Orientador



Prof. Dr. Anoar Abbas El Aouar (UFPB)
Examinador externo



Prof. Dr. Pierre Corrêa Martins (UFPB)
Examinador externo



Profª. Drª. Joselma Araújo de Amorim (UFPB)
Examinadora externa



Prof. Dr. Laércio Gomes de Oliveira (UFCG)
Examinador Externo

Campina Grande, Novembro de 2018.

A **DEUS**, por ter me dado força e determinação nos momentos mais difíceis desta jornada.

Aos meus pais, Maria Bezerra e Marcelo Rodrigues, pelo amor, apoio e dedicação de suas vidas para com os seus filhos.

Dedico.

“Nunca estaremos derrotados, enquanto vida houver, enquanto pudermos levantar a cada manhã, com tudo ali à nossa frente nos esperando.”

Marcel Carmargo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus que sempre me acolhe estendendo a sua mão misericordiosa.

“Em seu coração o homem planeja o seu caminho, mas o Senhor determina os seus passos”
PV 16:9.

Aos meus pais, Maria Bezerra Pessoa e Marcelo Rodrigues Pessoa, que sempre investiram na minha educação, com amor, confiança e apoio.

Aos meus amigos, que foram extremamente companheiros nesta difícil jornada. Em especial a Alexandra, Jane, Mara, Cristiane, Roberta, Ana Luíza, Taís, Glauciene, Victor e Sueny.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima por ter me aceitado como sua orientanda, ter confiado em mim desde o primeiro momento, dando toda liberdade para o desenvolvimento desta tese.

Ao professor e colega de trabalho Prof. Dr. Pierre Martins, que me motivou a ingressar na Pós-graduação de Engenharia de Processos. Pela dedicação a minha tese do início ao fim, seus conselhos e ensinamentos, suas rígidas correções que enalterceram meu trabalho e me lapidaram como pesquisadora.

Aos professores Dr. Laércio Gomes de Oliveira, Dra. Josivanda Gomes, Dr. Pierre Martins, Dr. Anoar Abbas El-Aouar e Dra. Joselma Araújo, pela honra de participar do exame de Qualificação e Defesa e pelas contribuições para melhoria desta pesquisa.

As minhas colegas de doutorado, Jacinete, Jéssica, Maiara e Daniele pelos períodos de diversão, estudo, pesquisa e conversas.

Aos meus colegas de laboratório Diogénes, Francisco, Clóvis e Mércia, pelo apoio no laboratório e nas análises, pela troca de experiências, e por toda ajuda concedida.

A minha colega e coordenadora do Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA), Dra. Joselma Araújo, por ter cedido o LEA para a realização das análises, pela confiança, conselhos e flexibilidade para o desempenho das atividades do doutorado.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estudar o processo híbrido de desidratação osmótica e secagem convectiva de cubos de mandioca (*Manihot esculenta Crantz.*). O processo de desidratação osmótica foi estudado através do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) a diferentes condições de temperatura do processo (19-63°C), concentração de soluto (23-67% p/p), tempo de operação (70-190 min.) e concentração de NaCl (0-20 % p/p). A otimização do processo foi verificada através das relações de mínimo ganho de sólidos com as máximas perdas de umidade e redução de atividade de água do material. A secagem convectiva foi realizada a diferentes temperaturas do ar de secagem (50 a 70°C), com velocidade de 1,35 m/s e umidade absoluta de 0,060 g água/g ar seco. A condição otimizada escolhida para a desidratação osmótica dos cubos de mandioca foi: 52°C, 56% em peso de soluto, 10% em peso de cloreto de sódio, 190 minutos e 180 rpm de agitação. As menores faixas de redução de volume e de área superficial dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente ocorreram em baixas temperaturas de operação (30°C) e de concentrações de NaCl (5%), e as máximas faixas de redução destes parâmetros ocorreram em altas temperaturas de operação (52°C) e de concentração de NaCl (15%). A redução dos cubos de mandioca no processo de desidratação osmótica apresentou comportamento anisotrópico. As difusividades efetivas médias de umidade e de sólidos para a desidratação osmótica dos cubos de mandioca na condição otimizada foram da ordem de 10^{-8} m²/s. As isotermas de dessorção para os cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente apresentaram a forma sigmoideal do tipo II e o modelo de GAB apresentou o melhor ajuste ($R^2 > 98\%$ e $P\% < 10\%$) para os dois tipos de amostras analisadas. A secagem convectiva dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente à diferentes temperaturas produziram produtos com baixo conteúdo de umidade (inferior a 13% em base úmida). Na secagem a 60°C foram obtidos produtos desidratados osmoticamente e secos com menor alteração de cor e conteúdo de umidade desejável (faixa de 10 a 11%). As difusividades efetivas médias de umidade obtidas através do modelo de Fick para a secagem convectiva dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente para faixa de 50 a 70°C foram da ordem de 10^{-10} m²/s. O processo híbrido nas melhores condições de operação gerou um produto seco com 10,2% de umidade, 15,2% de sacarose, 5,3% de cloreto de sódio e 44,94% de amido. O produto obtido do processo híbrido dos cubos de mandioca pode ser empregado na produção de alimentos a base de mandioca.

Palavras-chave: Mandioca. Desidratação osmótica. Secagem. Processo híbrido de secagem.

ABSTRACT

The present work had as objective to study the hybrid process of osmotic dehydration and convective drying of cassava cubes (*Manihot esculenta Crantz.*). The osmotic dehydration process was studied through the Rotational Central Compound Design (DCCR) at different conditions of the temperature process (19-63°C), solute concentration (23-67% w/w), operating time (70- 190 min.) and NaCl concentration (0-20% w/w). The optimization process was verified through the fraction of minimum solids gain with the maximum moisture loss and the material water activity reduction. Convective drying was performed at different temperatures of the drying air (50 to 70°C), 1.35 m/s air velocity and 0,060 g water/g dry mass absolute humidity. The optimum condition chosen for osmotic dehydration of cassava cubes was: 52°C, 56% by weight solute, 10% by weight sodium chloride, 190 minutes and 180 stirring. The lower ranges of volume reduction and surface area of the osmotically dehydrated cassava cubes occurred at low operating temperatures (30°C) and NaCl concentrations (5%), and the maximum ranges of reduction of these parameters occurred at high operation temperatures (52°C) and NaCl concentration (15%). The cassava cubes reduction in the osmotic dehydration process presented anisotropic behavior. The average effective moisture and solids diffusivity for the osmotic dehydration of the cassava cubes in the optimized condition were in the order of 10^{-8} m²/s. The desorption isotherms to the cassava cube “in natura” and osmotically dehydrated has presented sigmoidal form II and the GAB model presented the best fit ($R^2 > 98\%$ and $P\% < 10\%$) for the two types of samples analyzed. The connective drying of the cassava cubes dehydrated osmotically at different temperatures has produced products with low moisture value (within 13% humidity base). Drying at 60°C were obtained products dehydrated osmotically and dry with lower color change and humidity accepted value (from 10 to 11%). The effective diffusivity moisture obtained by the Fick model for the convective drying of the manioc cubes *in natura* and dehydrated osmotically to the 50°C to 70°C were in the order of 10^{-10} m²/s. The hybrid process at better operation conditions has generated a dry product with 10.2% humidity, 15.2% sucrose, 5.3% sodium choride and 44.94% starch. The obtained product from the cassava cubes hybrid process can be used in the food production at cassava base.

Keywords: Cassava. Osmotic dehydration. Drying. Hybrid drying process.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2 OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo geral	22
2.2 Objetivos específicos	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Mandioca	23
2.1.1 Características gerais	23
2.1.2 Produção	24
2.1.3 Amido de mandioca	26
2.2 Processos de redução de umidade	27
2.2.1 Desidratação osmótica	27
2.2.1.1 Fundamentos	27
2.2.1.2 Parâmetros que afetam o processo de desidratação osmótica	28
2.2.1.3 Cinética de desidratação osmótica	35
2.2.2 Secagem convectiva	41
2.2.2.1 Cinética de secagem convectiva	42
2.2.3 Atividade de água	45
2.2.4 Isotermas de sorção de equilíbrio	47
3 MATERIAL E MÉTODOS	50
3.1 Material	50
3.1.1 Matéria-prima	50
3.1.2 Agentes desidratantes e preparo das soluções aquosas	50
3.2 Metodologia experimental	51
3.2.1 Preparação das amostras	51
3.2.2 Caracterização do material	52
3.2.2.1 Composição físico-química da matéria-prima	52
3.2.3 Ensaios de desidratação osmótica	53
3.2.3.1 Determinação das faixas ótimas de operação da desidratação e das reduções geométricas: Planejamento experimental estatístico	54
3.2.3.2 Ensaios da cinética de desidratação osmótica	61
3.2.4 Isotermas de dessorção das amostras	62
3.2.4.1 Ensaios de secagem convectiva	63

3.2.4.2 Cinética de secagem	64
3.3 Determinações de parâmetros de transporte	64
3.3.1 Para cinética de desidratação osmótica	64
3.3.2 Para cinética de secagem convectiva.....	64
3.4 Tratamento estatístico dos dados	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1 Caracterização físico-química da matéria-prima.....	66
4.2 Desidratação osmótica.....	68
4.2.1 Análise geral.....	68
4.2.2 Perda de umidade	69
4.2.3 Ganho de sólidos totais.....	73
4.2.4 Redução de atividade de água	77
4.2.5 Relação de desempenho adotada para avaliar a operação	81
4.2.6 Avaliação das incorporações de sólidos solúveis nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente	87
4.2.7 Variações dimensionais na desidratação osmótica	98
4.2.8 Cinética de desidratação osmótica para condição otimizada	105
4.2.9 Determinação da difusividade efetiva média de perda de umidade e entrada de solutos dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente	112
4.3 Secagem Convectiva.....	118
4.3.1 Isotermas de dessorção dos cubos de mandioca <i>in natura</i> e desidratados na melhor condição do pré-tratamento osmótico	118
4.3.2 Cinética de secagem para os cubos de mandioca <i>in natura</i> e desidratados osmoticamente.....	128
4.3.3 Determinação da difusividade efetiva média de umidade dos cubos de mandioca <i>in natura</i> e desidratados osmoticamente no processo de secagem convectiva.....	136
4.3.4 Determinação da melhor condição de secagem	138
4.4 Avaliação do produto obtido pelo processo híbrido	140
5 CONCLUSÕES.....	146
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	149
REFERÊNCIAS	150
APÊNDICES	181

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Principais países produtores de mandioca no ano de 2014	24
Figura 2.2 – Principais estados produtores de mandioca no Brasil no período de 2016	25
Figura 2.3 – Principais fluxos mássicos decorrentes da desidratação osmótica de um material	28
Figura 2.4– Curvas de secagem: (a) Teor de umidade e temperatura do sólido em relação ao tempo; (b) Taxa de secagem em relação ao teor de umidade do material.	43
Figura 3.1 – Mandioca <i>in natura</i>	50
Figura 3.2 – Cubo de mandioca <i>in natura</i>	51
Figura 3.3 – Cortador de alumínio utilizado nos experimentos	51
Figura 3.5 – Secador convectivo de bandejas	63
Figura 4.1- Estimativas dos efeitos para perda de umidade	70
Figura 4.2–Superfícies de respostas e curvas de níveis para perda de umidade do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão	71
Figura 4.3–Superfícies de respostas e curvas de níveis para perda de umidade do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (b) tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio	72
Figura 4.4–Estimativas dos efeitos para ganho de sólidos totais	73
Figura 4.5–Superfícies de respostas e curvas de níveis para ganho de sólidos totais do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão	75
Figura 4.6–Superfícies de respostas e curvas de níveis para ganho de sólidos totais do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (b) tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio	76
Figura 4.7–Estimativas dos efeitos para redução de atividade de água	77
Figura 4.8–Superfícies de respostas e curvas de níveis para redução de atividade de água do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão	79
Figura 4.9–Superfícies de respostas e curvas de níveis para redução de atividade de água do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (b) tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio	80
Figura 4.10–Estimativas dos efeitos para relação de desempenho	82

Figura 4.11–Superfícies de respostas e curvas de níveis para relação de desempenho do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão	83
Figura 4.12–Superfícies de respostas e curvas de níveis para relação de desempenho do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (b) tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio	85
Figura 4.13–Gráfico de Pareto dos efeitos das variáveis sobre: (a) incorporação de sólidos solúveis; (b) incorporação de cloreto de sódio; (c) incorporação de sacarose	91
Figura 4.14–Curvas de níveis para incorporação de sólidos solúveis do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão; (d) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (e) tempo e concentração de cloreto de sódio	92
Figura 4.15–Curvas de níveis para incorporação de cloreto de sódio do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão; (d) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (e) tempo e concentração de cloreto de sódio	94
Figura 4.16–Curvas de níveis para incorporação de sacarose do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão; (d) temperatura e concentração de cloreto de sódio	96
Figura 4.17– Gráfico de Pareto dos efeitos das variáveis sobre: (a) redução de volume; (b) redução de área na desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução ternária de sacarose e cloreto de sódio.	102
Figura 4.18– Curvas de níveis para redução de volume e de área do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão; (d) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (e) tempo e concentração de cloreto de sódio	103
Figura 4.19– Cinéticas de perdas de massa (a), de umidade e de ganho de sólidos totais (b) e redução de atividade de água (c) na desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução de sacarose e cloreto de sódio.	106
Figura 4.20– Cinéticas de incorporações de sólidos solúveis, sacarose e cloreto de sódio na desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução ternária de sacarose e cloreto de sódio	110

Figura 4.21– Ajuste linear do modelo de Azuara e colaboradores (1992) para determinação da $PU_{\infty mod}$, $GS_{\infty mod}$, $NaCl_{\infty mod}$, $Sac_{\infty mod}$	113
Figura 4.22– Cinéticas de perdas de umidade e ganho de sólidos totais, na desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução de sacarose e cloreto de sódio.....	117
Figura 4.23– Isotermas de desSORÇÃO dos cubos de mandioca <i>in natura</i> obtidas experimentalmente nas temperaturas analisadas	118
Fonte: o próprio autor (2018).	118
Figura 4.24– Isotermas de desSORÇÃO dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente obtidos experimentalmente nas temperaturas analisadas	120
Figura 4.25–Cubos secos a 70°C (a) <i>in natura</i> sem escurecimento e (b) pré-tratado osmoticamente com escurecimento	122
Figura 4.26–Valores observados e estimados pelo modelo de GAB, do teor de umidade de equilíbrio de desSORÇÃO dos cubos de mandioca <i>in natura</i> (a) e desidratados osmoticamente (b) respectivamente.....	127
Figura 4.27–Adimensional de umidade em função do tempo para o processo de secagem dos.....	128
cubos de mandioca <i>in natura</i> e desidratados osmoticamente a várias temperaturas do processo	128
Figura 4.28–Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade dos cubos de mandioca <i>in natura</i> e desidratados osmoticamente a várias temperaturas do processo	130
Figura 4.29–Cubo <i>in natura</i> sem fissuras (a), cubo seco <i>in natura</i> (b) e pré-tratado osmoticamente (c) com fissuras	134
Figura 4.30–Cubos desidratados osmoticamente e secos nas temperaturas de (a) 60°C e (b) 70°C.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Composição da raiz da mandioca.....	24
Tabela 2.2–Valores mínimos de atividade de água para o desenvolvimento de alguns microrganismos patogênicos	46
Tabela 3.1 – Variáveis e níveis de variação do DCCR da desidratação osmótica de mandioca.....	54
Tabela 3.2 – Variáveis e níveis de variação do DCCR do tipo 2 ⁴ para avaliar a desidratação osmótica de mandioca em soluções de sacarose e cloreto de sódio	55
Tabela 4.1 – Caracterização físico-química da raiz de mandioca <i>in natura</i>	66
Tabela 4.2 – Valores experimentais das variáveis respostas perda de umidade, ganho de sólidos totais, relação de desempenho e redução de atividade de água.....	68
Tabela 4.3 – Análise de variância do modelo ajustado para perda de umidade.....	70
Tabela 4.4 – Análise de variância do modelo ajustado para ganho de sólidos totais.....	74
Tabela 4.5 – Análise de variância do modelo ajustado para redução de atividade de água	77
Tabela 4.6 – Análise de variância do modelo ajustado para relação de desempenho.....	82
Tabela 4.7 – Comparação dos resultados da Redução de atividade de água obtidos experimentalmente e pelo modelo estatístico com os valores otimizados de operação da desidratação osmótica de cubos de mandioca	86
Tabela 4.8 – Valores experimentais das variáveis respostas para desidratação osmótica de cubos de mandioca em soluções de sacarose e cloreto de sódio	88
Tabela 4.9 – Valores experimentais das variáveis dependentes reduções de volume e de área para desidratação osmótica de cubos de mandioca em soluções de sacarose e cloreto de sódio.....	99
Tabela 4.10 – Parâmetros de ajuste para perda de umidade e ganho de sólidos totais, obtidos pelo modelo de Azuara et al. (1992) durante a desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução de sacarose e cloreto de sódio na melhor condição de operação	114
Tabela 4.11 – Parâmetros de ajuste para as incorporações cloreto de sódio e sacarose, obtidos pelo modelo de Azuara et al. (1992) durante a desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução de sacarose e cloreto de sódio na melhor condição de operação	114
Tabela 4.12 – Parâmetros de ajuste das isotermas de dessorção dos cubos de mandioca <i>in natura</i> para cada temperatura de estudo	123
Tabela 4.13 – Parâmetros de ajuste das isotermas de dessorção dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente para cada temperatura de estudo	126

Tabela 4.14 – Caracterização da secagem convectiva dos cubos de mandioca <i>in natura</i> e desidratados osmoticamente	133
Tabela 4.15 – Caracterização da secagem convectiva dos cubos de mandioca <i>in natura</i> e desidratados osmoticamente com menor tempo de secagem sem ocorrência de fissuras	135
Tabela 4.16 – Parâmetros de ajuste obtidos pelo modelo de Fick durante a secagem convectiva dos cubos de mandioca <i>in natura</i> e desidratados osmoticamente em solução de sacarose e cloreto de sódio	136
Tabela 4.17 – Análise de variância para umidade final dos cubos de mandioca <i>in natura</i> ...	138
Tabela 4.18 – Teste de Tukey para comparação das médias da umidade final dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos	139
Tabela 4.19 – Caracterização físico-química dos cubos de mandioca <i>in natura</i> e desidratados osmoticamente e secos a 60°C em base úmida	140
Tabela 4.20 – Comparação da composição dos cubos de mandioca <i>in natura</i> e desidratados osmoticamente e secos a 60°C em base seca.....	142

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A	Constante dos modelos de Oswin, Copace, Chung-Pfost, Smith	–
ANR_{Sac}	Açúcares não redutores em sacarose	%
AR_{Glic}	Açúcares redutores em glicose	%
AT	Açúcares totais	%
A_w	Atividade de água	–
A_{wi}	Teor de atividade de água da amostra <i>in natura</i>	–
A_{wf}	Teor de atividade de água da amostra desidratada	–
B	Constante dos modelos de Oswin, Copace, Chung-Pfost, Smith	–
C	Parâmetros de ajustes dos modelos GAB, BET, Chung-Pfost, Copace	–
C	Capacidade do balão volumétrico	mL
C_{NaCl}	Concentração de cloreto de sódio	%
C_{NaClf}	Concentração de cloreto de sódio da amostra desidratada	%
C_{NaCl_i}	Concentração de cloreto de sódio da amostra <i>in natural</i>	%
C_{Sacf}	Concentração de sacarose final	%
C_{Sac_i}	Concentração de sacarose da amostra <i>in natura</i>	%
D_{ef}	Difusividade efetiva de massa do material	m ² /s
$\overline{D_{ef}}$	Difusividade efetiva média no tempo t	m ² /s
$D_{ef_{INaCl}}$	Difusividade efetiva para o transporte de NaCl	m ² /s
D_{ef_s}	Difusividade efetiva para o transporte de sólidos totais	m ² /s
$D_{ef_{ISac}}$	Difusividade efetiva para o transporte de sacarose	m ² /s
D_{ef_U}	Difusividade efetiva para o transporte de umidade	m ² /s
F_{AgNO_3}	Fator de correção da solução de nitrato de prata 0,1M	–
F_F	Fator de correção das soluções de Fehling A e B	–
GS	Ganho de sólidos totais	%

GS_{∞}	Ganho de sólidos totis no equilíbrio	%
GS_{exp}	Ganho de sólidos totais no tempo	%
GS_{∞}^{exp}	Ganho de sólidos totais no equilíbrio obtido experimentalmente	%
GS_{∞}^{mod}	Ganho de sólidos totais no equilíbrio obtido pelo modelo	%
GST	Ganho de sólidos totais	%
I_{NaCl}	Incorporação de NaCl	%
$INaCl_{\infty}$	Incorporação de NaCl no equilíbrio	%
$INaCl_{exp}$	Incorporação de cloreto de sódio no tempo	%
$INaCl_{\infty}^{exp}$	Incorporação de NaCl no equilíbrio obtida experimentalmente	%
$INaCl_{\infty}^{mod}$	Incorporação de NaCl no equilíbrio obtida pelo modelo	%
I_{Sac}	Incorporação de sacarose	%
$ISac_{\infty}$	Incorporação de sacarose no equilíbrio	%
$ISac_{exp}$	Incorporação de sacarose no tempo	%
$ISac_{\infty}^{exp}$	Incorporação de sacarose no equilíbrio obtida experimentalmente	%
$ISac_{\infty}^{mod}$	Incorporação de sacarose no equilíbrio obtida pelo modelo	%
K	Parâmetro de ajuste dos modelos GAB	—
K_1, K_2	Constantes do modelo de Peleg	—
L	Dimensão característica do material	m
M	Teor de umidade do material	g _{água} /g _{sólido seco}
m_a	Massa da amostra <i>in natura</i> ou desidratada na alíquota utilizada para titulação	g
m_f	Massa da amostra desidratada	g
m_i	Massa da amostra <i>in natura</i>	g
n_1, n_2	Constantes do modelo de Peleg	—
N	Número de dados utilizados	—
N	Constante do modelo de BET	—

PM	Perda de massa	%
PU	Perda de umidade	%
PU_{∞}	Perda de umidade no equilíbrio	%
PU_{exp}	Perda de umidade no tempo	%
PU_{∞}^{exp}	Perda de umidade no equilíbrio obtida experimentalmente	%
PU_{∞}^{mod}	Perda de umidade no equilíbrio obtida pelo modelo	%
P_V	Pressão do vapor da água pura na mesma temperatura	N/m ²
$P_{V'}$	Pressão do vapor da água no alimento	N/m ²
R_{1i}, R_{2i} e R_{3i}	Dimensões dos eixos x, y e z do cubo <i>in natura</i>	cm
R_{1f}, R_{2f} e R_{3f}	Dimensões dos eixos x, y e z do cubo desidratado	cm
RA _w	Redução da atividade de água	%
RD	Relação de Desempenho	%
RS	Redução de área	%
RV	Redução de volume	%
S_f	Área da amostra desidratada	cm ²
S_{GS}	Constante relacionada ao ganho de sólidos	s ⁻¹
S_i	Área da amostra <i>in natura</i>	cm ²
S_{INaCl}	Constante relacionada a incorporação de NaCl	s ⁻¹
S_{ISac}	Constante relacionada a incorporação de sacarose	s ⁻¹
S_{PU}	Constante relacionada a perda de umidade	s ⁻¹
SST_f	Teor de sólidos solúveis da amostra desidratada	%
SST_i	Teor de sólidos solúveis da amostra <i>in natura</i>	%
T	Tempo	s
T	Constante dos modelos de Copace e Chung-Pfost	–
UR	Umidade relativa do ar	%
V_{AgNO_3}	Volume de nitrato de prata 0,1M	mL
V_f	Volume da amostra desidratada	cm ³
V_g	Volume da solução glicosídica da amostra gasto na titulação	mL
V_i	volume da amostra <i>in natura</i>	cm ³
\bar{X}	Conteúdo médio de umidade	g _{água} /g _{sólido seco}

X_e	Umidade de equilíbrio do material	g _{água} /g _{sólido seco}
x_f	Teor de umidade da amostra desidratada em base úmida	%
x_i	Teor de umidade da amostra <i>in natura</i> em base úmida	%
X_m	Umidade da monocamada do material	g _{água} /g _{sólido seco}
X_0	Conteúdo de umidade inicial	g _{água} /g _{sólido seco}
Letras gregas		
∇	Operador Nabla	—
Sobrescritos		
<i>Exp</i>	Relativo às condições experimentais	—
<i>Mod</i>	Relativo as condições do modelo	—
Subscritos		
$AgNO_3$	Relativo a solução de nitrato de prata	—
<i>Ef</i>	Relativo a efetivo	—
<i>Exp</i>	Relativo às condições experimentais	—
<i>f</i>	Relativo a amostra desidratada osmoticamente	—
<i>F</i>	Relativo a solução de Fehling A e B	—
<i>G</i>	Relativo a solução glicosídica	—
<i>Glic</i>	Relativo a glicose	—
<i>GS</i>	Relativo ao ganho de sólidos totis	—
<i>I</i>	Relativo a amostra <i>in natura</i>	—
<i>M</i>	Relativo a monocamada do material	—
<i>NaCl</i>	Relativo ao cloreto de sódio	—
<i>PU</i>	Relativo a perda de umidade	—
<i>S</i>	Relativo ao transporte de sólidos totais	—
<i>Sac</i>	Relativo a sacarose	—
W_f	Relativo a atividade de água da amostra desidratada	—
W_i	Relativo a atividade de água da amostra <i>in natura</i>	—

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de mandioca, ocupando a terceira posição no *ranking* mundial, ficando atrás da Nigéria e Indonésia (CHICHERCHIO, 2014). Esse vegetal é uma planta arbustiva, perene, pertencente à família *Euforbiaceas*, classe das dicotiledôneas. Apresenta raízes tuberosas, possuindo elevado teor de amido em sua composição. A única espécie do gênero cultivada comercialmente, visando à produção de raízes tuberosas ricas em amido, é a *Manihot esculenta* subsp *esculenta* (FIALHO; VIEIRA, 2011). Sua cultura tem várias utilidades, sendo empregada, principalmente, na alimentação humana, na forma de amido e farinha, e em menor escala na alimentação animal, onde são aproveitadas as folhas e hastes da parte aérea da planta.

O território brasileiro possui um excedente de produção local desse tubérculo, cujo tempo de prateleira e de armazenamento na forma *in natura* é menor do que sua demanda de consumo nas regiões produtoras. Portanto, verificam-se perdas significativas dessa matéria prima pós-colheita devido sua degradação natural e pela ineficácia das redes de transporte, distribuição e comercialização a outras regiões potencialmente consumidoras desse alimento. As causas das perdas estão diretamente relacionadas com a significativa perecibilidade dos alimentos relacionada a seu conteúdo de umidade e de atividade de água. Elevados valores desses parâmetros são responsáveis pela deterioração microbiológica, química e enzimática do alimento. Assim, é preciso aplicar técnicas de conservação e/ou transformação das matérias primas vegetais, tal como a mandioca, para prolongar seu tempo de prateleira para consumo através de investimentos em operações que produzam produtos de boa qualidade e de maior atratividade para o consumidor. Uma maneira simples de diminuir as perdas produtivas e diversificar o consumo da mandioca seria a aplicação de processos de redução de umidade de materiais, tais como: desidratação osmótica e secagem.

A desidratação osmótica produz alimentos de conteúdo de umidade intermediário, cujo tempo de prateleira é relativamente breve, e pode conferir características sensoriais (cor, sabor, textura e outras) aos mesmos. A secagem convectiva é operação de remoção de água muito simples aplicada aos sólidos que apresenta melhores resultados de retirada de umidade e produtos com maiores tempos de armazenamento e consumo sob condições ambiente.

O uso de processos combinados visa a utilização das vantagens de cada técnica de determinada operação de conservação e/ou transformação das matérias primas em produtos diferenciados que podem melhorar seu uso em formulações e consumo. Então, a desidratação osmótica associada a secagem convectiva de tubérculos de mandioca representa um processo

combinado de técnicas de redução de umidade que pode proporcionar produtos com melhor estabilidade de cor e textura e maior tempo de prateleira. Esse produto deve apresentar características sensoriais diferenciadas do material apenas seco por convecção devido a incorporação e/ou perda de solutos durante sua desidratação osmótica e um considerável tempo de armazenamento (24 a 48 meses) a condições ambientes através de sua secagem convectiva que podem aumentar a sua aceitação e ampliar seu comércio e mercado de consumo (CASTRO et al., 2018; PESSOA et al., 2011).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho visa estudar o processo híbrido de desidratação osmótica e secagem convectiva de cubos de mandioca (*Manihot esculenta Crantz.*).

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a mandioca *in natura* e o produto obtido do processo híbrido, em uma condição operacional otimizada, quanto ao teor de atividade de água e umidade, concentrações de sólidos solúveis, açúcares redutores em glicose e não redutores em sacarose, cloreto de sódio, acidez, cinzas, proteínas, lipídeos, amido e valor de pH.
- Avaliar o processo de desidratação osmótica de cubos de mandioca em soluções ternárias (água, sacarose, e cloreto de sódio) a diferentes condições de temperatura do processo (19-63°C), concentração de soluto (23-67% p/p), tempo de operação (70-190 min.) e concentração de NaCl (0-20 % p/p), utilizando um delineamento estatístico fatorial para escolha da melhor condição de operação e para a análise das alterações geométricas das amostras.
- Estudar a cinética de desidratação osmótica dos cubos de mandioca na melhor condição de operação obtida pelo planejamento fatorial experimental avaliando os parâmetros: perdas de massa e de umidade, ganho de sólidos totais, redução de atividade de água, e incorporações de sólidos solúveis, sacarose e cloreto de sódio.
- Estudar a secagem convectiva dos cubos de mandioca *in natura* e desidratado osmoticamente, na melhor condição de desidratação osmótica obtida, a diferentes temperaturas do ar de secagem (50, 60 e 70°C).
- Determinar as isotermas de dessorção do material *in natura* e desidratado osmoticamente, na melhor condição de desidratação osmótica obtida, nas temperaturas utilizadas da secagem convectiva (50, 60 e 70°C).
- Determinar os parâmetros difusivos de transporte de massa da desidratação osmótica e da secagem convectiva a partir de correlações empíricas e modelos físicos matemáticos apresentados na literatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mandioca

2.1.1 Características gerais

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma planta perene, pertencente à família *Euforbiaceas*, sendo originária da América do Sul (VIEIRA et al., 2013). Possui alto teor de amido, sendo resistente à diversas condições de clima e solo, com elevada tolerância à seca, sendo plantada em todo Brasil (ALBUQUERQUE et al., 2014; EL-SHARKAWY, 2012).

No Brasil a mandioca possui diversas denominações de acordo com a localização, tais como: aipi, aipim, castelinha, macaxeira, mandioca-doce, mandioca-mansa, maniva, maniveira, pão de pobre (AURÉLIO, 2012).

As variedades de mandioca podem ser classificadas quanto ao teor de ácido cianídrico (HCN) na raiz como: doces ou mansas (baixos teores), com teor menor que 180 mg kg⁻¹ de HCN (em base úmida); intermediárias, com teores entre 180–300 mg kg⁻¹; e amargas ou bravas (teores elevados), com teor maior que 300 mg kg⁻¹ (SÁNCHEZ, 2004). A variedade de mesa, denominada de mandioca mansa, normalmente utilizada para consumo humano e animal, possui características sensoriais agradáveis para o consumidor, sendo de fácil cozimento. A mandioca brava, bastante utilizada na indústria, pode ser consumida após passar por um processo que elimine os compostos cianogênicos. O consumo frequente desses compostos causa um tipo de neuropatia grave, denominada de Kongo levando a pessoa a óbito (PASCOAL FILHO; SILVEIRA, 2012; SREEJA et al., 2003).

Existem diversos produtos que se pode obter a partir da raiz da mandioca. Na alimentação humana ela é consumida cozida, frita, em bolos e outras modalidades. Os animais a consomem de forma crua e desidratada, e a indústria utiliza a raiz na produção de amido (fécula), farinha e álcool (CHICHERCHIO, 2014).

A Tabela 2.1 mostra a composição da raiz da mandioca. Nela se pode observar que a raiz possui elevado teor de amido, tornando-se importante na indústria de alimentos. O amido é utilizado como ingrediente calórico e melhorador das propriedades físico-químicas dos alimentos.

Tabela 2.1– Composição da raiz da mandioca

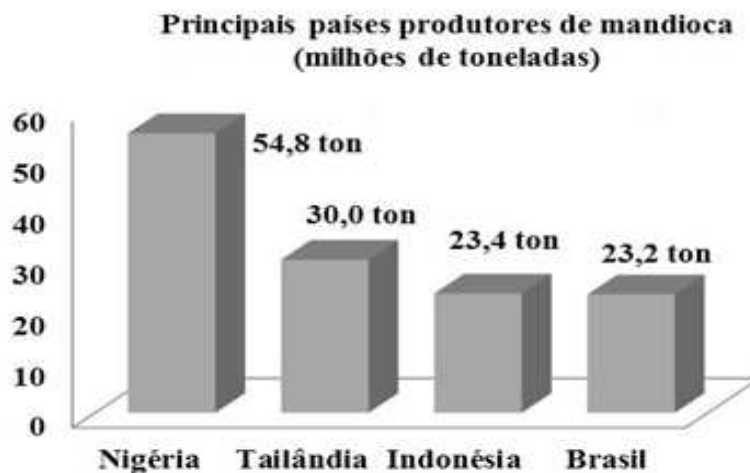
Componentes	Quantidade percentual (g/100g do tubérculo)
Umidade	60,00 %
Carboidratos	32,93%
Cinzas	0,92 %
Proteínas	0,68 %
Lipídeos	0,30 %
Fibra alimentar	5,17%

Fonte:Rinaldi et al., (2015).

2.1.2 Produção

A Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) relata que a produção mundial de mandioca cresce de maneira contínua. Nos últimos cinco anos foi registrado um aumento de 13% entre 2010 e 2014, passando de uma produção com 243 milhões de toneladas para 275 milhões de toneladas. A Figura 2.1 apresenta os principais países produtores de mandioca no período de 2014 com as respectivas produções de mandioca em milhões de toneladas.

Figura 2.1 – Principais países produtores de mandioca no ano de 2014



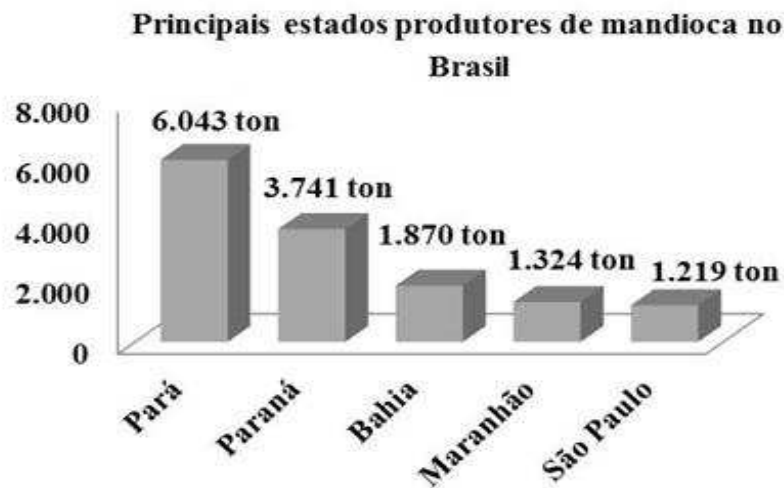
Fonte: SEAB-PR (2015).

Como mostra a Figura 2.1, no ano de 2014, a Nigéria foi a maior produtora mundial de mandioca com uma produção de 54,8 milhões de toneladas, seguida da Tailândia (30 milhões de toneladas) e Indonésia (23,4 milhões de toneladas). Em quarto lugar, ficou o Brasil produzindo 23,2 milhões de toneladas (SEAB-PR, 2015).

Na última década a produção brasileira se estabilizou, ficando na faixa de 22 a 25 milhões de toneladas (SEAB-PR, 2015). Isso aconteceu devido ao aparecimento de secas no Nordeste, das oscilações dos preços desse tubérculo e da dificuldade de se obter o grande número de mão de obra requerido para o seu cultivo (SEAB-PR, 2016).

O Estado do Pará, no ano de 2016, foi o que apresentou a maior produção brasileira de mandioca, com 6.043.254 toneladas, seguido do Paraná, com 3.741.954 toneladas, da Bahia, com 1.870.000 toneladas, do Maranhão, com 1.324.879 toneladas, e de São Paulo, com 1 219 610 toneladas, como mostra a Figura 2.2 (IBGE/LSPA 2016).

Figura 2.2 – Principais estados produtores de mandioca no Brasil no período de 2016



Fonte: IBGE/LSPA (2016).

Sendo o estado do Pará, o maior produtor nacional de mandioca, apresentando portanto o maior consumo “per capita” de farinha. Paraná possui um parque industrial grande para o processamento dessa matéria-prima, comportando 40 fecularias e aproximadamente 70 indústrias de farinha. A Bahia e o Maranhão são os principais produtores nordestinos destinando o material principalmente para o consumo humano através de farinha, goma e outras diversidades culinárias. O estado de São Paulo possui indústrias de fécula e de farinha altamente modernizadas garantindo uma das maiores produtividades agrícolas (SEAB-PR, 2016).

A Paraíba apresentou uma produção no ano de 2016 de 154.128 toneladas em uma área colhida de 15.563 hectares (IBGE/LSPA 2016).

2.1.3 Amido de mandioca

As raízes de mandioca são constituídas principalmente de água e carboidrato, cuja principal fonte de energia é o amido (AGUIAR et al., 2011; FAO, 2011; LUNA et al., 2013, SIVIERO et al., 2012). Este carboidrato, em sua estrutura é um homopolissacarídeo, sendo constituído por cadeias de amilose e amilopectina. A amilose apresenta cadeia linear, formada por unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas α -1,4. Entretanto, a amilopectina apresenta cadeia ramificada, formada por unidades de glicose unidas em α -1,4 e α -1,6 (DAMODARAN et al., 2010). Cardoso et al. (2014), constataram teores de amido entre 23,52 a 27,90% na matéria fresca, estudando quinze variedades de mandioca.

O fenômeno de gelatinização do amido ocorre quando ele é aquecido em água. Sua estrutura cristalina é rompida e são formadas pontes de hidrogênio pelas moléculas de água entre as cadeias de amilose e amilopectina. Os grupos hidroxila ficam expostos ocorrendo aumento no inchamento e na solubilidade do grânulo (SINGH et al., 2003). A consolidação da sua gelatinização é definida pelo inchamento, hidratação e solubilização das suas moléculas (THARANATHAN, 2002). A capacidade de gelatinização do amido depende do teor de amilose que nele se encontra (GOMES et al., 2009). Oliveira (2011a) observou uma faixa de 19 –24% de amilose em diferentes cultivares de mandioca. O amido com elevado teor de amilose não intumescer na mesma proporção daquele que a contém em menor quantidade. A amilose é a fração responsável pela sua diluição em meio líquido, enquanto que a amilopectina se responsabiliza pelo seu inchamento (SOARES, 2003). Amidos com elevadas concentrações de amilose têm maior região amorfa, e requerem temperaturas menores de gelatinização (SINGH et al., 2003). Silva et al. (2012a) observaram a gelatinização do amido em três (03) cultivares de mandioca e identificaram que ela se iniciou em temperaturas superiores a 60°C.

Quando o amido gelatinizado esfria, acontece o processo de retrogradação. As cadeias de amilose e amilopectina começam a se reassociar num nível mais ordenado e a viscosidade da pasta aumenta até formar um gel opaco. Esse evento depende de vários fatores, tais como: temperatura e tempo de armazenamento, pH, fonte de amido, presença de outros componentes (lipídios, eletrólitos e açúcares) e condições de processamento. Durante esse processo, acontece um fenômeno chamado de sinérese, na qual ocorre a saída de água do material devido a forte interação das cadeias entre si. A retrogradação é bastante percebida no envelhecimento de pães, nos produtos de panificação e na perda de água de sobremesas que utilizam o amido como espessante. Nesses casos, a retrogradação é um processo

inconveniente. Esta, influencia de maneira negativa a textura e a aceitabilidade de alimentos que contêm amido. Em contrapartida, ela melhora a digestibilidade dos alimentos amiláceos, tornando a sua digestão e a absorção mais lenta, e resultando em menor resposta glicêmica, situação desejável para indivíduos com diabetes (DERNADIN; SILVA, 2009; ELIASSON, 2004; THARANATHAN, 2002). Baranzelli et al. (2015), estudando a caracterização dos amidos nativos de cinco cultivares de trigo da região sul do Brasil, quanto às propriedades físicas e de pasta, observaram que os amidos de trigo ORS Vintecinco, Pioneiro, Topázio e BRS Parrudo, apresentaram maior tendência a retrogradação.

2.2 Processos de redução de umidade

2.2.1 Desidratação osmótica

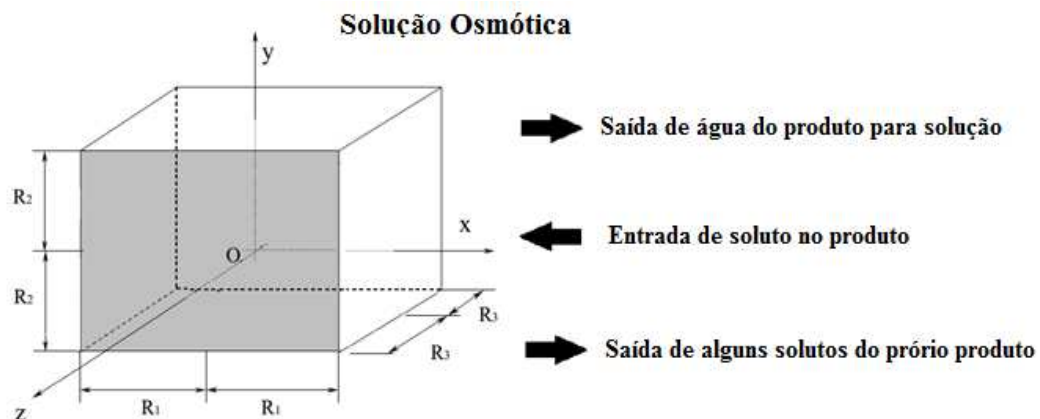
2.2.1.1 Fundamentos

A desidratação osmótica (DO), também denominada de impregnação ou saturação, é um processo onde a água é parcialmente removida do material quando o mesmo é submetido à imersão em solução hipertônica que possui atividade de água inferior e pressão osmótica superior às presentes no material (MAYOR et al., 2011; PEREZ et al., 2013; RUIZ-LÓPEZ et al., 2011). A força motriz para a saída de água do material é a diferença das pressões parciais presentes no alimento e na solução osmótica. Para a penetração dos solutos, a força motriz é a diferença das concentrações no sólido e na solução desidratante. A estrutura celular do alimento atua como uma membrana semipermeável. Admitindo-se que a membrana, responsável pelo transporte osmótico, não é perfeitamente seletiva, outros solutos presentes nas células do tecido vegetal do alimento podem também ser lixiviados para a solução osmótica (DEVIC et al., 2010; MAYOR et al., 2011; MERCALI et al., 2011a).

As principais vantagens da desidratação osmótica consistem em: diminuir o teor de umidade do alimento dispensando o uso de correntes de ar para se obter a transferência de massa, como ocorre nos processos de secagem convectiva; conservar as características sensoriais e nutricionais do produto, acompanhada de melhora na textura; conservação de pigmentos dos produtos; alteração de sabor com a incorporação de sólidos; inibição do escurecimento enzimático (DEMCZUK JÚNIOR et al., 2008; MACHADO et al., 2011; MERCALI et al., 2010; PESSOA et al., 2016; YADAV; SINGH, 2014).

Durante o processo de desidratação por osmose se observam três tipos básicos de transferência de massa que ocorrem simultaneamente. A primeira é a saída de água do material para a solução hipertônica. A segunda é a entrada de soluto da solução para o material. Através desse transporte é possível se introduzir uma quantidade de qualquer outro soluto, melhorando o aspecto nutricional e/ou a qualidade sensorial. A terceira é a saída de alguns solutos do material (açúcares, ácidos orgânicos, sais minerais, vitaminas) para a solução. Essa transferência de massa é insignificante em termos quantitativos quando comparada as duas primeiras. Porém, ela precisa ser considerada na composição final do produto porque exerce influência nas características organolépticas e nutricionais do produto. A Figura 2.3 ilustra os tipos de transferência de massa que ocorrem na desidratação osmótica de um material (DEVIC et al., 2010; MAYOR et al., 2011).

Figura 2.3 – Principais fluxos mássicos decorrentes da desidratação osmótica de um material



Fonte: Pessoa (2017).

2.2.1.2 Parâmetros que afetam o processo de desidratação osmótica

A taxa de perda de água e de ganho de sólidos durante a desidratação osmótica sofre a influência dos seguintes fatores: agentes desidratantes, concentração da solução, tempo de imersão, temperatura, agitação, razão amostra/solução, tamanho e geometria da amostra, pressão, e características do tecido vegetal (CHAVAN; AMAROWICZ, 2012; RAMYA; JAIN, 2016). A seguir, encontram-se os principais aspectos desses fatores mencionados.

- Agentes desidratantes e concentração da solução

O processo de difusão do soluto no alimento é influenciado pela composição e concentração da solução osmótica (MONNERAT et al., 2010). O aumento da concentração da solução osmótica acarreta uma elevação do gradiente de pressão osmótica existente entre ela e o produto a ser desidratado, proporcionando uma maior perda de água e maior perda de peso do produto (AN et al., 2013a; CASTRO et al., 2018; MENDONÇA, 2014; WANG et al., 2013).

A escolha do soluto depende de fatores como a solubilidade no solvente, permeabilidade do mesmo na membrana celular e custo. O tipo de soluto utilizado como agente osmótico influencia nas mudanças das propriedades sensoriais, do valor nutricional e da cinética de transferência de massa do produto final. O peso molecular do soluto e seu caráter iônico influenciam diretamente na perda de água e ganho de sólidos durante o processo osmótico. Solutos com alto peso molecular provocam uma diminuição no ganho de sólidos e um aumento na perda de água, promovendo uma maior perda de peso do material. Solutos de baixo peso molecular favorecem o ganho de sólidos devido à alta taxa de penetração das moléculas (CHAHUAN et al., 2011; MEHTA, et al., 2013; TORTOE, 2010).

Os solutos mais utilizados nas soluções de desidratação osmótica são a sacarose e o sal. A sacarose é um agente osmótico bastante eficiente, principalmente quando a desidratação osmótica é utilizada como pré-tratamento para secagem convectiva. Este soluto previne a perda de aromas e o escurecimento enzimático (MAYOR et al., 2011; QUEJI; PESSOA, 2011). O cloreto de sódio promove elevação da pressão osmótica e uma intensa diminuição de atividade de água. Os íons cloreto de sódio são pequenos, o que facilita sua penetração nos tecidos do material formando cristais de NaCl na célula. Isto promove um maior ganho de sólidos no material devido ao aumento da força motriz provocada pela maior saída de água do material, reduzindo significativamente sua atividade de água (AL-MUTHASEB et al., 2010; HEREDIA et al., 2009). O cloreto de sódio é um excelente agente desidratante para vegetais nos casos em que o paladar do sal mantém ou melhora o sabor do produto processado. Porém, sua utilização na desidratação é limitada devido a restrições de solubilidade em líquidos. Seu coeficiente de solubilidade em água apresenta valores de 25 a 27% em peso de sal nas soluções aquosas, para a faixa de temperatura de 10 a 70⁰C (LILEY et al., 1999). Outro fato extremamente relevante é a sua limitação nutricional de saúde pública. O valor diário de referência (VDR) para o sódio em produtos processados é de 2,4g/100g segundo a Resolução RDC n° 360, de 23 de Dezembro de 2003.

As soluções aquosas ternárias de sacarose e cloreto de sódio reduzem de forma mais elevada o teor de umidade de sólidos quando comparadas as suas soluções aquosas binárias (sacarose/água, sal/água). Isto se deve a formação de dois gradientes de concentração de soluto na célula, um para a sacarose e o outro para o sal, aumentando a eficiência da solução ternária para a retirada de umidade. Além disso, o sal impede a criação de uma barreira de açúcar na superfície externa do material, promovendo elevadas taxas de retirada de água (PEREZ et al., 2013; WANG et al., 2013). O emprego de soluções ternárias (sacarose/sal/água) e binárias (sacarose/água) na desidratação osmótica foi analisado por Bekele e Ramaswamy, (2010). Eles verificaram que o produto desidratado em solução ternária, apresentou menor atividade de água comparada ao produto desidratado em solução binária. Esse comportamento coincide com os observados por Albuquerque Neto (2015) que estudou os efeitos da concentração e do tipo de solutos em soluções aquosas para a desidratação osmótica de mandioca a 50°C. Os ensaios realizados com as soluções aquosas ternárias de sacarose e cloreto de sódio apresentaram melhores resultados do que as soluções aquosas binárias de sacarose. Essas soluções ternárias apresentaram maiores valores de relação de desempenho da operação e de redução da atividade de água do material. Monerat et al. (2010) e Perez et al. (2013), também constataram esse comportamento na avaliação de perda de umidade das amostras na desidratação osmótica de maçã e polpas de cupuaçu respectivamente.

A influência do aumento da concentração de soluto na solução osmótica foi verificada por Castro et al. (2018). Eles observaram que a elevação dessa variável de operação, proporcionou o acréscimo nos parâmetros ganho de sólidos e perda de água na desidratação osmótica de fatias de goiaba a 50 °C em soluções de sacarose com 60°Brix. Esses resultados concordam com os citados por Porto et al. (2014) no estudo do processo osmótico de uvas *Crimson Seedless* a 40°C, 4 h e concentração da solução de 45°Brix. Badwaik, et al. (2013) e Coimbra et al. (2017) verificaram que o aumento da concentração de soluto na solução, provocou o acréscimo no ganho de sólidos ao estudarem a desidratação osmótica de brotos de bambu e sapoti, respectivamente.

A concentração iônica também influencia o processo de desidratação osmótica. Soluções ácidas aumentam a taxa de perda de água porque causa alterações nas propriedades dos tecidos, provocando mudanças na textura de frutas e legumes (RAMYA; JAIN, 2016).

- Tempo

As taxas de perda de água e de ganho de sólidos no produto são elevadas no início do processo da desidratação osmótica devido ao maior gradiente de pressão osmótica existente entre o produto e a solução hipertônica. Com o aumento no tempo de imersão a taxa de transferência de massa diminui. Deste modo, os estágios iniciais da desidratação osmótica são os mais importantes, uma vez que os fenômenos de transporte são mais rápidos e a evolução do processo osmótico depende do seu impacto (CASTRO et al., 2018; MD SALIM et al., 2016; RAMYA et al. 2014). Altas taxas de perda de água nos estágios iniciais da desidratação osmótica com o aumento da temperatura foram relatados por Mehta et al. (2013) e Ramya et al. (2014) para congumelos, por Mokhtarian et al. (2014) para abóbora, por Alam e Islam, (2013) para cebola, por Yadav et al. (2012) para pêssago, por Shamaei et al. (2012) para uva, por Oladejo et al. (2013) para manga e por Jain et al. (2011) para mamão.

A otimização do tempo na desidratação osmótica de laranja foi estudada por Mendes et al. (2013). Eles observaram que o ensaio realizado com menor tempo de imersão de material, apresentou altos valores de perda de água e baixos valores de ganho de sólidos. Tais resultados ocorreram em condições de tempo de 90 minutos, solução de 60 °Brix e a 20°C, demonstrando ser as mais adequadas para o processo. Eles verificaram que o aumento do tempo mostrou efeito negativo para redução de massa. Mimura et al. (2014) relataram que durante os primeiros minutos de desidratação osmótica de fatias champignon ocorreu uma maior perda de massa nas amostras controle e nas que sofreram pré-tratamento químico. A estabilização da variação de massa no material ocorreu a partir dos 40 minutos de desidratação. Albuquerque Neto (2015) estudou os efeitos do tempo de operação da solução osmótica para desidratação de mandioca obtendo uma faixa de tempo ótimo de 150 a 200 min para os maiores valores da relação de desempenho da operação adotada e menores resultados de redução de atividade de água no material. MD Salim et al. (2016) observaram que nas primeiras horas de desidratação osmótica de fatias de pedúnculo de brócolis em solução de sacarose, a perda de água foi mais elevada. Entretanto, foram necessários maiores tempo de imersão e temperatura para a ocorrência mais intensa de ganho de sólidos.

- Temperatura

A temperatura é um dos parâmetros com maior influência na cinética da desidratação osmótica. A taxa de transferência de massa aumenta consideravelmente com o aumento da

temperatura. A elevação deste parâmetro provoca a diminuição da viscosidade da solução osmótica e, conseqüentemente, a rápida difusão da água do produto, além de mudanças na permeabilidade do material desidratado. O aumento da temperatura promove maiores perdas de água e de peso e maior ganho de sólidos, elevando o gradiente de pressão osmótica e a transferência de massa. Porém, a partir de um determinado valor, a elevação da temperatura pode acarretar o rompimento dos tecidos e das membranas celulares (DEEPIKA; GAYATHRI, 2015; MERCALI et al., 2010; MERCALI et al., 2011a; METHA et al., 2013; MOKHTARIAN et al., 2014; MONNERAT et al., 2010; PHISUT, 2012).

O efeito da temperatura na desidratação osmótica de cubos de cenoura foram observados por Koprivica et al. (2013). Eles constataram que o aumento da temperatura, favoreceram a perda de água e o ganho de sólidos. Esse comportamento corresponde aos obtidos por Ciurzyńska et al. (2018) e Yeomans e Yang, (2014) para a desidratação osmótica de maçãs da variedade *Braeburn* e mamão, respectivamente. Yuan et al. (2018) constataram que o aumento da temperatura provocou uma maior taxa de difusão de sacarose nas fatias de alface, mas a perda de água do material não apresentou variação significativa. Seus resultados das taxas de perda de água entre 30 e 40°C foram ligeiramente superiores aos encontrados na faixa de 20 a 30°C. MD Salim et al. (2016) observaram que a perda de água do material aumenta com a diminuição da temperatura de operação. Eles esclareceram que o aumento da temperatura provavelmente aumenta a solubilidade de sólidos em líquidos. Desta forma, a solução osmótica se torna mais diluída e menos concentrada, reduzindo a força motriz durante o processo de desidratação osmótica.

- Agitação

O processo de desidratação osmótica pode ser realizado pelo método estático ou dinâmico usando agitação (LENART; LEWICKI, 2006).

No método dinâmico, o aumento no nível de agitação promove acréscimo na taxa de desidratação osmótica. Uma condição adequada de agitação garante uma redução dos efeitos de resistência externa à transferência de massa causada pela viscosidade da solução desidratante. Desta forma, isso proporciona uma maior superfície de contato entre a solução osmótica e o produto. A agitação deve ser controlada para que não ocorram prejuízos ao produto. Esse parâmetro assegura a renovação da solução osmótica ao redor do material desidratado, impedindo a saturação do agente desidratante. Do contrário, pode acarretar o desenvolvimento de uma camada da solução osmótica em torno do produto (AKBARIAN et

al., 2014a; GHEYBI et al., 2013; GUPTA et al., 2012; RAMYA; JAIN, 2016; TONON et al., 2006).

A eficiência da agitação na desidratação osmótica de abacaxi em soluções de sacarose e em xarope de açúcar invertido foi tratada por Dionello et al. (2007). Esses autores evidenciaram que as amostras que sofreram agitação, apresentaram para a maioria dos tratamentos, maior redução de massa do que as amostras que não foram agitadas. O maior resultado de redução de massa ocorreu no ensaio com concentração de sacarose de 0,47 g/mL, a 50°C e com agitação. Eler et al. (2009) evidenciaram que o uso de diferentes graus de agitação (0,60 e 120 rpm) comprometeu intensamente a cinética de desidratação osmótica de fatias de maçã verde a diferentes temperaturas (40 e 50°C). Eles constataram que o aumento da intensidade da agitação promoveu maior perda de água. Resultados semelhantes foram relatados por Bui et al. (2009) pesquisando a desidratação osmótica de tomate. Gupta et al. (2012) constataram que o uso da agitação na desidratação osmótica de gengibre em mel reduziu a resistência de transferência de massa entre a superfície do gengibre e do mel. Desta forma, gerou aumentos na perda de água e ganho de sólidos de acordo com o tempo de imersão e a temperatura.

- Razão amostra / solução

Quando a razão entre a solução e a amostra é pequena pode ocorrer a diluição da solução desidratante na água que sai do material desidratado, reduzindo a perda de água do produto devido a ocorrência de uma gradiente com menor concentração. Entretanto, quando a relação entre a solução e a amostra é maior (1:10 a 1:60), acarreta maior perda de água e entrada de soluto (CHABBOUH et al., 2011; GHEYBI et al., 2013; SUTAR, N.; SUTAR, P. 2013). Alguns pesquisadores usaram uma relação menor entre a solução e a amostra (1: 1, 3: 1, 4: 1 ou 5: 1). O intuito foi acompanhar a transferência de massa de acordo as mudanças na concentração da solução osmótica (ALAM; ISLAM, 2013; GUPTA et al., 2012; JAIN et al., 2011; PISALKAR et al., 2011; RUIZ-LOPEZ et al., 2010; SAKHALE; PAWAR, 2011).

O parâmetro de avaliação fruta/solução foi investigado por Mendes et al. (2013) na desidratação osmótica de laranja com diferentes proporções, tempos e concentrações de sacarose. Eles evidenciaram que a utilização de elevadas razões de solução osmótica, diminuiu o efeito da diluição da solução, aumentando a eficiência da desidratação. O ensaio com relação fruta: solução 1:3, tempo de 90 min a 60° Brix, apresentou os melhores valores para redução de massa e perda de água. Manivannan e Rajasimman (2011) relataram que o

acrécimo da relação entre a solução e o material de 5 para 1 e 25 para 1, conduziu ao aumento da perda de água, redução de sólidos e redução de peso do produto desidratado na desidratação osmótica de beterraba em solução de sacarose. Esses resultados estão de acordo com os analisados por Campos et al. (2012). Eles averiguaram que nos experimentos com maior relação entre a fruta e a solução, a perda de umidade obteve maior valor para a desidratação osmótica de carambolas em fatias.

- Tamanho e geometria da amostra

As formas mais utilizadas das amostras no processo osmótico são: fatias, cubos, metades de frutos e cilindros. A geometria definida no processo de desidratação influencia a transferência de massa devido as variações de área, volume e comprimento do produto. Essas variações geométricas influenciam no caminho e na velocidade da taxa de difusão da água e do soluto (TORTOE, 2010; VASCONCELOS, 2010).

A influencia da geometria das partículas na desidratação osmótica de tomates verdes com solução de NaCl a diferentes condições de temperatura, concentração de soluto e tempo foi avaliada por Silva Júnior et al. (2010). Eles constataram que o material desidratado na forma cilíndrica obteve maiores valores de perda de umidade, incorporação de sólidos e índice de eficiência de desidratação. Siqueira (2014) estudou a desidratação osmótica de gengibre nas geometrias cúbicas e placa plana (fatias). Ele constatou que a maior perda de umidade (PU) (75,94%) foi obtida no ensaio realizado na forma fatiada à temperatura 50°C, concentração da solução 50 °Brix, tempo de imersão 4 horas, concentração de NaCl 3%, forma geométrica fatiada, com cobertura e com agitação. Ele afirma que o corte na forma geométrica fatiada teve maior influência na perda de umidade do que o corte na forma cúbica.

O tamanho da amostra foi estudado por Souza et al. (2012) na desidratação osmótica de abacate em forma de paralelepípedo, com diferentes temperaturas, espessuras das amostras e concentrações de sacarose. Eles verificaram que a espessura do material foi o parâmetro que mais influenciou o processo em relação às respostas de ganho de sólidos, perda de água e relação entre o ganho de sólidos e a perda de água. O tratamento que apresentou a maior perda de água e o menor ganho de sólidos foi realizado nas condições de menor concentração de açúcar (30%), maior temperatura (45°C) e menor espessura (0,5cm).

Durante o processo de desidratação osmótica, o grau de permeabilidade da membrana do material pode mudar parcialmente ou totalmente, gerando alterações na sua geometria. A perda de água durante o processo osmótico resulta no encolhimento da célula, devido a

diminuição do contato entre a membrana celular e a parede celular (BELLARY; RASTOGI, 2012). A porosidade da matéria-prima tem um efeito significativo sobre os fenômenos de encolhimento, taxas de transferências de massa e reidratação (BEKELE; RAMASWAMY, 2010).

2.2.1.3 Cinética de desidratação osmótica

O processo de desidratação osmótica pode ser marcado pela sucessão de três períodos: dinâmico, pseudo-equilíbrio e de equilíbrio. No dinâmico, a velocidade de transferência de massa é elevada ou diminuída até atingir o pseudo-equilíbrio. Este período dura de 24 a 48 h dependendo das condições das variáveis que controlam o processo. Nesta fase, a composição entre a fase líquida do alimento e a água presente na solução osmótica entra em equilíbrio. O período do equilíbrio ocorre quando os equilíbrios químicos e físicos são atingidos e não ocorrem mais mudanças na composição e massa da amostra. É caracterizado como a fase final do processo de desidratação osmótica (BARAT et al., 1998; LI; RAMASWAMY, 2010). Neste período, após um tempo longo de processo, a perda de umidade e o ganho de sólidos cessam e a força motriz para perda de massa entre o material desidratado e a solução osmótica torna-se nula (TOGRUL; ISPIR, 2008). Sendo assim, de acordo com diversos autores tais como: Abraão et al. (2013), Duarte et al. (2012), Eroglu e Yildiz (2010), Freitas et al. (2011), Mimura et al. (2014), Souza et al. (2012) e Zuñiga e Pedreschini (2012), a cinética de desidratação osmótica pode ser estudada pelos cálculos dos percentuais de Perda de umidade (PU), Perda de massa (PM), Ganho de sólidos totais (GST), Redução de atividade de água (RA_w), Incorporações de cloreto de sódio e de sacarose. Tais parâmetros do processo podem ser obtidos através das seguintes equações:

$$PU (\%) = \left[\frac{(x_i \cdot m_i) - (x_f \cdot m_f)}{(m_i)} \right]_{amostras} \cdot 100 \quad (2.1)$$

onde x_i = teor de umidade da amostra *in natura* em base úmida (%), m_i = massa da amostra *in natura* (g), x_f = teor de umidade da amostra desidratada em base úmida (%), e m_f = massa da amostra desidratada (g).

$$PM (\%) = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right)_{amostras} \cdot 100 \quad (2.2)$$

onde m_i = massa da amostra *in natura* (g) e m_f = massa da amostra desidratada (g).

$$\text{GST (\%)} = \left\{ \frac{[(m_f) \cdot (1-x_f)] - [(m_i) \cdot (1-x_i)]}{(m_i)} \right\}_{\text{amostras}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

onde m_f = massa da amostra desidratada (g), x_f = teor de umidade da amostra desidratada em base úmida (%), m_i = massa da amostra *in natura* (g), e x_i = teor de umidade da amostra *in natura* em base úmida (%).

$$\text{RA}_w (\%) = \left[\frac{(A_{w_i} \cdot m_i) - (A_{w_f} \cdot m_f)}{(m_i)} \right]_{\text{amostras}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

onde A_{w_i} = teor de atividade de água da amostra *in natura*, m_i = massa da amostra *in natura* (g), A_{w_f} = teor de atividade de água da amostra desidratada, e m_f = massa da amostra desidratada (g).

$$\text{I}_{\text{NaCl}} = \left[\frac{(C_{\text{NaCl}_f} \cdot m_f) - (C_{\text{NaCl}_i} \cdot m_i)}{(m_i)} \right]_{\text{amostras}} \quad (2.5)$$

onde C_{NaCl_f} = concentração de cloreto de sódio da amostra desidratada (%), m_f = massa da amostra desidratada (g), C_{NaCl_i} = concentração de cloreto de sódio da amostra *in natura* (%), e m_i = massa da amostra *in natura* (g).

$$\text{I}_{\text{Sac}} = \left[\frac{(C_{\text{Sac}_f} \cdot m_f) - (C_{\text{Sac}_i} \cdot m_i)}{(m_i)} \right]_{\text{amostras}} \quad (2.6)$$

onde C_{Sac_f} = concentração de sacarose da amostra desidratada (%), m_f = massa da amostra desidratada (g), C_{Sac_i} = concentração de sacarose da amostra *in natura* (%), e m_i = massa da amostra *in natura* (g).

O estudo do equilíbrio do processo de desidratação osmótica é essencial para entender os mecanismos de transferência de massa que fazem parte desse processo. A difusão é um

processo de condução que ocorre nas moléculas. O soluto é transportado através de movimentos aleatórios das zonas de concentração mais elevada para zonas menos elevadas, devido a diferença de potencial químico das espécies. Esse fenômeno ocorre mais facilmente em gases, líquidos e sólidos, respectivamente, porque é influenciado pelo espaçamento molecular (LUCHESE, 2013).

A difusão nos fenômenos relacionados com alimentos pode ser representada pela Segunda Lei de Fick para o estado transiente. Esta lei pode ser aplicada em sólidos com geometrias diversas, permitindo a estimativa da difusividade mássica efetiva de água e dos solutos (ANDRADE et al., 2007; HERMAN-LARA et al., 2013; MECRCALI et al., 2011a). Vários autores tais como: Brochier et al. (2015), Goula e Lazarides (2012), Lazou et al. (2016), Porciuncula et al. (2013), Rodriguez et al. (2013), Segui et al. (2012), Silva et al. (2012b) e Souraki et al. (2012) descreveram a cinética de desidratação osmótica através desse modelo, cuja equação pode ser escrita da seguinte forma:

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

onde M = teor de umidade (em base seca) em um volume infinitesimal no instante t , D_{ef} = difusividade efetiva de massa (m^2/s), e t = é o tempo (s).

As equações publicadas para a desidratação osmótica até o presente momento são altamente complexas e exclusivas para certas configurações geométricas (placa, cilindro, esfera). Azuara et al. (1992) desenvolveram um modelo empírico que pode ser utilizado para diferentes geometrias (sem restrição geométrica) inclusive cubo, a partir de um balanço de massa, capaz de prever a cinética de desidratação osmótica e a determinação do ponto final de equilíbrio. Os processos podem ser realizados em pequenos intervalos de tempo, pois o modelo não necessita que o ponto de equilíbrio seja de fato alcançado para a predição do parâmetro de transporte mássico. Diversos autores aplicaram este modelo, tais como: Arias et al. (2017), Assis et al. (2017), Hamedi et al. (2018), Azarpazhooh e Ramaswamy (2012) e Zúñiga e Pedreschi (2011).

Partindo de um balanço de massa no material que sofre desidratação, chega-se a seguintes equações para perda de umidade, ganho de sólidos totais e incorporações de cloreto de sódio e sacarose:

$$PU = \frac{S_{PU}t(PU_{\infty})}{1 + S_{PU}t} \quad (2.8)$$

$$GS = \frac{S_{GS}t(GS_{\infty})}{1 + S_{GS}t} \quad (2.9)$$

$$INaCl = \frac{S_{INaCl}t(INaCl_{\infty})}{1 + S_{INaCl}t} \quad (2.10)$$

$$ISac = \frac{S_{ISac}t(ISac_{\infty})}{1 + S_{ISac}t} \quad (2.11)$$

onde PU_{∞} = perda de umidade no equilíbrio (%), GS_{∞} = ganho de sólidos totais no equilíbrio (%), $INaCl_{\infty}$ = incorporação de cloreto de sódio no equilíbrio (%), $ISac_{\infty}$ = incorporação de sacarose no equilíbrio (%), t = tempo (s), S_{PU} , S_{GS} , S_{INaCl} , S_{Sac} são constantes em (s^{-1}) das Equações 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11 relacionadas com a perda de umidade percentual (PU), ganho de sólidos totais percentual (GS), incorporação de cloreto de sódio percentual ($INaCl$) e incorporação de sacarose percentual ($ISac$), obtidas através das seguintes regressões lineares:

$$\frac{t}{PU} = \frac{1}{S_{PU} PU_{\infty}} + \frac{t}{PU_{\infty}} \quad (2.12)$$

$$\frac{t}{GS} = \frac{1}{S_{GS} GS_{\infty}} + \frac{t}{GS_{\infty}} \quad (2.13)$$

$$\frac{t}{INaCl} = \frac{1}{S_{INaCl} INaCl_{\infty}} + \frac{t}{INaCl_{\infty}} \quad (2.14)$$

$$\frac{t}{ISac} = \frac{1}{S_{ISac} ISac_{\infty}} + \frac{t}{ISac_{\infty}} \quad (2.15)$$

No início do processo de desidratação osmótica as taxas de transferência de massa são maiores, desta forma é frequente a utilização de versões simplificadas da equação de difusão de Fick, considerando um pequeno tempo de tratamento, regime transiente, difusão em um meio semi-infinito, concentração da solução osmótica constante e resistência externa à

transferência de massa desprezível. Crank (1975) apresenta uma equação simplificada para o modelo físico-matemático de Fick baseado em tais considerações, sendo essas:

$$\frac{PU_{exp}}{PU_{\infty}} = 2 \left(\frac{D_{efU}t}{\pi L^2} \right)^{1/2} \quad (2.16)$$

$$\frac{GS_{exp}}{GS_{\infty}} = 2 \left(\frac{D_{efS}t}{\pi L^2} \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

$$\frac{INaCl_{exp}}{INaCl_{\infty}} = 2 \left(\frac{D_{efINaCl}t}{\pi L^2} \right)^{1/2} \quad (2.18)$$

$$\frac{ISac_{exp}}{ISac_{\infty}} = 2 \left(\frac{D_{efISac}t}{\pi L^2} \right)^{1/2} \quad (2.19)$$

onde PU_{exp} = perda de umidade no tempo (%), GS_{exp} = ganho de sólidos totais no tempo (%), $INaCl_{exp}$ = incorporação de cloreto de sódio no tempo (%), $ISac_{exp}$ = incorporação de sacarose no tempo (%), D_{efU} = difusividade efetiva para o transporte de umidade (m^2/s), D_{efS} = difusividade efetiva para o transporte de sólidos totais (m^2/s), $D_{efINaCl}$ = difusividade efetiva para o transporte de cloreto de sódio (m^2/s), D_{efISac} = difusividade efetiva para o transporte de sacarose (m^2/s), L = dimensão característica (m), e t = tempo (s).

As Equações 2.16, 2.17, 2.18 e 2.19 propõem que os adimensionais de umidade, sólidos, cloreto de sódio e sacarose saindo do alimento, são diretamente proporcionais à raiz quadrada do tempo, onde o valor do D_{ef} calculado é a difusividade mássica média para faixa de estudo das concentrações durante o processo difusional.

Relacionando as Equações 2.16 a 2,19 com os modelos propostos pelas equações 2.8 a 2.11 respectivamente, obtêm-se quatro expressões simples para calcular as difusividades efetivas de umidade e de sólidos em tempos diferentes:

$$\left(D_{efU} \right)_t = \frac{\pi t}{4} \left[\left(\frac{S_{PU}L}{1+S_{PU}t} \right) \cdot \left(\frac{PU_{\infty}^{mod}}{PU_{\infty}^{exp}} \right) \right]^2 \quad (2.20)$$

$$\left(D_{ef_S}\right)_t = \frac{\pi t}{4} \left[\left(\frac{S_{GSL}}{I+S_{GSt}} \right) \cdot \left(\frac{GS_{\infty}^{mod}}{GS_{\infty}^{exp}} \right) \right]^2 \quad (2.21)$$

$$\left(D_{ef_{INaCl}}\right)_t = \frac{\pi t}{4} \left[\left(\frac{S_{INaClL}}{I+S_{INaCl}t} \right) \cdot \left(\frac{INaCl_{\infty}^{mod}}{INaCl_{\infty}^{exp}} \right) \right]^2 \quad (2.22)$$

$$\left(D_{ef_{ISac}}\right)_t = \frac{\pi t}{4} \left[\left(\frac{S_{ISacL}}{I+S_{Sact}t} \right) \cdot \left(\frac{ISac_{\infty}^{mod}}{ISac_{\infty}^{exp}} \right) \right]^2 \quad (2.23)$$

onde PU_{∞}^{mod} = valor de perda de umidade no equilíbrio (%) obtido pela Equação 2.12, PU_{∞}^{exp} = valor de perda de umidade no equilíbrio obtido experimentalmente (%), GS_{∞}^{mod} = valor de ganho de sólidos totais no equilíbrio (%) obtido pela Equação 2.13, GS_{∞}^{exp} = valor do ganho de sólidos totais no equilíbrio obtido experimentalmente (%), $INaCl_{\infty}^{mod}$ = valor de incorporação de cloreto de sódio no equilíbrio (%) obtido pela Equação 2.14, $INaCl_{\infty}^{exp}$ = valor de incorporação de cloreto de sódio obtido experimentalmente (%), $ISac_{\infty}^{mod}$ = valor de incorporação de sacarose no equilíbrio (%) obtido pela Equação 2.15, $ISac_{\infty}^{exp}$ = valor de incorporação de sacarose obtido experimentalmente (%).

No caso de $PU_{\infty}^{experimental}$, $GS_{\infty}^{experimental}$, $INaCl_{\infty}^{experimental}$ e $ISac_{\infty}^{experimental}$, serem desconhecidos, deve-se assumir que seus valores sejam iguais a PU_{∞}^{modelo} , GS_{∞}^{modelo} , $INaCl_{\infty}^{modelo}$ e $ISac_{\infty}^{modelo}$.

Rearranjando as Equações 2.16 a 2.19 para uma geometria cúbica, considerando a dimensão característica como sendo a aresta do cubo, e substituindo-as nas Equações 2.8 a 2.11, respectivamente, obtêm-se as Equações 2.24, 2.25, 2.26 e 2.27.

$$D_{ef_U} = \frac{\pi}{4t^{\frac{2}{3}}} \left[\left(\frac{S_{PUL^3}}{I+S_{PU}t} \right) \cdot \left(\frac{PU_{\infty}^{mod}}{PU_{\infty}^{exp}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2.24)$$

$$D_{ef_S} = \frac{\pi}{4t^{\frac{2}{3}}} \left[\left(\frac{S_{GSL^3}}{I+S_{GSt}} \right) \cdot \left(\frac{GS_{\infty}^{mod}}{GS_{\infty}^{exp}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2.25)$$

$$D_{ef_{INaCl}} = \frac{\pi}{4t^{\frac{1}{3}}} \left[\left(\frac{S_{INaCl} L^3}{1 + S_{INaCl} t} \right) \cdot \left(\frac{INaCl_{\infty}^{mod}}{INaCl_{\infty}^{exp}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2.26)$$

$$D_{ef_{ISac}} = \frac{\pi}{4t^{\frac{1}{3}}} \left[\left(\frac{S_{ISac} L^3}{1 + S_{ISac} t} \right) \cdot \left(\frac{ISac_{\infty}^{mod}}{ISac_{\infty}^{exp}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2.27)$$

onde PU_{∞}^{mod} = valor de perda de umidade no equilíbrio(%) obtido pela Equação 2.12, PU_{∞}^{exp} = valor de perda de umidade no equilíbrio obtido experimentalmente (%), GS_{∞}^{mod} = valor de ganho de sólidos totais no equilíbrio(%) obtido pela Equação 2.13, GS_{∞}^{exp} = valor do ganho de sólidos totais no equilíbrio obtido experimentalmente (%), $INaCl_{\infty}^{mod}$ = valor de incorporação de cloreto de sódio no equilíbrio (%) obtido pela Equação 2.14, $INaCl_{\infty}^{exp}$ = valor de incorporação de cloreto de sódio obtido no equilíbrio experimentalmente (%), $ISac_{\infty}^{mod}$ = valor de incorporação de sacarose no equilíbrio (%) obtido pela Equação 2.15, $ISac_{\infty}^{exp}$ = valor de incorporação de sacarose obtido no equilíbrio experimentalmente (%).

Assim, a difusividade efetiva média geral da desidratação osmótica para o transporte de materiais (saída de água, entrada de sólidos totais, cloreto de sódio e sacarose) através do cubo de mandioca pode ser calculada através da Equação 2.28.

$$\overline{D_{ef}} = \frac{\sum_{i=1}^n (D_{ef})_i}{N} \quad (2.28)$$

onde $\overline{D_{ef}}$ = Difusividade efetiva média no tempo t (m²/s), D_{ef} = difusividades efetivas para cada tempo (m²/s), e N = número de dados utilizados.

2.2.2 Secagem convectiva

A secagem é um processo no qual ocorre a retirada de umidade de um material biológico através da evaporação ou sublimação, quando este é submetido a aplicação de calor sob condições controladas. O processo com transporte simultâneo de calor e massa tem como principal objetivo a redução da atividade de água e do crescimento microbiano, prolongando a vida de prateleira do alimento. Nessa operação o calor é fornecido ao material úmido, vaporizando parte de sua umidade. Essa massa de água é removida na forma de vapor,

geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido que atua com um sorvedor de umidade, obtendo-se um produto sólido seco (FELLOWS, 2006; GONELI et al., 2014; ISQUIERDO et al., 2013; PARK et al., 2014).

A transferência de massa nos materiais capilares porosos pode ser explicada através de alguns mecanismos físicos e parâmetros propostos na literatura (BROOKER et al., 1992; FORTES; OKOS, 1980; STRUMILLO; KUDRA, 1986):

- Transporte por difusão líquida devido a gradientes de concentração de umidade;
- Transporte por difusão de vapor devido a gradientes de concentração de umidade e de pressão parcial do vapor (causadas por gradientes de temperatura);
- Transporte de líquido por pressão osmótica;
- Transporte de líquido e de vapor, devido a diferença de pressão total, causada por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade;
- Transporte por difusão superficial.

Os parâmetros que dirigem a velocidade dos mecanismos de transferência descritos determinam a taxa de secagem. Estes parâmetros são: pressão de vapor do material e do ar de secagem, temperatura e velocidade do ar, velocidade de difusão da água no material, espessura e superfície exposta para secagem (SANTOS et al., 2012).

2.2.2.1 Cinética de secagem convectiva

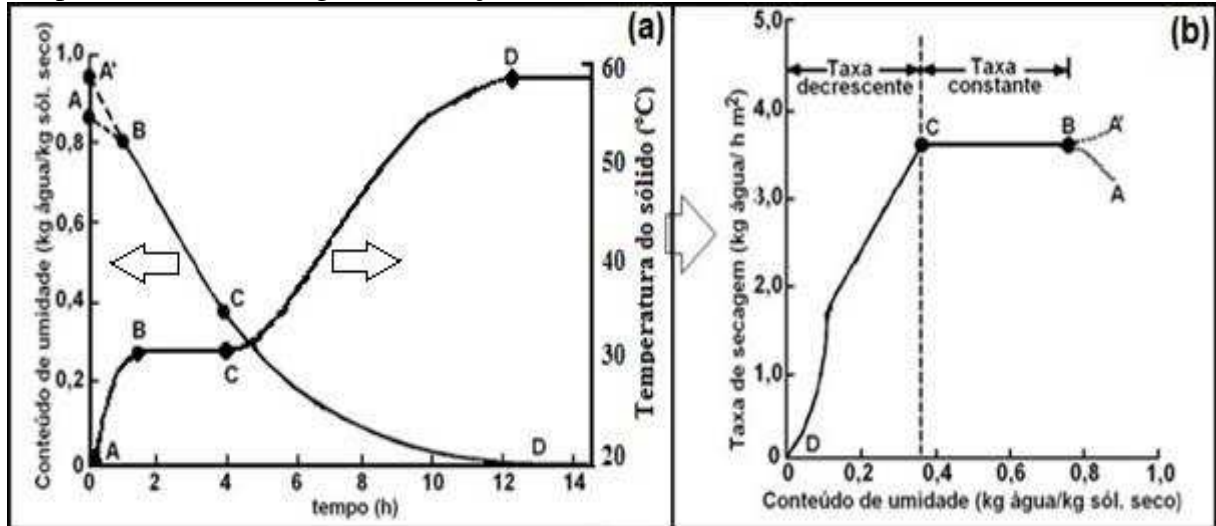
O estudo da cinética de secagem é fundamental na otimização do processo de secagem (FERREIRA et al., 2012; GONELI et al., 2014; LEITE et al., 2015; RESENDE et al., 2010). Ela pode ser estudada através da obtenção dos dados de umidade da amostra ao longo do tempo de processo. Demonstra-se que, dentre as variáveis mais importantes para a cinética de secagem, estão a temperatura e a velocidade de ar utilizadas (BORGES et al., 2010; SANJINEZ-ARGANDOÑA et al., 2011; SANTOS et al., 2010; VILHALVA et al., 2012).

O processo de transferência de massa está dividido em três períodos distintos de migração de umidade do material para a corrente de ar do meio: período de indução, período de taxa constante e período de taxa decrescente de secagem. A Figura 2.4 apresenta as principais curvas de secagem com seus respectivos períodos de cinética de secagem.

Os segmentos apresentados na Figura 2.4 estão relacionados aos períodos da cinética de secagem a seguir. A curva exponencial decrescente da Figura 2.4a descreve a relação do teor

de umidade com o tempo de secagem e a curva de característica sigmoidal crescente representa o comportamento da temperatura do sólido com o tempo de operação.

Figura 2.4– Curvas de secagem: (a) Teor de umidade e temperatura do sólido em relação ao tempo; (b) Taxa de secagem em relação ao teor de umidade do material.



Fonte: adaptado de Park et al. (2014).

- Período de indução: intervalo A-B ou A'-B

No início do processo, o produto pode estar mais frio do que o ar de secagem (intervalo A-B da curva exponencial decrescente da Figura 2.4 (a) e a pressão de vapor de água na superfície do produto é baixa, fazendo com que a transferência de massa e a velocidade de secagem também se tornem baixas. A medida que o ar quente entra em contato com o produto, a temperatura desse aumenta ocorrendo um aumento na pressão de vapor de água e na velocidade de secagem. Este fenômeno continua até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa (BRANDINI et al., 2014). Em contrapartida, o segmento A'-B dessa curva representa o resfriamento de um sólido que está a uma temperatura superior a da corrente de ar. O material pode ceder uma maior e mais acentuada quantidade de umidade a corrente gasosa em relação a situação do segmento A-B.

- Período de taxa constante: intervalo B-C

Neste período, a quantidade de água no interior do sólido é abundante. Neste caso, a água evapora como se estivesse em um reservatório aberto, sem haver influência direta do sólido na taxa de secagem. A pressão de vapor d'água na superfície é constante e igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A temperatura do produto, por sua

vez, é também constante e igual à temperatura de bulbo úmido, característica do fato de que as transferências de calor e de massa se compensam exatamente. Desta forma, a velocidade de secagem é constante. Este período continua, enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície (EL-AOUAR, 2005; BRANDINI et al., 2014).

- Período de taxa decrescente: intervalo C-D

Esse período começa a partir do momento que a quantidade de água se torna deficiente na superfície do sólido. A transferência de calor não é mais compensada pela transferência de massa, desta forma, a velocidade de secagem diminui e a temperatura do sólido aumenta, tendendo à temperatura do ar de secagem. Em todo o período a migração interna de água é o fator limitante. O período finaliza quando o produto entra em equilíbrio com o ar de secagem e a velocidade de secagem é nula (BRANDINI et al., 2014).

Os estudos da transferência de calor e massa permitem a determinação da taxa de secagem nessas diferentes etapas de operação. Os métodos para se calcular a taxa de secagem são diferentes no que diz respeito ao período de velocidade ou a taxa constante ou decrescente de secagem. Este último, na maioria das vezes observado, é o predominante para a secagem de produtos vegetais. No período de taxa decrescente, as análises são baseadas nas transferências internas que governam a secagem (BRANDINI et al., 2014). A taxa de secagem pode ser calculada pelas equações de transferência de calor e de massa, sendo consideradas variações nas condições externas nos dois casos. Em produtos agrícolas e alimentícios a teoria da difusão líquida é a mais adequada para o estudo do mecanismo de transferência de massa, uma vez que na etapa final da secagem, o transporte de massa interno por difusão é o predominante. Os modelos matemáticos que descrevem os processos de secagem se fundamentam na teoria da difusão líquida de água baseada na lei de Fick. Ela expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (SANJINEZ-ARGANDOÑA, 2005; BRANDINI et al., 2014). A lei de Fick para a difusão de água líquida tem sido utilizada por diversos autores com o objetivo de se estimar o tempo médio de secagem durante o primeiro período de velocidade decrescente (GONELI et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2015; PEREZ et al., 2013; SILVA et al., 2014).

Considerando um sistema de coordenadas cartesianas (eixos x , y e z), a equação de difusão pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{ef} \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ef} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ef} \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (2.29)$$

onde $\frac{\partial M}{\partial t}$ = taxa mássica de material (kg água/kg ms.s⁻¹), D_{ef} = difusividade efetiva de material (m²/s), e $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial M}{\partial x} \right)$, $\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)$, $\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial M}{\partial z} \right)$ = correntes mássicas nas coordenadas espaciais (kg água /kg ms.m⁻²).

Crank (1975) apresentou diferentes soluções analíticas para a equação de difusão, considerando diferentes condições iniciais e de contorno. Estas soluções se aplicam aos materiais com geometrias bem definidas (placas, cilindros, esferas) e corpos semi-infinitos. Ele analisou os casos considerando a difusividade mássica constante ou variando linearmente com a concentração de umidade.

Para a determinação da difusividade efetiva de umidade de um material durante determinada condição de secagem é necessário o conhecimento da umidade de equilíbrio em tais condições. Geralmente a umidade de equilíbrio do material é determinada através de técnicas experimentais de isotermas de dessorção.

2.2.3 Atividade de água

As deteriorações nos alimentos causadas por microrganismos, assim como as alterações químicas e enzimáticas são decorrentes do teor de água nos mesmos. A água no alimento se encontra na forma livre ou ligada. Quando livre, age como solvente para sais e açúcares, facilitando as reações químicas e o crescimento microbiano. Ela se encontra nos espaços intergranulares e nos poros dos alimentos sendo denominada de atividade de água. Ela é um indicador muito importante para indústria de alimentos, pois possibilita a previsão da estabilidade dos mesmos, uma vez que quantifica a água disponível para o crescimento microbiano e as reações químicas que alteram o alimento. As reações químicas que dependem do teor de atividade de água no alimento são: inativação de enzimas, destruição de microrganismos, reação de Maillard, gelatinização do amido e desnaturação de proteínas durante o cozimento. A velocidade de tais reações é afetada pelo teor de atividade de água presente no alimento. Quando ligada, a água está associada com outros grupos químicos, como amido, celulose e proteína, sendo indisponível para reações químicas ou para atuar como solvente (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007; BENELLI et al., 2015; CELESTINO, 2010). A atividade de água (A_w) pode ser definida como a razão entre a pressão de vapor da

água no alimento (P_V') e a pressão de vapor da água pura (P_V) na mesma temperatura, conforme a Equação 2.30 (FELLOWS, 2006):

$$A_w = \frac{P_V'}{P_V} \quad (2.30)$$

onde P_V' : pressão do vapor de água no alimento (N/m²) e P_V : pressão do vapor de água pura na mesma temperatura (N/m²).

Alguns alimentos são instáveis microbiologicamente, mesmo possuindo baixo teor de umidade. Desta forma, apenas a análise do teor de umidade de um alimento não é satisfatória para prevê sua estabilidade. É interessante que se faça uma análise conjunta do teor de umidade e de atividade de água no alimento, avaliando assim, a disponibilidade de água no mesmo (FELLOWS, 2006; MUJUMDAR, 2007).

Cada microrganismo possui uma atividade de água máxima, ótima e mínima para seu melhor desenvolvimento e crescimento (TOLDRÁ, 2014). A Tabela 2.2 apresenta os valores mínimos de atividade de água para o desenvolvimento dos principais microrganismos patogênicos que podem estar presentes na maioria dos alimentos destinados ao consumo humano, de materiais comercializados e consumidos *in natura* à processados.

Tabela 2.2–Valores mínimos de atividade de água para o desenvolvimento de alguns microrganismos patogênicos

Patógeno	A_w
<i>Campylobacter jejuni</i>	0,990
<i>Aeromonas hydrophila</i>	0,970
<i>Clostridium botulinum</i> tipo E	0,970
<i>Shigella spp</i>	0,960
<i>Yersinia enterocolítica</i>	0,960
<i>Clostridium botulinum</i> tipo G	0,965
<i>Clostridium botulinum</i> tipo A, B	0,945
<i>Clostridium perfringens</i>	0,950
<i>Vibrio parahemolyticus</i>	0,940
<i>Cloreto de sódiononella spp</i>	0,940
<i>Escherichia coli</i>	0,935
<i>Listeria monocytogenes</i>	0,930
<i>Bacillus cereus</i>	0,930
<i>Bacillus subtilis</i>	0,910
<i>Staphylococcus aureus</i> (anaeróbio)	0,900
<i>Staphylococcus aureus</i> (aeróbio)	0,600

Fonte: Torrezan (1996).

Pode-se notar na Tabela 2.2 que quanto menor a atividade de água do material, menor é a atividade microbiana presente no mesmo. Alimentos com valores de atividade de água menores que 0,6 apresentam uma considerável inibição de crescimento de microrganismos patogênicos e indicadores de contaminação. Metta et al. (2012) mencionaram que microrganismos não crescem em alimentos com atividade de água abaixo de 0,600, porém, a redução da atividade de água apenas evita o desenvolvimento microbiano.

O objetivo da desidratação osmótica é uma redução da atividade de água. No entanto, tal processo não é apropriado para diminuir a atividade de água do alimento a teores que dispensem técnicas adicionais para conservação do mesmo. Muitos autores relatam que os valores alcançados de atividade de água do alimento submetido à desidratação osmótica não garantem a estabilidade microbiológica e bioquímica do mesmo. Desta forma, esta técnica não deve ser utilizada como tratamento único, sendo necessários outros métodos de conservação para complementá-la, como a secagem convectiva, assegurando que seja atingido um valor de atividade de água que garanta a estabilidade do alimento durante o armazenamento (BROCHIER et al., 2015; EGEEA et al., 2012a; EGEEA et al., 2012b; PEREZ et al., 2013). Contrariando essa teoria, Martins et al. (2008), desidratando pseudofrutos de caju-do-cerrado alcançaram uma determinada estabilidade microbiológica do seu material ($A_w < 0,600$) apenas utilizando a desidratação osmótica. Brochier et al. (2015) encontraram valores de atividade de água iguais a 0,740 para o produto obtido na desidratação osmótica de Yacom em soluções de gliclerol e sorbitol a 50°C. No entanto, esse valor de atividade de água é considerado intermediário, de acordo Vermeulen et al. (2014). Tais autores relatam que alimentos com umidade intermediária são microbiologicamente estáveis e apresentam teores de 15 – 50% de umidade, embora não haja consenso sobre a faixa de atividade de água em alimentos com umidade intermediária. Lazou et al. (2016) estudaram a desidratação osmótica de abóbora em soluções de sacarose à diferentes temperaturas, tempos e concentrações de solução, seguida de secagem. Eles observaram que a atividade da água do produto final, após a desidratação osmótica e secagem convectiva, apresentou um valor de 0,663, correspondendo a um produto estável.

2.2.4 Isotermas de sorção de equilíbrio

Quando os vegetais são expostos a determinadas condições atmosféricas, ocorre um fenômeno de transferência de massa, cedendo ou absorvendo umidade, tendendo a uma relação de equilíbrio entre o teor de umidade do produto e a umidade do ambiente. O teor de

umidade de equilíbrio é obtido, a partir do momento em que a pressão parcial de vapor de água no produto iguala-se a do ar, do meio que o envolve. O conhecimento da umidade de equilíbrio é um parâmetro utilizado para modelagem numérica de transferência de calor e massa no processo de secagem. Este equilíbrio termodinâmico é representado pelas isotermas de equilíbrio de sorção (CORRÊA et al., 2014).

Isotermas de sorção são curvas de equilíbrio higroscópico que expressam a relação entre a umidade de equilíbrio do material e a atividade de água do mesmo, medidas a temperatura e pressão constante (CORRÊA et al., 2014; COSTA et al., 2015). Através dessas curvas, é possível saber o teor de umidade final do produto necessário para estabilizá-lo, denominado de umidade da monocamada. Com tais informações solucionam-se os problemas no seu armazenamento e a preservação de sua qualidade, reduzindo a possibilidade de desenvolvimento de fungos e outros patógenos. As isotermas podem ser utilizadas para definir os limites de secagem desse material, predizendo o seu tempo de vida de prateleira e o uso de embalagens adequadas para o mesmo (CORRÊA et al., 2014; HENAO et al., 2009; NOSHAD et al., 2013).

As isotermas de equilíbrio podem ser obtidas experimentalmente através de métodos gravimétricos, onde são mantidas constantes a atividade de água e a temperatura do ar até que a umidade do material atinja o valor de equilíbrio. No método gravimétrico dinâmico o ar permanece circulando e no método gravimétrico estático o ar fica estagnado. Este último é mais vantajoso do ponto de vista termodinâmico, pois obtêm-se condições constantes com maior facilidade e possibilita o uso de soluções ácidas ou soluções salinas saturadas. (GARCIA; MARTÍNEZ, 2006).

Vários modelos matemáticos têm sido indicados para descrever o comportamento das isotermas de sorção de alimentos. Não existe uma equação geral que descreva o comportamento das diversas isotermas apresentadas pelos alimentos. Pois o valor de atividade de água depende da composição química do alimento e da interação de seus componentes com a água em condições de equilíbrio termodinâmico. Os modelos matemáticos possibilitam a determinação das isotermas de sorção, mesmo com poucos pontos experimentais, nas quais podem ser realizadas extrapolações matemáticas, alcançando pontos nas regiões de baixa ou elevada atividade de água (OLIVEIRA, et al., 2014).

Van Den Berg e Bruin (1981) reuniram e classificaram 77 equações de isotermas de estudos com diferentes materiais. As equações de isotermas mais conhecidas para alimentos são BET geral, GAB, Oswin, Peleg, Copace, Smith e Chung-Pfost. As equações de Oswin, Peleg, Copace, Smith e Chung-Pfost são modelos empíricos e não possuem significado físico.

Os modelos de BET geral e GAB, apresentados pelas Equações 2.31 e 2.32, respectivamente, apresentam ajustes satisfatórios para representar as isotermas de sorção de produtos alimentícios fibrosos com consideráveis teores de umidade (superiores a 50% em peso em base úmida). Através destes modelos, é possível obter valores da umidade da monocamada, resultando assim em melhores informações da estrutura física dos materiais quando comparados com outras correlações empíricas citadas pela literatura (MOREIRA et al., 2008).

$$X_e = \frac{(X_m \cdot C \cdot UR) \cdot [1 - (n+1) \cdot UR^n + n \cdot U \cdot R^{n+1}]}{(1-UR) \cdot [1 + (C_B - 1) \cdot UR - C \cdot UR^{n+1}]} \quad (2.31)$$

$$X_e = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot UR}{(1-K \cdot UR) \cdot (1-K \cdot UR + C \cdot K \cdot UR)} \quad (2.32)$$

onde X_e = umidade de equilíbrio do material (g água/g sólido seco), X_m = umidade da monocamada do material (g água/g de sólido seco), UR = a umidade relativa do ar, C , e K , são parâmetros de ajuste.

A literatura relata que o modelo de GAB se ajusta bem as isotermas de produtos a base de mandioca. Esse modelo mostrou-se altamente eficiente na predição das isotermas de adsorção e dessorção das farinhas de mandioca dos grupos seca e d'água em toda a faixa de atividade de água estudada (CHISTÉ, et al., 2015). Esses resultados concordam com o comportamento encontrado por Ayala-Ponte (2012) na estimativa das isotermas de adsorção e do calor isostérico em farinha de mandioca, com os relatos de Navia et al. (2011) na pesquisa de isotermas de adsorção de farinha de mandioca bioplásticos moldadas por compressão e de Betiol (2016) no estudo das isotermas de adsorção do bagaço de mandioca proveniente da indústria de fécula. Mello e Mali (2014) informam que o ajuste do modelo de GAB às isotermas de sorção de bandejas de espuma de amido de mandioca com bagaço de malte e glicerol apresentaram valores de coeficientes de determinação iguais a 0,99.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Matéria-prima

Os ensaios experimentais foram realizados com a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz.) adquiridas no mercado local da cidade de João Pessoa, PB. Os vegetais foram adquiridos de um único produtor e padronizados, segundo sua ausência de defeitos nas cascas e maturação. Foram escolhidas raízes inteiras apresentando 5 a 6 cm de diâmetro e de 30 a 40 cm de comprimento. A Figura 3.1 apresenta uma fotografia da matéria prima utilizada nesse estudo.

Figura 3.1 – Mandioca *in natura*



Fonte: o próprio autor (2017).

3.1.2 Agentes desidratantes e preparo das soluções aquosas

Os agentes desidratantes utilizados como solutos foram a sacarose comercial (açúcar triturado sem enxofre, marca Alegre, Brasil) e o cloreto de sódio comercial (sal, marca Marlin, Brasil). Eles foram dissolvidos em água destilada produzindo soluções aquosas desidratantes com concentrações na faixa de 23 a 67% em peso (p/p) de sólidos. As concentrações mássicas de sal e de açúcar nas soluções aquosas variaram de 0 a 20% p/p e 55 a 65% p/p, respectivamente. As concentrações das soluções foram verificadas através de um refratômetro de bancada.

3.2 Metodologia experimental

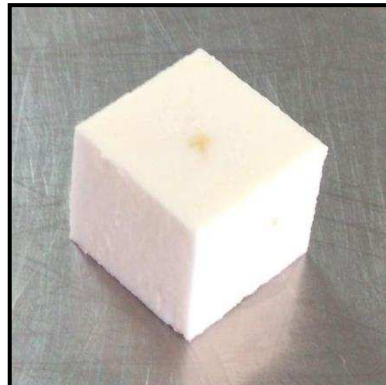
As atividades experimentais foram desenvolvidas no Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) do Departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal da Paraíba.

As etapas do processo de desidratação osmótica aplicada aos cubos de mandioca estão descritas a seguir.

3.2.1 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas a partir do fatiamento dos vegetais *in natura* na forma de cubos, como mostra a Figura 3.2, com dimensões de aproximadamente $2,5 \times 2,5 \times 2,5 \text{ cm}^3$. Utilizou-se um fatiador de alumínio, projetado para a matéria-prima adquirir o formato de cubo conforme ilustrado na Figura 3.3, e facas de aço inox.

Figura 3.2 – Cubo de mandioca *in natura*



Fonte: o próprio autor (2017).

Figura 3.3 – Cortador de alumínio utilizado nos experimentos



Fonte: o próprio autor (2017).

3.2.2 Caracterização do material

3.2.2.1 Composição físico-química da matéria-prima

A matéria-prima foi caracterizada de acordo com a metodologia do Instituto Adolfo Lutz, (BRASIL, 2005a) conforme as seguintes determinações:

- Teor de umidade: determinado pelo método gravimétrico em estufa a vácuo (modelo 6002, marca *Hotpack, EUA*), a 70°C a uma pressão menor que 75 mmHg e em estufa com circulação de ar (modelo SL 102/221, marca SOLAB, Brasil), a 105°C.
- Acidez: baseia-se na neutralização dos íons H⁺ com solução alcalina.
- pH: determinado em pHmetro (modelo mPA-210, marca TECNOPON, Brasil).
- Cinzas: determinada pelo método gravimétrico em mufla a 550°C (modelo Robertshow, marca FORNITEC, Brasil).
- Conteúdo de proteínas: obtido através do método de Kjeldahl, baseado na determinação de nitrogênio total da amostra. Esse método é dividido em três etapas: digestão, destilação e titulação.
- Conteúdo de lipídeos (método de Soxhlet): processo gravimétrico no qual o material é submetido à extração no extrator de Soxhlet (modelo SEBELIN TE-188, marca TECNAL, país Brasil). Para a extração dos lipídeos foi usado o reagente hexano.
- Conteúdo de amido: determinado por hidrólise energética em meio fortemente ácido, o qual produziu exclusivamente glicose.
- Conteúdo de cloreto de sódio: obtido pelo método de Mohr, baseado na titulação com nitrato de prata, utilizando-se cromato de potássio como indicador.
- Açúcares não redutores em sacarose, redutores em glicose e totais: determinado através da reação dos açúcares redutores com os íons cúpricos da solução de Fehling, reduzindo-se a íons cuprosos, sob a ação do calor em meio alcalino. As determinações de glicídios redutores

foram calculadas em glicose e as dos não-redutores em sacarose, e as dos totais foram calculadas pela soma dos dois glicídios sacarose e glicose.

- Conteúdo de sólidos solúveis: determinado com uso de um refratômetro de bancada (marca *NOVA Instruments*, Brasil).
- Atividade de água: foi determinada a 25°C, utilizando-se o equipamento LabMaster (marca *NOVASINA*, Suíça).

Todas as determinações foram realizadas em triplicatas.

3.2.3 Ensaios de desidratação osmótica

Os ensaios de desidratação osmótica foram realizados em incubadora de bancada digital *shaker* refrigerada (modelo LS4900-TZH, marca *Alpax*, Brasil).

As amostras *in natura* na forma de cubos foram pesadas, registrando-se as suas massas e dimensões iniciais. Logo após, foram acondicionadas em frascos cilíndricos de vidro de 250 mL com soluções aquosas desidratantes na temperatura dos seus respectivos ensaios experimentais. A relação de massa de amostra para massa de solução foi de 1:15, a fim de se garantir que a concentração da solução osmótica permanecesse constante ao longo do processo. Os frascos contendo as soluções e as amostras foram colocados na incubadora em tempo e temperatura arbitradas pelas condições experimentais adotadas, sob agitação constante (180 rpm). Após o tempo final de operação adotado para cada ensaio experimental, as amostras desidratadas foram colocadas em tela para drenagem do excesso de solução desidratante e em seguida pesadas e medidas suas dimensões finais. A Figura 3.4 mostra a foto do cubo desidratado osmoticamente.

Figura 3.4 – Cubo desidratado osmoticamente



Fonte: o próprio autor (2017).

Logo após, o material foi dividido em porções representativas para a realização das determinações dos conteúdos de massa, teor de umidade, conteúdo de cloreto de sódio, de sacarose, teor de sólidos solúveis e atividade de água. Todas as determinações foram feitas em duplicata para o tratamento dos dados experimentais obtidos durante os ensaios de desidratação osmótica. Os ensaios foram realizados em duas etapas distintas:

- a) Determinação das faixas otimizadas de operação da desidratação osmótica e das reduções geométricas: obtida mediante planejamento experimental estatístico do tipo fatorial completo com composto central e rotacional, denominado DCCR;
- b) Estudo da cinética de desidratação osmótica: realizado através de ensaios de desidratação osmótica para se obter curvas experimentais de Perda de massa, Perda de umidade, Ganho de sólidos totais, Redução de atividade de água, Incorporações de cloreto de sódio e de sacarose e Reduções de volume e de área em relação ao tempo de operação.

3.2.3.1 Determinação das faixas ótimas de operação da desidratação e das reduções geométricas: Planejamento experimental estatístico

O processo de desidratação osmótica dos cubos de mandioca em soluções de cloreto de sódio e/ou sacarose foi estudado através de um planejamento fatorial completo com composto central e rotacional (DCCR), com quatro variáveis independentes (temperatura, concentração da solução osmótica, tempo de imersão e concentração de sal na solução) em dois níveis de variação (-1 e +1) do tipo 2^4 , com pontos axiais (- α e + α) e cinco replicações nos pontos centrais (0), totalizando 29 experimentos. A Tabela 3.1 apresenta as variáveis e os níveis de variação das variáveis na forma codificada com seus respectivos valores de operação.

Tabela 3.1 – Variáveis e níveis de variação do DCCR da desidratação osmótica de mandioca

Variáveis	Níveis de variação codificados das variáveis				
	-2 (- α)	-1	0	1	2 (+ α)
Temperatura (°C)	19	30	41	52	63
Concentração de soluto ⁱ (% p/p)	23	34	45	56	67
Tempo de operação (min)	70	100	130	160	190
Concentração de NaCl (% p/p)	0	5	10	15	20

ⁱO soluto é composto por uma mistura de sacarose e cloreto de sódio
Fonte: o próprio autor (2016).

A Tabela 3.2 apresenta a matriz experimental do DCCR de desidratação osmótica dos cubos de mandioca.

Tabela 3.2 – Variáveis e níveis de variação do DCCR do tipo 2⁴ para avaliar a desidratação osmótica de mandioca em soluções de sacarose e cloreto de sódio

Ensaio	Temperatura (°C)	Concentração de solução (% p/p)	Tempo (min)	Concentração de NaCl (% p/p)
1	30 (-1)	34 (-1)	100 (-1)	5 (-1)
2	52 (+1)	34 (-1)	100 (-1)	5 (-1)
3	30 (-1)	56 (+1)	100 (-1)	5 (-1)
4	52 (+1)	56 (+1)	100 (-1)	5 (-1)
5	30 (-1)	34 (-1)	160 (+1)	5 (-1)
6	52 (+1)	34 (-1)	160 (+1)	5 (-1)
7	30 (-1)	56 (+1)	160 (+1)	5 (-1)
8	52 (+1)	56 (+1)	160 (+1)	5 (-1)
9	30 (-1)	34 (+1)	100 (-1)	15 (+1)
10	52 (+1)	34 (-1)	100 (-1)	15 (+1)
11	30 (-1)	56 (+1)	100 (-1)	15 (+1)
12	52 (+1)	56 (+1)	100 (-1)	15 (+1)
13	30 (-1)	34 (-1)	160 (+1)	15 (+1)
14	52(+1)	34 (-1)	160(+1)	15 (+1)
15	30 (-1)	56 (+1)	160 (+1)	15 (+1)
16	52 (+1)	56 (+1)	160 (+1)	15 (+1)
17	19 (-2)	45 (0)	130 (0)	10 (0)
18	63 (2)	45 (0)	130 (0)	10 (0)
19	41 (0)	23 (-2)	130 (0)	10 (0)
20	41 (0)	67 (2)	130 (0)	10 (0)
21	41 (0)	45 (0)	70 (-2)	10 (0)
22	41 (0)	45 (0)	190 (2)	10 (0)
23	41 (0)	45 (0)	130 (0)	0 (-2)
24	41 (0)	45 (0)	130 (0)	20 (2)
25	41 (0)	45 (0)	130 (0)	10 (0)
26	41 (0)	45 (0)	130 (0)	10 (0)
27	41 (0)	45 (0)	130 (0)	10 (0)
28	41 (0)	45 (0)	130 (0)	10 (0)
29	41 (0)	45 (0)	130 (0)	10 (0)

Fonte: o próprio autor (2016).

As respostas ou parâmetros de avaliação do DCCR foram a Perda de massa percentual (PM), a Perda de umidade percentual (PU), o Ganho de sólidos totais percentual (GST), a

Redução da atividade de água percentual (RA_w), a Relação de Desempenho da operação (RD), a Atividade de água (A_w), a Incorporação de sólidos percentual (IS), a Incorporação de cloreto de sódio percentual (I_{NaCl}), a Incorporação de sacarose percentual (I_{Sac}), a Concentração de cloreto de sódio percentual (C_{NaCl}), a Concentração de sacarose percentual (C_{Sac}), a Redução de volume percentual (RV) e a Redução de área percentual (RS).

Esses parâmetros foram determinados como segue:

- **Perda de massa percentual (PM):** expressa a perda de massa percentual através da variação de massa das amostras antes e depois da desidratação osmótica, determinada pela Equação 3.1.

$$PM (\%) = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right)_{amostras} \cdot 100 \quad (3.1)$$

onde m_i = massa da amostra *in natura* (g) e m_{final} = massa da amostra desidratada (g).

- **Perda de umidade (PU):** expressa a perda de umidade percentual através da variação do teor de umidade e massa das amostras antes e depois da desidratação osmótica, determinada pela Equação 3.2.

$$PU (\%) = \left[\frac{(x_i \cdot m_i) - (x_f \cdot m_f)}{m_i} \right]_{amostras} \cdot 100 \quad (3.2)$$

onde x_i = teor de umidade da amostra *in natura* em base úmida (%), m_i = massa da amostra *in natura* (g), x_f = teor de umidade da amostra desidratada em base úmida (%), e m_{final} = massa da amostra desidratada (g).

- **Ganho de sólidos totais (GST):** expressa a percentagem do ganho de sólidos através da variação de massa e de umidade das amostras antes e depois da desidratação osmótica, determinado pela Equação 3.3.

$$GST (\%) = \left\{ \frac{[(m_f) \cdot (1-x_f)] - [(m_i) \cdot (1-x_i)]}{(m_i)} \right\}_{amostras} \cdot 100 \quad (3.3)$$

onde m_f = massa da amostra desidratada (g), x_f = teor de umidade da amostra desidratada em base úmida (%), m_i = massa da amostra *in natura* (g), e x_i = teor de umidade da amostra *in natura* em base úmida (%).

- **Redução de atividade de água (RA_w):** expressa a percentagem da redução da atividade de água através da variação de atividade e da massa das amostras antes e depois da desidratação osmótica, determinada pela Equação 3.4.

$$RA_w (\%) = \left[\frac{(A_{w_i} \cdot m_i) - (A_{w_f} \cdot m_f)}{(m_i)} \right]_{amostras} \cdot 100 \quad (3.4)$$

onde A_{w_i} = teor de atividade de água da amostra *in natura*, m_i = massa da amostra *in natura* (g), A_{w_f} = teor de atividade de água da amostra desidratada, e m_f = massa da amostra desidratada (g).

- **Relação de desempenho (RD) adotada:** é definida pela razão entre o ganho de sólidos totais e a perda de umidade do material no processo de desidratação osmótica, determinada pela Equação 3.5.

$$RD = \left(\frac{GST}{PU} \right)_{amostras} \quad (3.5)$$

onde GST = ganho de sólidos totais (%) PU = perda de umidade (%).

- **Atividade de água (A_w):** expressa a atividade de água das amostras medida direto no equipamento.

- **Incorporação de sólidos solúveis (IS):** expressa a percentagem de incorporação de sólidos solúveis através da variação do conteúdo de sólidos solúveis totais e de massa das amostras antes e depois da desidratação osmótica, determinado pela Equação 3.6.

$$IS (\%) = \left[\frac{(SST_f \cdot m_f) - (SST_i \cdot m_i)}{(m_i)} \right]_{amostras} \quad (3.6)$$

onde SST_i = teor de sólidos solúveis da amostra *in natura* (%), m_f = massa da amostra desidratada (g), SST_f = teor de sólidos solúveis da amostra desidratada (%), e m_i = massa da amostra *in natura* (g).

- **Incorporação de cloreto de sódio (I_{NaCl}):** expressa a percentagem de incorporação de cloreto de sódio através da variação da concentração de cloreto de sódio e de massa das amostras antes e depois da desidratação osmótica, determinado pela Equação 3.7.

$$I_{NaCl} = \left[\frac{(C_{NaCl_f} \cdot m_f) - (C_{NaCl_i} \cdot m_i)}{(m_i)} \right]_{amostras} \quad (3.7)$$

onde C_{NaCl_f} = concentração de cloreto de sódio da amostra desidratada (%), m_f = massa da amostra desidratada (g), C_{NaCl_i} = concentração de cloreto de sódio da amostra *in natura* (%), e m_i = massa da amostra *in natura* (g).

- **Incorporação de sacarose (I_{Sac}):** expressa a percentagem de incorporação de sacarose através da variação da concentração de sacarose e de massa das amostras antes e depois da desidratação osmótica, determinada pela Equação 3.8.

$$I_{Sac} = \left[\frac{(C_{Sac_f} \cdot m_f) - (C_{Sac_i} \cdot m_i)}{(m_i)} \right]_{amostras} \quad (3.8)$$

onde C_{Sac_f} = concentração de sacarose da amostra desidratada (%), m_f = massa da amostra desidratada (g), C_{Sac_i} = concentração de sacarose da amostra *in natura* (%), e m_i = massa da amostra inicial *in natura* (g).

- **Concentração de cloreto de sódio (C_{NaCl}):** expressa a percentagem de cloretos em cloretos de sódio na amostra *in natura* ou desidratada, determinada pela Equação 3.9.

$$C_{NaCl} (\%) = \left(\frac{V_{AgNO_3} * F_{AgNO_3} * 0,584}{m_a} \right) \quad (3.9)$$

onde V_{AgNO_3} = volume da solução de nitrato de prata 0,1M gasto na titulação (mL), F_{AgNO_3} = fator de correção da solução de nitrato de prata 0,1M, 0,584 = miliequivalente-grama de cloreto de sódio, e m_a = massa da amostra *in natura* ou desidratada na alíquota utilizada para titulação (g).

- **Concentração de sacarose (C_{sac}):** expressa a percentagem de glicídios não redutores em sacarose na amostra *in natura* ou desidratada. Como a amostra não tem açúcares redutores em glicose, o conteúdo de açúcares não redutores em sacarose foi calculado pela fórmula dos açúcares totais, cuja expressão é determinada pela Equação 3.10.

$$AT (\%) = ANR_{Sac} + AR_{Glic} \quad (3.10)$$

onde AT = açúcares totais (%), ANR_{Sac} = açúcares não redutores em sacarose (%), e AR_{Glic} = açúcares redutores em glicose (%).

O conteúdo de açúcares redutores em glicose na amostra de cubo de mandioca é nulo, ou seja, $AR_{Glic} = 0$. Desta forma, a expressão para calcular os açúcares não redutores em sacarose é determinada pela Equação 3.11:

$$ANR_{sac} (\%) = AT \quad (3.11)$$

onde ANR_{Sac} = açúcares não redutores em sacarose (%) e AT = açúcares totais (%).

Os açúcares totais não redutores em sacarose são calculados através da Equação 3.12.

$$AT(\%) = ANR_{Sac}(\%) = \left[\frac{(F_F * C * 100)}{(m_a * V_g)} \right] \quad (3.12)$$

onde F_F = fator de correção das soluções de Fehling A e B, C = Capacidade do balão volumétrico, m_a = massa da amostra *in natura* ou desidratada na alíquota utilizada para titulação (g), e V_g = volume da solução glicosídica da amostra obtido na titulação (mL).

- **Redução de volume (RV):** expressa a percentagem de redução de volume através da variação de volume antes e depois da desidratação osmótica, determinada pela Equação 3.13.

$$RV (\%) = \left(\frac{V_i - V_f}{V_i} \right)_{amostras} \cdot 100 \quad (3.13)$$

onde V_i = volume da amostra *in natura* (cm³) e V_f = volume da amostra desidratada (cm³).

As expressões para calcular os volumes das amostras *in natura* e desidratada são determinadas pelas Equações 3.14 e 3.15.

$$V_i = R_{1i} * R_{2i} * R_{3i} \quad (3.14)$$

$$V_f = R_{1f} * R_{2f} * R_{3f} \quad (3.15)$$

onde R_{1i} = dimensão do eixo x da amostra *in natura* (cm), R_{2i} = dimensão do eixo y da amostra *in natura* (cm) e R_{3i} = dimensão do eixo z da amostra *in natura* (cm), R_{1f} = dimensão do eixo x da amostra desidratada (cm), R_{2f} = dimensão do eixo y da amostra desidratada (cm), R_{3f} = dimensão do eixo z da amostra desidratada (cm).

- **Redução de área (RS):** expressa a percentagem da redução de área através da variação de área das amostras antes e depois da desidratação osmótica, determinada pela Equação 3.16.

$$RS (\%) = \left(\frac{S_i - S_f}{S_i} \right)_{amostras} \cdot 100 \quad (3.16)$$

onde S_i = área da amostra *in natura* (cm²) e S_f = área da amostra desidratada (cm²).

As expressões para calcular as áreas das amostras *in natura* e desidratada são determinadas pelas Equações 3.17 e 3.18.

$$S_i = (2R_{1i} * R_{2i}) + (2 * R_{2i} * R_{3i}) + (2 * R_{3i} * R_{1i}) \quad (3.17)$$

$$S_f = (2R_{1f} * R_{2f}) + (2 * R_{2f} * R_{3f}) + (2 * R_{3f} * R_{1f}) \quad (3.18)$$

onde R_{1i} = dimensão do eixo x da amostra *in natura* (cm), R_{2i} = dimensão do eixo y da amostra *in natura* (cm) e R_{3i} = dimensão do eixo z da amostra *in natura* (cm), R_{1f} = dimensão do eixo x da amostra desidratada (cm), R_{2f} = dimensão do eixo y da amostra desidratada (cm), R_{3f} = dimensão do eixo z da amostra desidratada (cm).

A faixa otimizada para o processo de desidratação osmótica de cubos de mandioca foi determinada a partir dos menores valores de ganho de sólidos com as máximas perdas de umidade, expressos pela relação de desempenho da operação adotada, e os maiores valores da redução de atividade de água do material. As zonas otimizadas para as menores e maiores reduções geométricas foram determinadas a partir das menores e maiores reduções de volume e área.

Os estudos de avaliação dos parâmetros de operação das matrizes de planejamentos experimentais fatoriais apresentados na Tabela 3.2, foram realizados segundo metodologia de Barros-Neto et al., (2003), cujo tratamento estatístico foi realizado no software *STATISTICA 5.0 for Windows* (STATSOFT, 1997).

3.2.3.2 Ensaios da cinética de desidratação osmótica

Definida a faixa ótima de operação para os parâmetros proporcionais da desidratação osmótica, através do estudo do DCCR, foram realizados ensaios experimentais para o estudo da cinética de desidratação osmótica de cubos de mandioca na melhor condição obtida da operação. A cinética da operação consistiu em analisar o comportamento de migração dos tores de água e de sólidos solúveis através da matriz sólida do material e suas reduções geométricas. A caracterização da cinética de desidratação osmótica foi realizada através das curvas experimentais de perda de massa, perda de umidade, ganho de sólidos totais, redução de atividade de água e incorporações de cloreto de sódio e sacarose em relação ao tempo, apresentadas pelas Equações 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.7, e 3.8 respectivamente na Seção 3.2.3.1.

Foram realizados ensaios destrutivos de desidratação osmótica em triplicata e em cada condição de operação adotada com um conjunto de quinze (15) frascos contendo a solução osmótica e o cubo de mandioca para os seguintes intervalos de tempo:

- a) Período inicial de 90 minutos de operação: foram coletadas amostras em intervalos de 15 minutos. Cada amostra se refere a um frasco, contendo 250 mL de solução osmótica e um cubo de mandioca. Essas amostras representam os dados cinéticos nos pontos de 15, 30, 45, 60, 75 e 90 min, resultando em seis (06) frascos utilizados;
- b) Intervalo de 90 a 150 minutos: serão coletadas amostras em intervalos de 20 minutos. Essas amostras representam os dados cinéticos nos pontos de 110, 130 e 150 min, representados pelo uso de três (03) frascos;
- c) Intervalo de 150 a 180 minutos: será coletada amostra no intervalo de 30 minutos. Essa amostra representa o ponto de 180 min e o uso de um (01) frasco;
- d) Intervalo de 180 a 420 minutos: serão coletadas amostras nos intervalos de 1 hora. Essas amostras representam os dados cinéticos nos pontos de 240, 300, 360, e 420 min, representados pelo uso de quatro (04) frascos;
- e) Período final de operação: refere-se a coleta do último frasco que sobrar para os dados cinéticos de um tempo prolongado de operação que possa se aproximar de uma condição de equilíbrio para as taxas de transferência mássica de água e de sólidos solúveis entre a solução osmótica e o material sólido referente a 480 min de operação, representado pelo uso de um (01) frasco.

O material de cada amostra foi utilizado para as determinações do teor de umidade, massa, cloreto de sódio, sacarose, e valor de atividade de água. Assim, foram obtidos e comparados os dados cinéticos de perdas de umidade e de massa, incorporações de cloreto de sódio e sacarose, ganho de sólidos totais e redução de atividade de água do material em relação ao tempo de operação.

3.2.4 Isotermas de dessorção das amostras

A umidade de equilíbrio das amostras utilizadas nos ensaios de secagem foi determinada através das isotermas de dessorção, utilizando o método estático gravimétrico e soluções aquosas de ácido sulfúrico a diferentes concentrações, garantindo a variação da umidade relativa de 4 a 89%. O procedimento utilizado foi baseado no estudo de Moraes et al. (2007). As amostras foram inseridas em frascos de vidro hermeticamente fechados contendo

ácido sulfúrico. Esses frascos permaneceram em incubadora de bancada digital *shaker* refrigerada a temperaturas constantes e iguais a 50, 60 e 70°C, durante o período necessário para atingirem massa constante. Depois de alcançada a condição de equilíbrio de massa do material, determinou-se seu teor de umidade. Através dos resultados da umidade de equilíbrio das amostras condicionadas em função da umidade relativa do meio foram obtidas as curvas experimentais de dessecção, as quais foram ajustadas através das equações GAB, BET, Oswin, Peleg, Copace, Chung-Pfost, e Smith. Em seguida, foram obtidos os valores da umidade de equilíbrio e através dos modelos de BET e GAB, a umidade da monocamada de água. Os ensaios experimentais foram realizados em duplicata.

3.2.4.1 Ensaios de secagem convectiva

Foram realizados ensaios de secagem a diferentes temperaturas com cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente em um secador convectivo com escoamento de ar perpendicular as amostras, desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) do Departamento de Engenharia de Alimentos (DEA/CT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), conforme é mostrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Secador convectivo de bandejas



Fonte: o próprio autor (2017).

As temperaturas de secagem escolhidas foram 50, 60 e 70°C utilizando condições constantes de velocidade e de umidade absoluta do ar de secagem. Foi realizada uma triagem prévia do perfil de velocidade do ar, utilizando um anemômetro de fio quente (modelo 8330-M, marca *TSI, EUA*) e da temperatura e da umidade relativa do ar na câmara de secagem, através de um termohigrômetro (modelo *Digital Hygro-Thermometer*, marca *Alla France, French*).

3.2.4.2 Cinética de secagem

A cinética de secagem foi obtida por meio das medidas experimentais da massa em função do tempo de secagem, com intervalos de 60 min até o período final da secagem. As condições do ar de secagem foram monitoradas em todos os experimentos e os ensaios foram realizados em triplicata.

A análise da secagem foi realizada através das curvas experimentais do teor de umidade, em relação ao tempo e da taxa de secagem em relação ao teor de umidade. As curvas de secagem foram expressas com a umidade em base seca, conforme Moyers e Baldwin (1999).

Os dados médios da umidade final dos cubos de mandioca secos *in natura* e desidratados osmoticamente nas três temperaturas foram submetidos à análise de variância ao nível de significância de 5% e comparação de média pelo teste de Tukey, utilizando-se o software *STATISTICA 5.0 for Windows* (STATSOFT, 1997).

3.3 Determinações de parâmetros de transporte

3.3.1 Para cinética de desidratação osmótica

A difusividade efetiva média geral da desidratação osmótica para o transporte de massa (saída de água e entrada de solutos) através do cubo de mandioca, foi obtida através do modelo empírico desenvolvido por Azuara et al. (1992), descrito no item 3.2.3.2.

3.3.2 Para cinética de secagem convectiva

A difusividade efetiva média de umidade da secagem convectiva dos cubos de mandioca foi obtida através do modelo físico-matemático de Fick simplificado por Crank (1975), considerando distribuição de umidade inicial uniforme, ausência de qualquer

resistência térmica para uma placa plana infinita e tempos longos de secagem. No caso de um cubo, todos os lados foram considerados iguais, isso correspondeu a elevar essa solução de Crank para o modelo de Fick ao cubo resultando na Equação 3.19.

$$\left(\frac{\bar{X}-X_e}{X_0-X_e}\right) = \left[\left(\frac{8}{\pi^2}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{ef} t}{(2L)^2}\right)\right]^3 \quad \therefore L = \frac{L_{amostra}}{2} \quad (3.19)$$

onde D_{ef} = Difusividade efetiva (m^2/s), \bar{X} = conteúdo médio de umidade ($g_{\text{água}}/g_{\text{sól. seco}}$), X_e = conteúdo de umidade de equilíbrio ($g_{\text{água}}/g_{\text{sól. seco}}$), X_0 = conteúdo de umidade inicial ($g_{\text{água}}/g_{\text{sól. seco}}$), t = tempo (s), L = comprimento característico = metade da espessura de cada lado do cubo (m), X_e = conteúdo de umidade de equilíbrio do material ($g_{\text{água}}/g_{\text{sól. seco}}$).

3.4 Tratamento estatístico dos dados

Os ajustes dos modelos aos dados experimentais foram realizados mediante regressão linear e não linear utilizando o pacote estatístico *Statística 5.0* (STATSOFT, 1997). O critério de escolha dos melhores ajustes foi o coeficiente de determinação (R^2) (BARROS NETO; SCARMÍNIO; BRUNS, 2003) e o desvio relativo médio P , cuja definição encontra-se descrita na Equação 3.20 (LOMAURO et al., 1985):

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|V_f - V_0|}{V_0} \quad (3.20)$$

onde P = desvio relativo médio (%), V_f = valores preditos pelo modelo, V_0 = valores observados experimentalmente, N = número de pontos experimentais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização físico-química da matéria-prima

A caracterização físico-química da mandioca *Manihot esculenta in natura* foi realizada de acordo com os métodos referenciados na Seção 3.2.2.1 A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos:

Tabela 4.1 – Caracterização físico-química da raiz de mandioca *in natura*

Análise	Valor médio da mandioca <i>in natura</i> ⁱ
Atividade de água	0,954 ± 0,00
Teor de umidade ⁱⁱ (b.u., %)	60,45 ± 0,03
Sólidos solúveis (°Brix)	8,0 ± 0,97
Açúcares totais (%)	2,27 ± 0,19
Sacarose (%)	2,27 ± 0,19
Cloreto de sódio (%)	0,13 ± 0,02
Acidez ⁱⁱⁱ (%)	1,89 ± 0,21
pH	6,87 ± 0,03
Cinzas (%)	1,26 ± 0,39
Proteínas (%)	0,73 ± 0,01
Lipídeos (%)	3,26 ± 0,12
Amido (%)	22,57 ± 0,04

ⁱValor médio ± desvio padrão, ⁱⁱbase úmida; ⁱⁱⁱ Expressa em mL de hidróxido de sódio 0,1N por 100g de amostra.

Fonte: o próprio autor (2017).

A mandioca em estudo é constituída basicamente de água, sacarose, lipídeos e amido, conforme os resultados da Tabela 4.1. A composição química das raízes de mandioca consistiu em 60,45% de umidade, 3,26% de lipídeos, 0,73% de proteínas, 1,26% de cinzas, 6,87 de pH, 1,89% de Acidez e 22,57% de Amido. Resultados apresentados por Luna et al. (2013) em raízes de mandioca crua abordam valores próximos aos obtidos neste trabalho para o pH (7,09), a acidez (1,4) e as cinzas (1,35%). Porém, seus valores de proteínas (0,43%), lipídeos (0,61%) e umidade (35,31%) foram menores que os encontrados para a mandioca utilizada nesse trabalho. As diferenças nos valores de umidade da raiz crua podem estar relacionadas com as variações da umidade do solo. Maieves (2010) avaliou o conteúdo de umidade de tubérculos de mandioca em varias épocas de colheita e conclui que as raízes coletadas no mês de fevereiro apresentaram umidade maior do que nas coletadas no mês de maio. Ele afirma que as raízes cultivadas em solos arenosos apresentam umidade média de 60%, em base úmida. Com relação ao conteúdo de proteínas, Moreira et. al. (2017) observaram que diferentes variedades de mandioca apresentam capacidades inerentes de

acumular proteínas em diferentes partes da planta. Eles constataram que a variedade Caitité teve a maior capacidade de acúmulo de proteínas nas raízes do que a variedade Sergipe. Quanto a variação do conteúdo de lipídeos dos tubérculos, Chisté et al., (2006) cita que ela está relacionada com as propriedades intrínsecas das raízes.

Os valores de açúcares totais e açúcares não redutores em sacarose foram iguais pelo fato de existir traços de açúcares redutores em glicose nas amostras analisadas. Os açúcares totais são obtidos pela soma dos dois açúcares a sacarose e a glicose. Estes valores foram iguais a 2,27% e diferiram dos encontrados por Aguiar et al. (2014), que obtiveram valores mais altos, cerca de 3,94% para açúcares não redutores em sacarose e 5,58% para açúcares totais em raiz da variedade Mandiocaba congelada, uma variedade de mesa. As diferenças nos teores de açúcares variam com o período de colheita. Couto (2013) observou que houve diminuição do teor de açúcares totais com o aumento da idade das raízes de mandioca colhidas em diferentes épocas. O ciclo de desenvolvimento da planta é composto por cinco fases fisiológicas e nas primeiras fases necessita de maior energia produzindo maior concentração de açúcares. Rinaldi et al. (2015) estudaram o efeito de diferentes formas de congelamento sobre raízes de mandioca e concluíram que o uso desse processo de conservação provoca menos alterações na estrutura da matéria-prima, prolongando a conservação de suas características iniciais.

O resultado de conteúdo de amido (22,57%) da mandioca em estudo é similar aos resultados apresentados por Cardoso et al. (2014). Eles encontraram índices de 23,52%, 23,33% e 23,79% de teores de amido nas matérias frescas das variedades Parazinha, Milagrosa e Pacaré respectivamente. Outro estudo cita que o tempo de permanência da cultura no campo proporciona um efeito cumulativo na produtividade de amido na raiz de mandioca (OLIVEIRA et al., 2010).

Valduga et al. (2011) constataram diferenças significativas para os teores de sódio de cinco cultivares de mandioca (BRS Rosada, Casca Roxa, BRS Dourada, BRS Gema de Ovo e Saracura) colhidas aos 8 meses após o plantio. A cultivar Casca Roxa apresentou significativo teor de cloreto de sódio em base seca (0,19%), este valor foi próximo ao obtido neste trabalho (0,13%). Os autores concluíram que a composição química da mandioca é específica não somente para cada cultivar, como também depende, principalmente, de fatores genéticos associados.

Couto (2013) encontrou diferentes valores de sólidos solúveis em raízes de mandioca colhidas em diferentes períodos: 3,75, 2,31, 3,24, e 3,64°Brix obtidas na primeira, segunda, terceira e quarta colheita, respectivamente. Estes valores foram bem inferiores ao encontrado

nesta pesquisa (8°Brix). A variação no teor de sólidos solúveis pode ser explicada pela mudança nos valores da umidade em relação à idade da planta (COUTO, 2013).

4.2 Desidratação osmótica

4.2.1 Análise geral

Os principais parâmetros da desidratação osmótica dos cubos de mandioca para determinação da faixa otimizada foram perda de umidade (PU), ganho de sólidos totais (GST), relação de desempenho da operação (RD) e redução de atividade de água (RA_w), cujos resultados estão na Tabela 4.2, de acordo com o planejamento experimental estatístico adotado.

Tabela 4.2 – Valores experimentais das variáveis respostas perda de umidade, ganho de sólidos totais, relação de desempenho e redução de atividade de água

Ensaio	Tratamentos				Variáveis respostas			
	T (°C)	C (% p/p)	T (min.)	Sal (% p/p)	PU ¹ (%)	GST ² (%)	RD ³	RA _w ⁴ (%)
1	30(-1)	34(-1)	100(-1)	5(-1)	9,691	7,335	0,757	3,810
2	52(+1)	34(-1)	100(-1)	5(-1)	12,732	9,193	0,722	6,101
3	30(-1)	56(+1)	100(-1)	5(-1)	22,220	17,985	0,809	7,191
4	52(+1)	56(+1)	100(-1)	5(-1)	24,773	11,890	0,480	16,162
5	30(-1)	34(-1)	160(+1)	5(-1)	12,772	9,493	0,743	6,590
6	52(+1)	34(-1)	160(+1)	5(-1)	16,021	11,726	0,732	7,611
7	30(-1)	56(+1)	160(+1)	5(-1)	23,829	19,114	0,802	8,495
8	52(+1)	56(+1)	160(+1)	5(-1)	26,387	15,305	0,580	15,852
9	30(-1)	34(-1)	100(-1)	15(+1)	10,719	4,169	0,389	9,573
10	52(+1)	34(-1)	100(-1)	15(+1)	13,555	8,192	0,604	10,273
11	30(-1)	56(+1)	100(-1)	15(+1)	25,135	15,289	0,608	14,980
12	52(+1)	56(+1)	100(-1)	15(+1)	26,848	11,582	0,431	21,600
13	30(-1)	34(-1)	160(+1)	15(+1)	19,412	12,838	0,661	10,342
14	52(+1)	34(-1)	160(+1)	15(+1)	16,066	10,661	0,664	13,181
15	30(-1)	56(+1)	160(+1)	15(+1)	27,278	17,013	0,624	19,559
16	52(+1)	56(+1)	160(+1)	15(+1)	29,903	19,075	0,638	19,581
17	19(-2)	45(0)	130(0)	10(0)	18,961	16,221	0,856	5,743
18	63(+2)	45(0)	130(0)	10(0)	18,404	12,016	0,653	15,553
19	41(0)	23(-2)	130(0)	10(0)	12,406	9,489	0,765	5,942
20	41(0)	67(+2)	130(0)	10(0)	25,324	16,580	0,655	18,530
21	41(0)	45(0)	70(-2)	10(0)	14,796	10,013	0,677	8,618
22	41(0)	45(0)	190(+2)	10(0)	18,948	11,497	0,607	16,523
23	41(0)	45(0)	130(0)	0(-2)	10,949	4,934	0,451	6,816
24	41(0)	45(0)	130(0)	20(+2)	18,106	10,448	0,577	20,454
25	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	15,265	8,891	0,582	10,865
26	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	14,320	8,142	0,569	12,892
27	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	15,816	8,886	0,562	11,047
28	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	16,096	9,155	0,569	10,637
29	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	15,382	8,864	0,576	11,742

Notações: ¹PU= perda de umidade, ²GST = ganho de sólidos totais, ³RD= relação de desempenho, ⁴RA_w = redução de atividade de água.

Fonte: o próprio autor (2017).

O nível de significância dos efeitos foi verificado através de análise estatística e excluíram-se aqueles que não foram significativos. A validade do tratamento estatístico foi verificada através de uma Análise de Variância (ANOVA), cuja significância da regressão e da falta de ajuste foi realizada através do teste F ao nível de confiança de 95% ($p < 0,05$).

Observa-se na Tabela 4.2 que as faixas dos parâmetros avaliados foram: Perda de umidade, Ganho de sólidos totais, Relação de desempenho, Redução da atividade de água de água.

Analisando os valores médios desses resultados, se percebe que o valor médio de perda de umidade (18,35%) foi maior que o de ganho de sólidos totais (11,59%), assim, o material perde mais umidade do que ganha sólidos totais, demonstrando um comportamento desejável para a desidratação osmótica.

A relação de desempenho adotada é expressa pela razão entre o ganho de sólidos totais e a perda de umidade. Seu valor médio foi de 0,63, menor que 1, indicando que ocorreu uma considerável migração de soluto do material para o fluido.

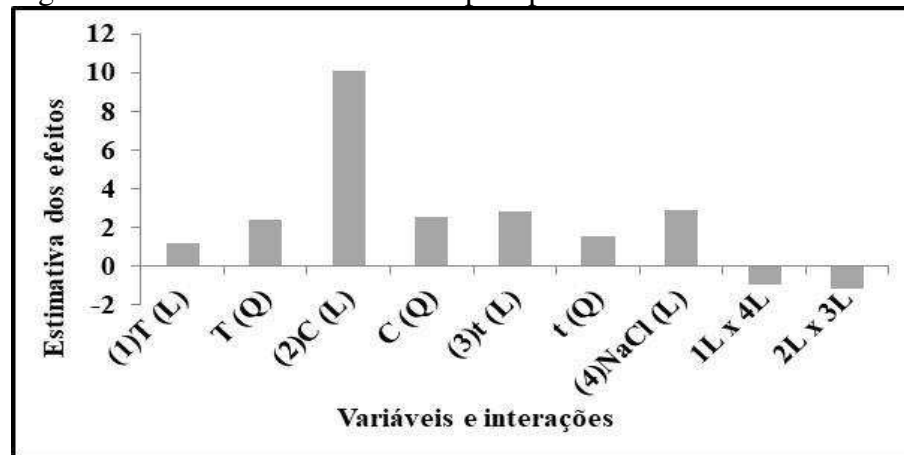
O valor médio de atividade de água dos cubos de mandioca desidratados foi de 0,89 (ver Apêndice A) sendo superior ao limite mínimo de 0,6 para desenvolvimento de microrganismos patogênicos, conforme Torrezan (1996). Os altos valores de atividade de água dos produtos desidratados resultaram em baixos valores de redução de atividade de água do material, cujo valor médio foi de 12%.

4.2.2 Perda de umidade

Na Figura 4.1 é possível visualizar o diagrama dos efeitos significativos de cada parâmetro e suas interações para perda de umidade.

As interações significativas das variáveis de estudo apresentaram efeitos negativos para a perda de umidade, diminuindo-a, segundo o histograma da Figura 4.1. O restante dos parâmetros tiveram efeitos desejáveis positivos para a perda de umidade. A concentração de soluto foi a variável mais significativa e que proporcionou a maior perda de umidade do material.

Figura 4.1- Estimativas dos efeitos para perda de umidade



Notação: NaCl = concentração de cloreto de sódio, C= concentração de soluto, T = temperatura, t = tempo, L = modelo matemático linear, Q = modelo matemático quadrático.

Fonte: o próprio autor (2017).

A significância da regressão e da falta de ajuste foi verificada após a retirada dos fatores não significativos e na Tabela 4.3 encontram-se os valores de F calculados e tabelados.

Tabela 4.3 – Análise de variância do modelo ajustado para perda de umidade

Perda de umidade					
Fonte	SQ ¹	GL ²	MQ ³	Fcalculado	Ftabelado ⁴
Regressão	805,6590	9	89,5177	16,1206	2,42
Resíduo	105,5067	19	5,5530	-	-
Falta de ajuste	103,6669	15	6,9111	15,0255	5,46
Erro puro	1,8398	4	0,4600	-	-
Total	911,1657	28	-	R ² = 0,88421	

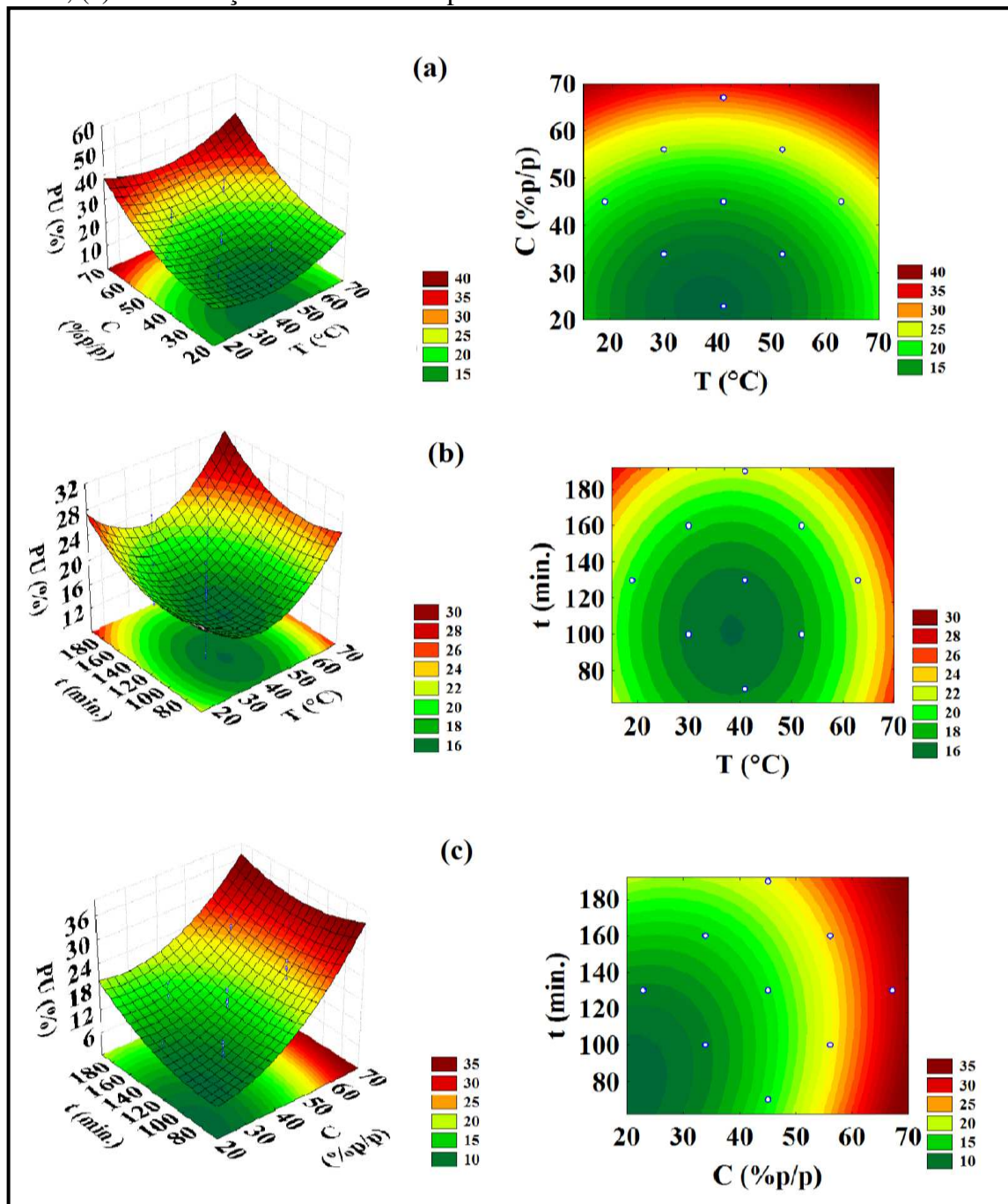
Notações: ¹SQ = soma quadrática, ²GL = grau de liberdade, ³MQ = média quadrática, ⁴Valores tabelados de F a p <0,05.

Fonte: o próprio autor (2017).

De acordo com os resultados expostos na Tabela 4.3, observa-se que o modelo apresentou regressão estatisticamente significativa, pois o valor de F calculado da regressão foi sete vezes superior ao valor de F tabelado da mesma. Para uma regressão ser estatisticamente significativa para fins preditivos, o seu valor de F calculado deve ser de três a cinco vezes maior que o seu valor de F tabelado (SCHMIDT; SALAS MELLADO 2009). Embora a falta de ajuste do modelo para a perda de umidade tenha sido significativa, a análise de variância realizada para o modelo ajustado foi significativo e preditivo atendendo o critério sugerido por Schmidt e Salas Mellado (2009). O coeficiente de determinação (R²) foi próximo de 0,90, cujo valor percentual ou porcentagem da variação explicada pelos modelos foi de 88,42%.

As Figuras 4.2 e 4.3 exibem as superfícies de resposta e as curvas de nível obtidas para o modelo preditivo de perda de umidade dos ensaios de desidratação osmótica. Estas exibem as relações das variáveis de estudo (temperatura, concentração da solução osmótica, tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio) através de diagramas bi e tridimensionais para a perda de umidade do material.

Figura 4.2—Superfícies de respostas e curvas de níveis para perda de umidade do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão

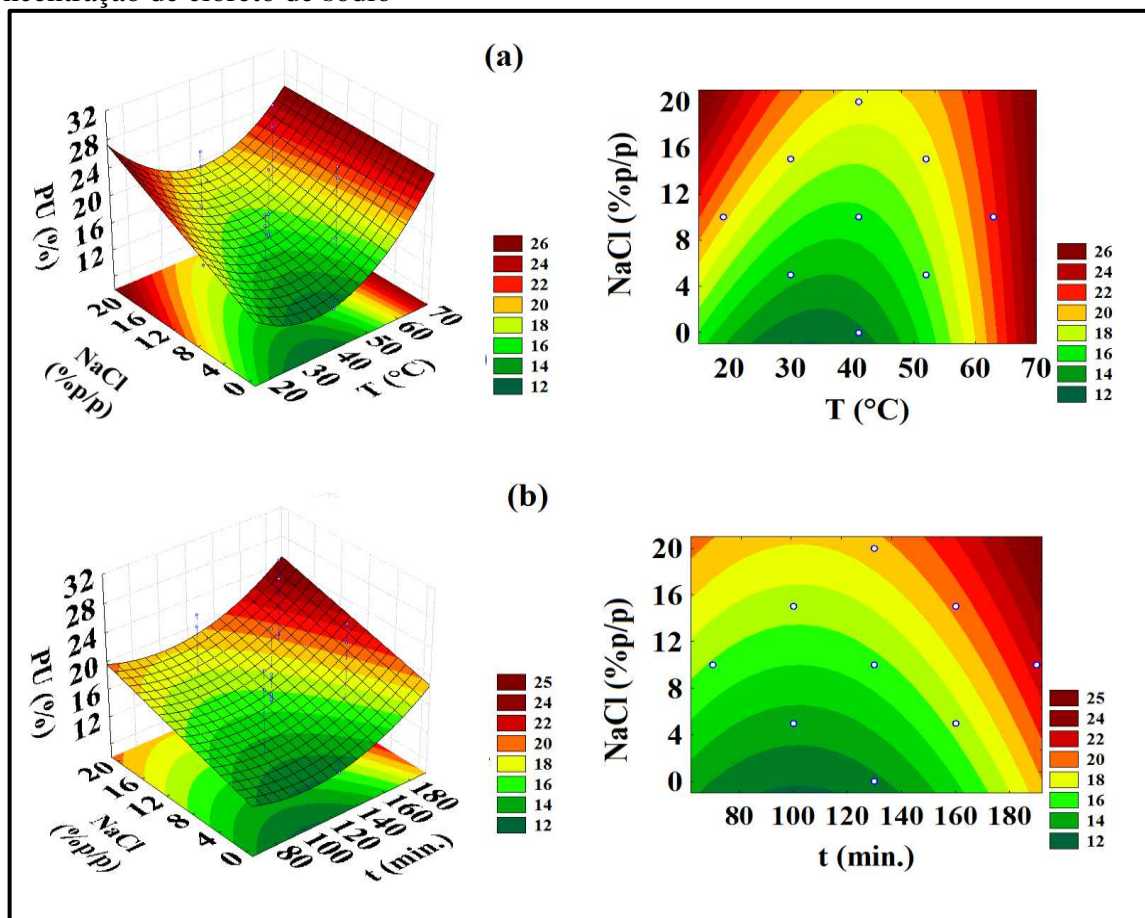


Fonte: o próprio autor (2017).

Analisando a Figura 4.2 observa-se que, para a região de estudo foram encontrados elevados valores de perda de água. Eles foram obtidos com concentrações de soluto na faixa de 60 a 67% p/p, enquanto que, para o tempo e a temperatura foram encontrados em quaisquer valores das suas faixas de estudo.

Na Figura 4.3 estão ilustradas as superfícies de resposta e as curvas de nível para a perda de umidade com relação a concentração de sal, temperatura e tempo de operação.

Figura 4.3—Superfícies de respostas e curvas de níveis para perda de umidade do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (b) tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio



Fonte: o próprio autor (2017).

A Figura 4.3 indica que longos tempos de imersão (160 a 190 minutos) combinados com altas concentrações de cloreto de sódio (10 a 15% p/p) e altas temperaturas (52 a 63°C) proporcionam perdas de umidade superiores a 50%.

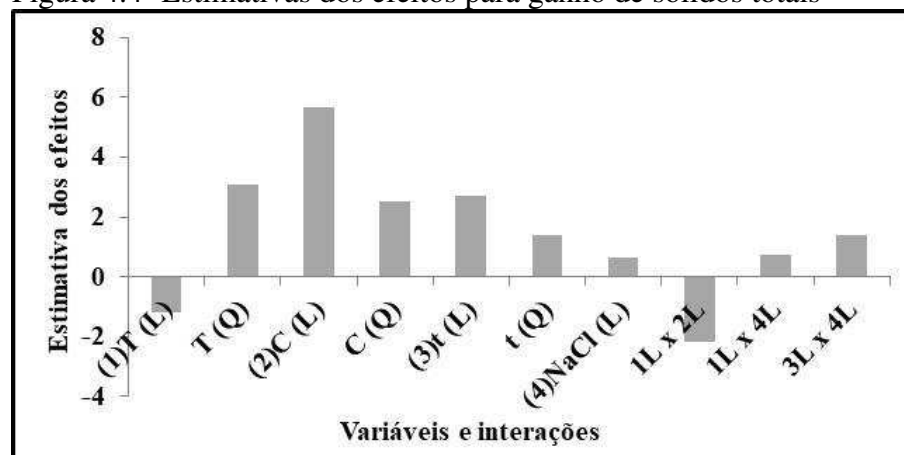
Realizando uma análise conjunta das Figuras 4.2 e 4.3, verifica-se que a maior perda de umidade foi alcançada com os maiores valores de temperatura, concentração de soluto, concentração de cloreto de sódio e de tempo de imersão. Esse comportamento corrobora com os resultados encontrados por Khan et al. (2011) que encontraram altos valores de perda de

umidade na desidratação de maçã, utilizando como soluto a maltodextrina, em condições de operação de elevada concentração de soluto (60 °Brix) e de temperatura (60 °C). Chin et al. (2013) relataram que a perda de umidade da goiaba aumentou com maior tempo de imersão do material em soluções osmóticas. De acordo com Perez et al. (2013) e Wang et al. (2013), o emprego de soluções ternárias resulta em elevados valores de perda de umidade. Além disso, a presença de sal inibe a formação da barreira de açúcar, ocasionando também maiores taxas de desidratação, aumentando a força motriz que provoca a saída de água do produto.

4.2.3 Ganho de sólidos totais

A magnitude dos efeitos significativos para cada variável de estudo e suas interações para o ganho de sólidos do material desidratado osmoticamente estão demonstrados na Figura 4.4, segundo seu digrama de barras.

Figura 4.4–Estimativas dos efeitos para ganho de sólidos totais



Notação: CNaCl = concentração de cloreto de sódio, T = temperatura, C = concentração de soluto, t = tempo, = L= modelo matemático linear, Q = modelo matemático quadrático.

Fonte: o próprio autor (2017).

O efeito linear da concentração de soluto foi o fator que mais influenciou na resposta ganho de sólidos, conforme o histograma da Figura 4.4. Em seguida, têm-se os efeitos quadrático de temperatura e linear de tempo de imersão, os quais apresentaram-se praticamente na mesma ordem de magnitude. A temperatura (L) e a sua interação com a concentração de soluto apresentaram efeitos negativos para o ganho de sólidos. O aumento desses efeitos negativos proporcionaram uma redução do ganho de sólidos do material que é desejável para a desidratação osmótica. O ganho de sólidos do material deve ser o menor

possível. Os resultados da análise de variância (ANOVA) para o ganho de sólidos, excluindo os efeitos não significativos, estão apresentados na Tabela 4.4.

De acordo com a Análise de Variância mostrada na Tabela 4.4, percebe-se que o modelo apresentou regressão e falta de ajuste significativa ($p < 0,05$), com o valor de F calculado quatro vezes maior que o do F tabelado. Sendo considerado um modelo preditivo. O valor percentual do coeficiente de determinação (R^2) obtido para o modelo ajustado foi de 83,12%.

Tabela 4.4 – Análise de variância do modelo ajustado para ganho de sólidos totais

Ganho de sólidos totais					
Fonte	SQ¹	GL²	MQ³	Fcalculado	Ftabelado⁴
Regressão	371,3106	10	37,1311	8,8633	2,41
Resíduo	75,4073	18	4,1893	-	-
Falta de ajuste	74,8291	14	5,3449	36,9707	5,88
Erro puro	0,5783	4	0,1446	-	-
Total	446,7179	28	-	$R^2 = 0,8312$	

Notações: ¹SQ = soma quadrática, ²GL = grau de liberdade, ³MQ = média quadrática, ⁴Valores tabelados de F a $p < 0,05$.

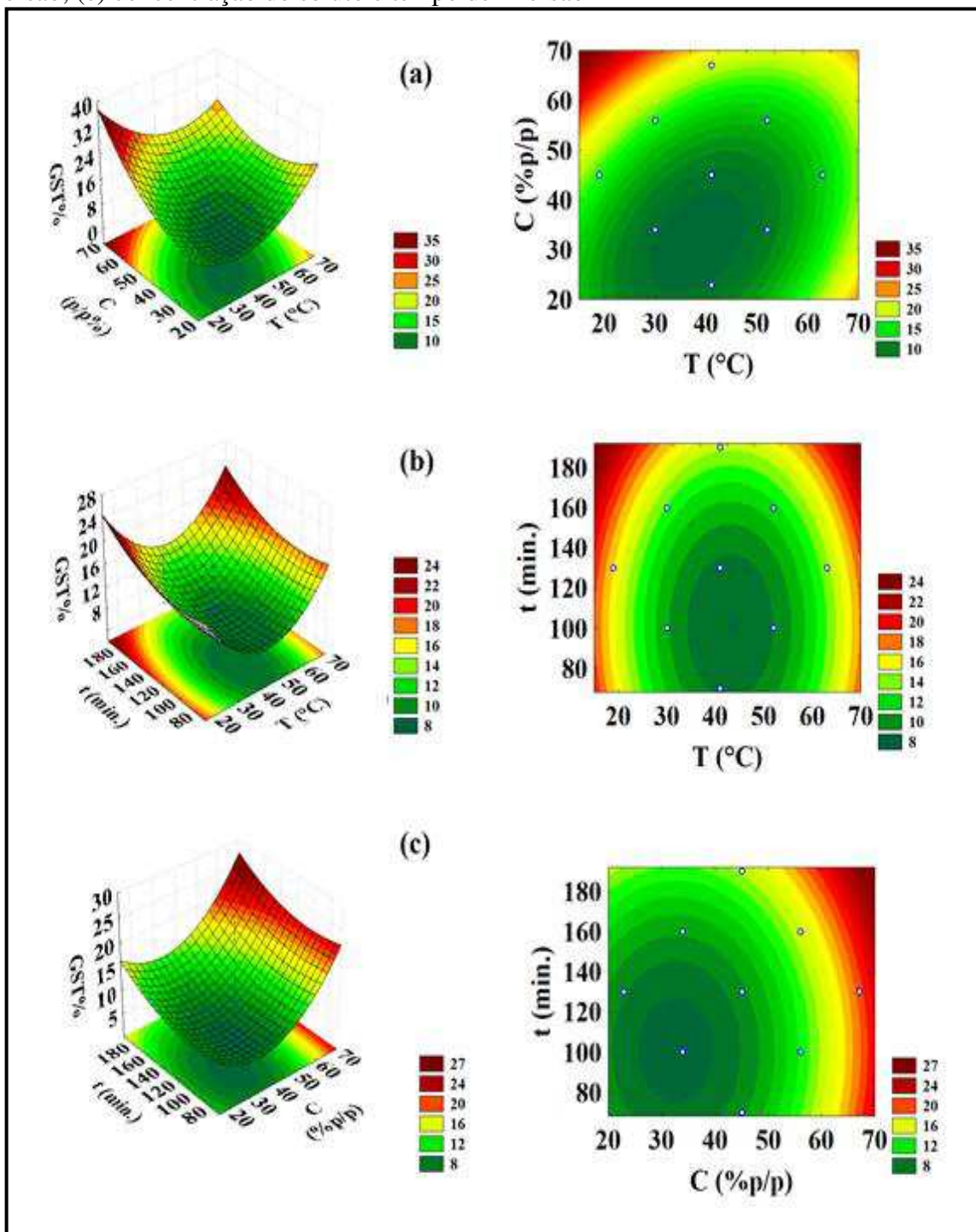
Fonte: o próprio autor (2017).

As Figuras 4.5 e 4.6 exibem as superfícies de resposta e as curvas de nível do modelo preditivo de ganho de sólidos para as variáveis de estudo (temperatura, concentração da solução osmótica, tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio). A Figura 4.5 apresenta os diagramas das relações da concentração de soluto com a temperatura e com o tempo de operação.

As informações da Figura 4.5 mostraram que o acréscimo no ganho de sólidos foi pronunciado em altas temperaturas e concentrações, superiores a 70°C e 65% p/p respectivamente. Estes resultados estão de acordo com as informações de Siqueira (2014) sobre a desidratação osmótica de gengibre. A elevação da temperatura promove o rompimento da célula vegetal facilitando a incorporação de solutos para o seu interior, e provoca a redução na viscosidade da solução, influenciando no aumento das taxas de transferência de massa entre o material e a solução hipertônica. Conforme informações anteriores, o sal provoca mudanças estruturais na célula, aumentando sua permeabilidade. Em soluções com baixa concentração de sal e altas concentrações de sacarose é possível que essa modificação estrutural na membrana promova a maior impregnação da sacarose no material. Fato este, que pode ilustrar uma certa dependência da sacarose pelo aumento de temperatura do meio para a sua incorporação no material. Resultados semelhantes foram encontrados por Genina-Souto et

al. (2011) através do estudo do efeito da temperatura e concentração de sacarose em soluções aquosas para a desidratação osmótica de cubos de batata-doce. Eles afirmam que mudanças indesejáveis nas características sensoriais do produto são adquiridas a partir do aumento de ganho de sólidos na desidratação osmótica.

Figura 4.5–Superfícies de respostas e curvas de níveis para ganho de sólidos totais do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão

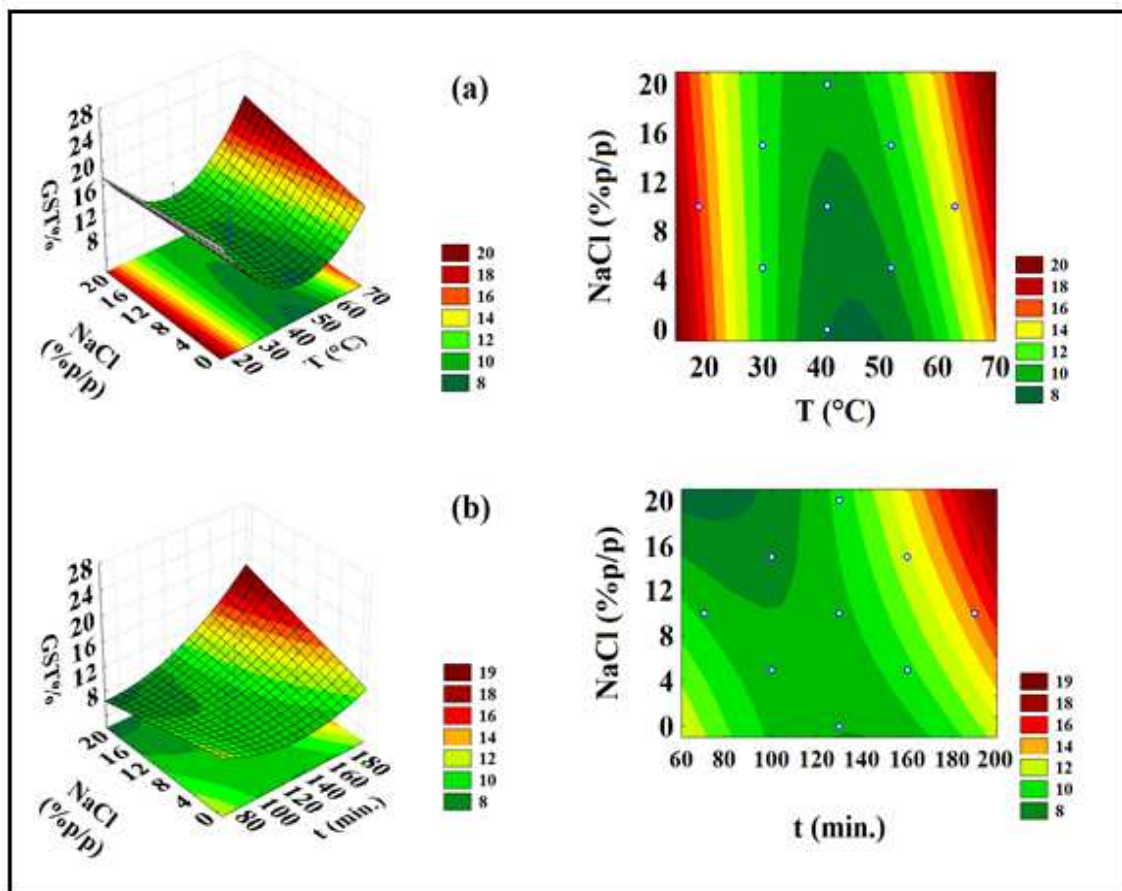


Fonte: o próprio autor (2017).

Uma análise das Figuras 4.5 (a), (b) e (c) indica que os menores ganhos de sólidos são alcançados com temperaturas na faixa de 30 a 52°C, concentrações de soluto de 23 a 45% p/p, e tempos de imersão de 70 a 135 minutos.

A Figura 4.6 apresenta as superfícies de resposta e as curvas de nível para o ganho de sólidos das relações da concentração de sal com a temperatura e com o tempo de operação.

Figura 4.6–Superfícies de respostas e curvas de níveis para ganho de sólidos totais do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (b) tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio



Fonte: o próprio autor (2017).

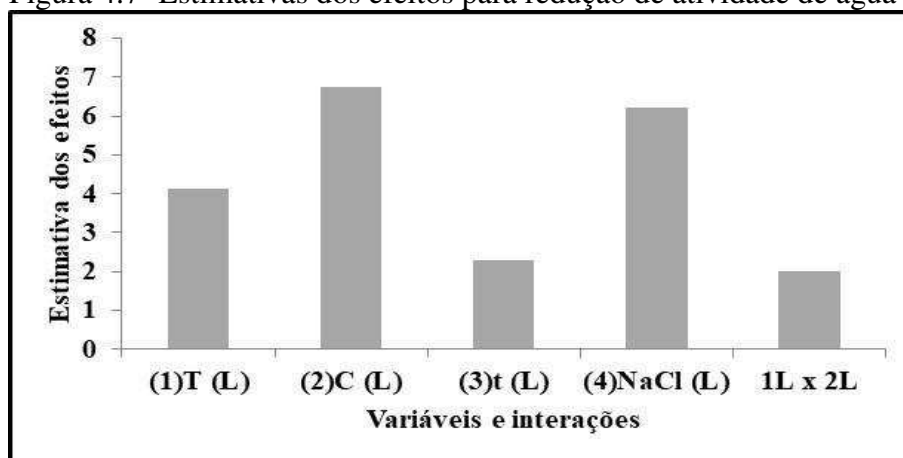
Nota-se na Figura 4.6 que os menores valores de ganho de sólidos estiveram relacionados com as seguintes faixas: temperaturas de 36 a 56°C, concentrações de cloreto de sódio de 0 a 15% p/p e tempos de imersão de 70 a 130 minutos. A Figura 4.6 mostrou que altos níveis de ganho de sólidos foram alcançados em baixas e altas temperaturas em toda faixa de concentração de cloreto de sódio. O efeito de incorporação desse soluto no material foi relativamente grande, devido principalmente ao seu baixo peso molecular, que facilitou consideravelmente seu transporte. Como o sal não depende inteiramente da temperatura para entrar no material a alta incorporação de sólidos se apresentou em baixas e altas temperaturas.

4.2.4 Redução de atividade de água

A Figura 4.7 apresenta o diagrama dos efeitos das variáveis para a redução de atividade de água.

A concentração de soluto na solução foi a variável que apresentou maior influência para a redução de atividade de água no material, segundo a Figura 4.7. As concentrações de soluto e de cloreto de sódio tiveram valores praticamente iguais. Todos os efeitos significativos influenciaram positivamente de forma linear para a redução de atividade de água.

Figura 4.7–Estimativas dos efeitos para redução de atividade de água



CNaCl = concentração de cloreto de sódio, C= concentração de soluto, T = temperatura, , L= modelo matemático linear, Q = modelo matemático quadrático.

Fonte: o próprio autor (2017).

A Tabela 4.5 apresenta os resultados na ANOVA para a redução de atividade de água das variáveis e suas interações, significativas estatisticamente, dos ensaios experimentais de desidratação osmótica.

Tabela 4.5 – Análise de variância do modelo ajustado para redução de atividade de água

Redução de atividade de água					
Fonte	SQ ¹	GL ²	MQ ³	Fcalculado	Ftabelado ⁴
Regressão	654,9427	5	130,9885	52,0735	2,64
Resíduo	57,8555	23	2,5155	-	-
Falta de ajuste	54,5268	19	2,8698	3,4485	5,82
Erro puro	3,3287	4	0,8322	-	-
Total	712,7982	28	-	R ² = 0,91883	

Notações: ¹SQ = soma quadrática, ²GL = grau de liberdade, ³MQ = média quadrática, ⁴Valores tabelados de F a p <0,05.

Fonte: o próprio autor (2017).

Os resultados da análise de variância apresentados na Tabela 4.5 mostraram que o modelo estatístico ajustado para redução de atividade de água foi considerado ideal, pois o mesmo apresentou regressão estatisticamente significativa (F calculado superior ao F

tabelado), e falta de ajuste não significativa (F calculado inferior ao F tabelado), ao nível de significância do teste. O valor do coeficiente de determinação (R^2) foi superior a 0,90. Assim, esse foi o melhor modelo preditivo estatisticamente até o momento expresso por:

$$RA_w = 11,940 - 2,060T + 3,380C + 1,139t + 3,106NaCl + 1,007TC \quad (4.1)$$

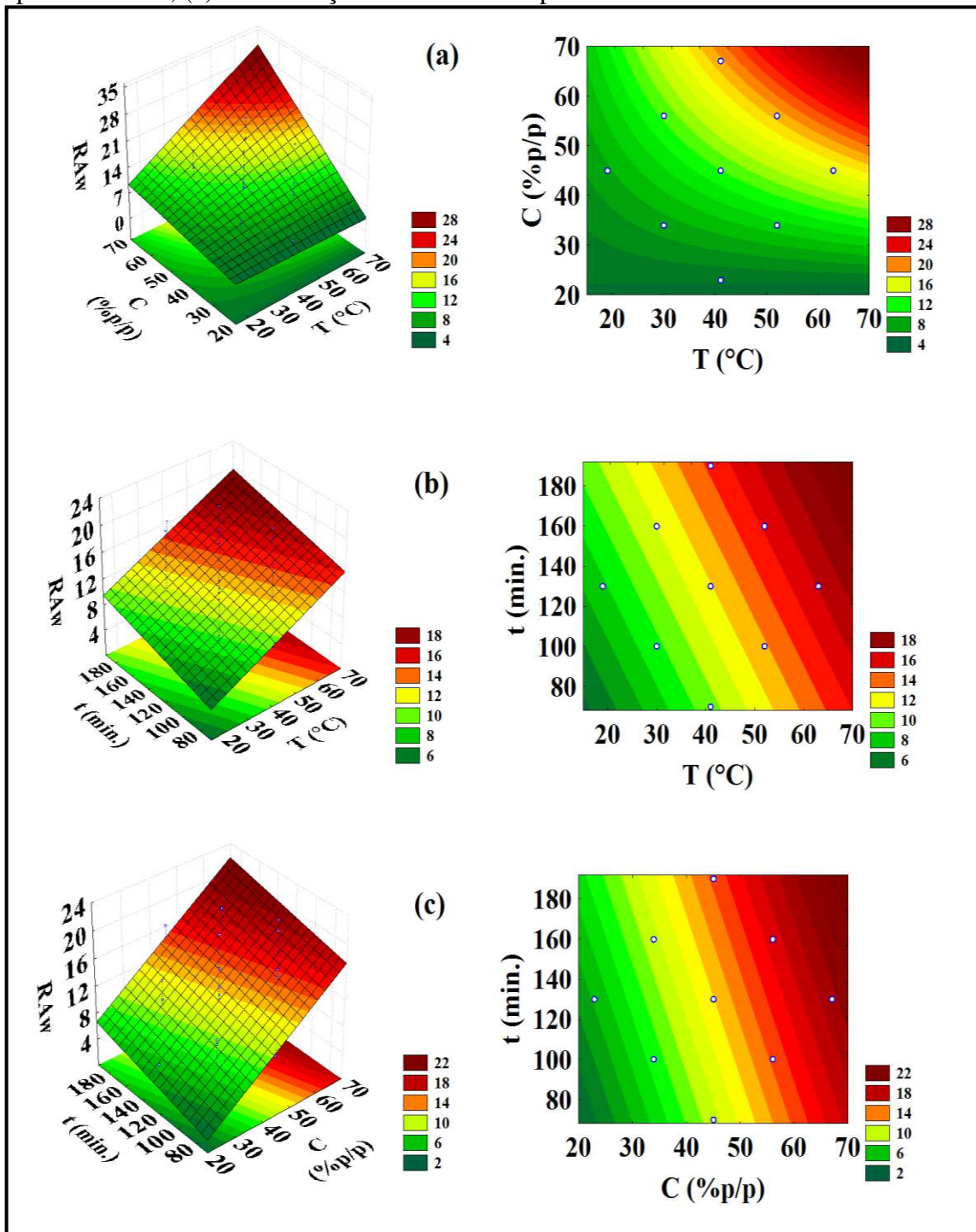
onde T = temperatura ($^{\circ}C$), $NaCl$ = concentração de cloreto de sódio (%), t = tempo de imersão (min), e C = concentração da solução osmótica (%).

As superfícies de resposta e as curvas de nível para a redução de atividade de água são mostradas nas Figuras 4.8 e 4.9. A Figura 4.8 apresenta os diagramas das relações da concentração de soluto com a temperatura e com o tempo de operação. Essa Figura demonstrou que os maiores valores para a redução de atividade de água foram alcançados nas condições de temperatura entre 41 a 63 $^{\circ}C$, concentrações de soluto entre 45 a 67% p/p e tempos de imersão entre 100 a 190 minutos.

Na Figura 4.9 são apresentadas as superfícies de resposta e as curvas de nível da redução de atividade de água para as relações da concentração de cloreto de sódio com a temperatura e com o tempo de operação. Os maiores valores de redução de atividade de água foram observados na mesma faixa de temperatura e tempo (43 a 63 $^{\circ}C$, 130 a 190 minutos) da Figura 4.8. Altos valores dessa variável resposta foram verificados em concentração de cloreto de sódio de 10 a 20% p/p.

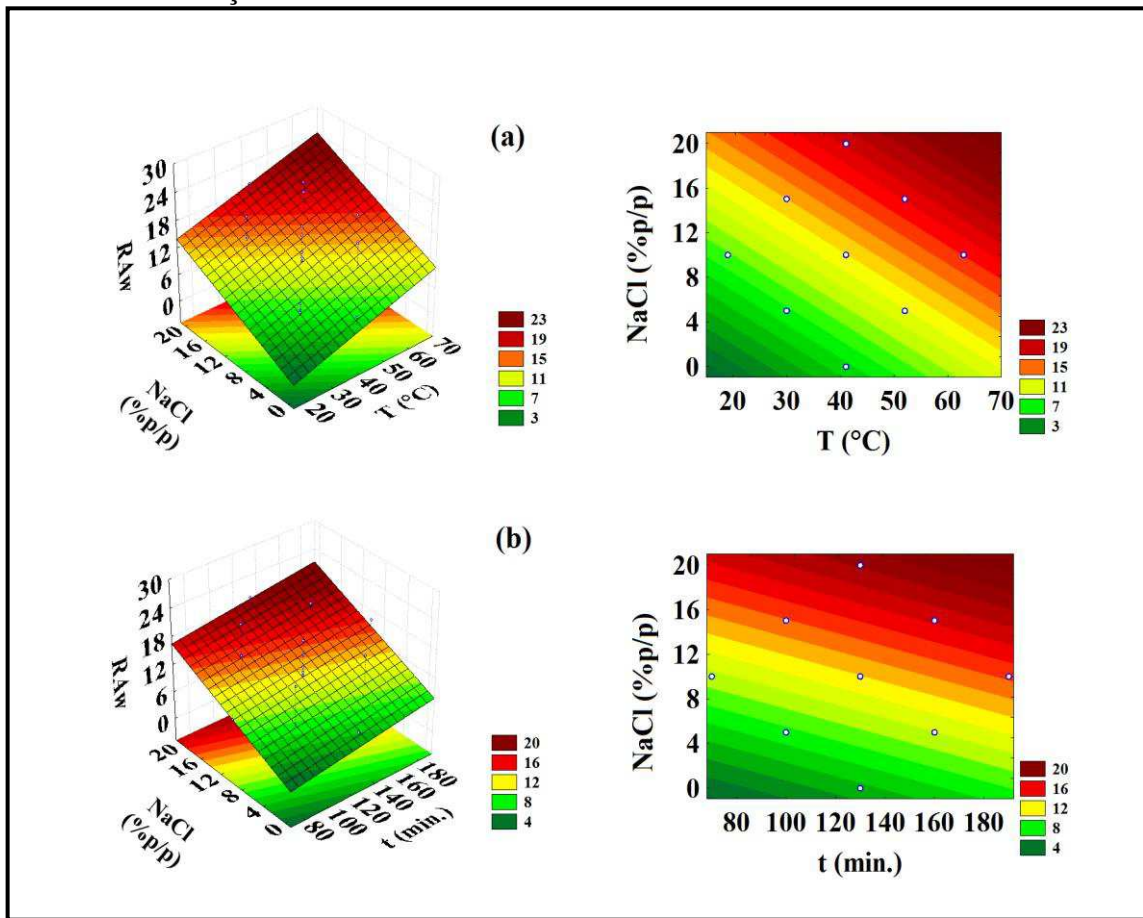
Segundo as Figuras 4.8 e 4.9, observa-se que a concentração de cloreto sódio foi a variável que apresentou maior influência para redução de atividade de água. O acréscimo do teor de cloreto de sódio na solução provoca maior saída de água e incorporação desse soluto no material. O sal apresenta uma elevada influência para a redução da atividade de água, pois é um composto eletrolítico que se dissocia em íons, os quais facilmente interagem com as moléculas de água. Isso não acontece com a sacarose, já que a mesma não é um composto eletrolítico e tem menor interação molecular com a água. Portanto, sua capacidade de redução de atividade de água é teoricamente menor que a do sal. Silveira (2014) observou que o aumento da redução de atividade de água em cenouras desidratadas com soluções contendo 5% p/p de cloreto de sódio foi maior do que em soluções de sacarose com 50% p/p de sacarose sob mesmas condições de operação.

Figura 4.8–Superfícies de respostas e curvas de níveis para redução de atividade de água do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão



Fonte: o próprio autor (2017).

Figura 4.9–Superfícies de respostas e curvas de níveis para redução de atividade de água do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (b) tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio



Fonte: o próprio autor (2017).

A temperatura aumentou a redução da atividade de água conforme os diagramas das Figuras 4.8 e 4.9a. Este comportamento é similar aos resultados de Mendonça (2014) para a desidratação osmótica de fatias de yacom com soluções osmóticas de xilitol e sorbitol, e com aplicação de ondas ultrassônicas. Ele observou que o aumento da concentração desses solutos e da intensidade das ondas ultrassônicas proporciona uma significativa elevação da redução de atividade de água do material.

A redução de atividade de água apresentou comportamento similar aos parâmetros de perda de massa, perda de umidade e ganho de sólidos, prevalecendo a concentração de soluto como variável mais influente na transferência de massa. Apesar dos valores de atividade de água terem diminuído após a desidratação osmótica em relação ao material *in natura*, ainda encontram-se muito acima da faixa de segurança recomendada (menor que 0,6) para inibir o crescimento de qualquer tipo de microrganismo. Baixos valores de atividade de água determinam a preservação e o acréscimo da vida útil do alimento, minimizando as alterações físicas, químicas e microbiológicas (LEE; LIM, 2011). Contudo, a desidratação osmótica é

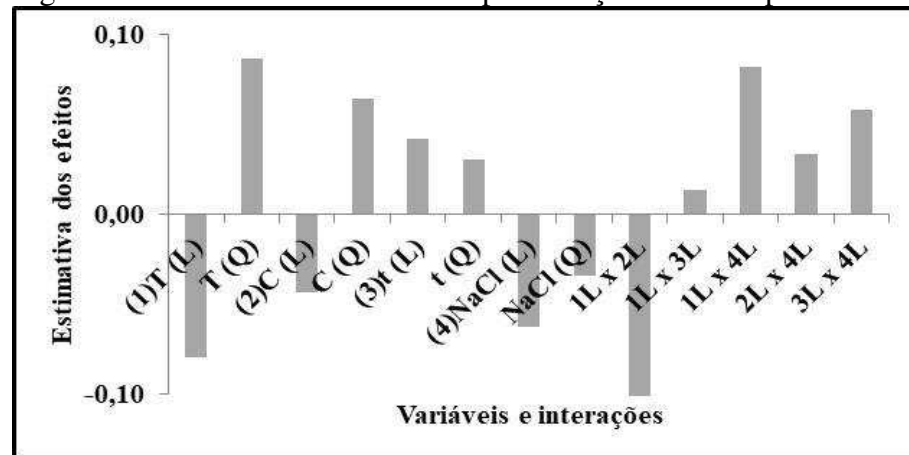
uma operação de redução de umidade que fornece produtos com teor de umidade intermediária. Os valores de atividade de água desses materiais não são eficientes para oferecer estabilidade ao produto, o qual deve ser submetido a outro tratamento térmico para diminuí-la e, assim, obter-se a estabilidade requerida do produto (EGEA; LOBATO, 2014).

4.2.5 Relação de desempenho adotada para avaliar a operação

Para a otimização do processo de desidratação de cubos de mandioca deve-se relacionar as condições de mínimo ganho de sólidos com as máximas perdas de umidade e de redução de atividade de água do material. Portanto, foram utilizadas como parâmetros de avaliação da operação a relação de desempenho (RD) expressa pela razão entre o ganho de sólidos totais e a perda de umidade e a redução da atividade de água. Os resultados de perda de umidade, ganho de sólidos, e de redução de atividade de água já foram discutidos nos itens 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4 respectivamente. Nesse momento, serão apresentados os resultados da análise estatística do planejamento experimental para a relação de desempenho adotada para a desidratação osmótica de cubos de mandioca. Essas informações serão combinadas com as informações de redução de atividade de água e de outras respostas, caso necessário, para a determinação da faixa otimizada de operação das variáveis de estudo (temperatura, tempo, concentrações de soluto e de sal).

O diagrama de barras (Figura 4.10) mostra a proporção dos efeitos significativos de cada parâmetro e suas interações para relação de desempenho da operação. Através dessa Figura, observa-se que os parâmetros lineares de temperatura, concentração de soluto, concentração de cloreto de sódio, diminuíram o valor da relação de desempenho, assim como o parâmetro quadrático de cloreto de sódio e a interação entre temperatura e concentração de soluto. O acréscimo nesses valores negativos promoveu a redução da relação de desempenho, representando uma vantagem para esse processo que foi minimizar o valor da relação entre o ganho de sólidos e da perda de umidade (GS/PU).

Figura 4.10–Estimativas dos efeitos para relação de desempenho



CNaCl = concentração de cloreto de sódio, T = temperatura, C= concentração de soluto, t = tempo, L= modelo matemático linear, Q = modelo matemático quadrático.

Fonte: o próprio autor (2017).

A Tabela 4.6 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) dos efeitos significativos apresentados na Figura 4.10 para a relação de desempenho adotada de desidratação osmótica de cubos de mandioca.

Tabela 4.6 – Análise de variância do modelo ajustado para relação de desempenho

Relação de desempenho					
Fonte	SQ ¹	GL ²	MQ ³	Fcalculado	Ftabelado ⁴
Regressão	0,2655	13	0,0204	3,2225	2,43
Resíduo	0,0951	15	0,0063	-	-
Falta de ajuste	0,0948	11	0,0086	137,0426	5,93
Erro puro	0,0003	4	0,0001	-	-
Total	0,3605	28	-	R ² = 0,73635	

Notações: ¹SQ = soma quadrática, ²GL = grau de liberdade, ³MQ = média quadrática, ⁴Valores tabelados de F a p < 0,05.

Fonte: o próprio autor (2017).

Pela Tabela 4.6, observa-se que o modelo proposto para relação de desempenho não foi considerado preditivo, pois o Fcalculado da regressão não foi de três a cinco vezes maior que seu F tabelado (SCHMIDT; SALAS MELLADO 2009). Esse modelo foi expresso por:

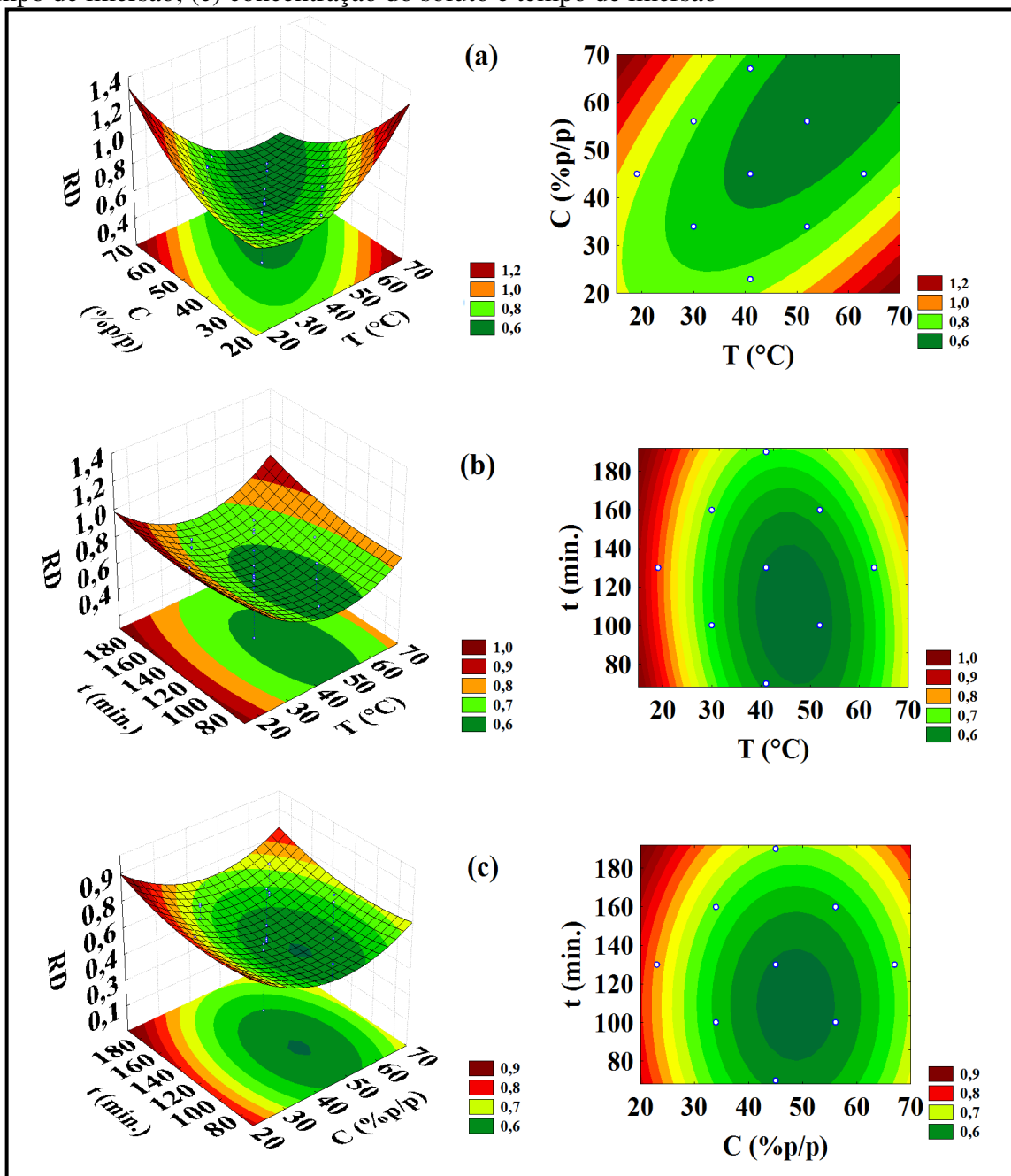
$$RD=0,572-0,039T-0,043T^2-0,022C+0,032C^2+0,021t+0,015t^2-0,031NaCl-0,017NaCl^2-0,055TC+0,007Tt+0,041TNaCl+0,017CNaCl+0,029tNaC \quad (4.2)$$

onde T= temperatura (°C), NaCl = concentração de cloreto de sódio (%), t= tempo de imersão (min), e C= concentração da solução osmótica (%).

Como o modelo estatístico para relação de desempenho não foi preditivo, ele não gera previsão dos dados observados porque cobre uma faixa de variação pequena dos fatores estudados. Porém, mesmo não gerando previsão, ele é adequado para descrever a tendência dos dados observados e construir as superfícies de respostas (GERMER et al., 2010).

As superfícies de resposta e as curvas de nível para relação de desempenho estão apresentadas pelas Figuras 4.11 e 4.12.

Figura 4.11–Superfícies de respostas e curvas de níveis para relação de desempenho do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão



Fonte: o próprio autor (2017).

A Figura 4.11 ilustra que menores valores de relação de desempenho foram obtidos em temperaturas na faixa de 35°C a 56°C, concentrações de soluto entre 34 a 67% p/p, por tempos de imersão na faixa 70 a 190 minutos.

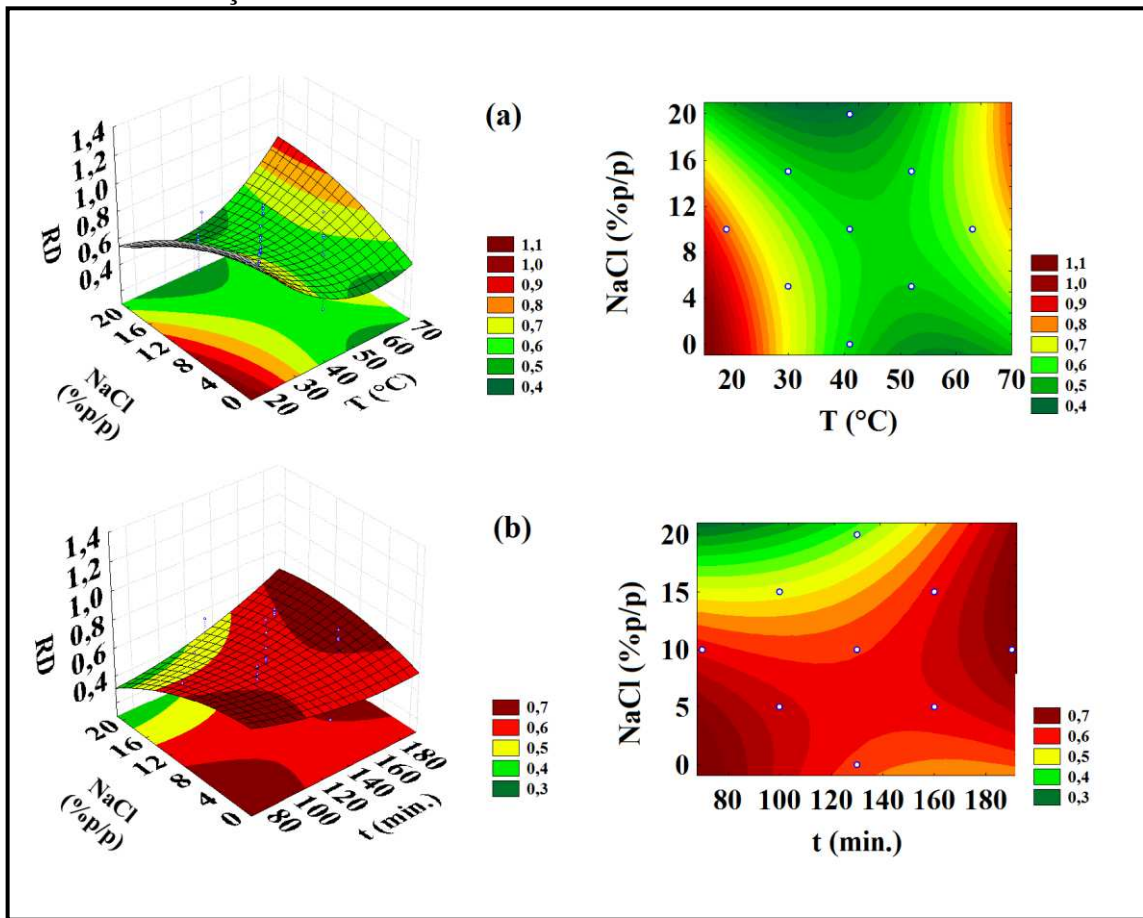
Esses resultados da faixa otimizada de temperatura se encontraram de acordo com as informações de Souza et al. (2012) sobre a desidratação osmótica de polpa de abacate (*Persea americana L.*), na forma de paralelepípedo e em diferentes concentrações das soluções de sacarose (30 e 60% p/p), espessura do corte (0,5 e 1 cm) e temperatura (25 e 45 °C). Eles concluíram que os menores índices para relação ganho de sólidos e perda de umidade (GS/PU) foram observados em alta temperatura (45 °C) com valor aproximado de 0,41.

Siqueira (2014) também constatou que o índice de eficiência da desidratação osmótica estudado pela razão entre a perda de umidade e ganho de sólidos apresentou melhor resultado na temperatura de 50°C, quando estudando desidratação osmótica de gengibre nas seguintes condições, temperatura de imersão (30 e 50 °C), concentrações das soluções de sacarose (20 e 50% p/p), tempo de imersão (2 e 4 horas), concentração de cloreto de sódio (0 e 3% p/p), geometria do corte (cúbico e fatia), cobertura de alginato (0 e 2%p/p) e agitação (0 e 160 rpm).

A Figura 4.12 relaciona a temperatura e o tempo com a concentração de cloreto de sódio através das superfícies de resposta e das curvas de nível para a relação de desempenho da desidratação osmóticas de cubos de mandioca.

De acordo com a Figura 4.12, os menores valores de relação de desempenho, foram alcançados em temperaturas na faixa de 30 a 63°C, concentrações de cloreto de sódio entre 15 a 20% p/p, por tempos de imersão na faixa de 100 a 130 minutos. A faixa otimizada da concentração de sal da relação de desempenho foi ampla, com altos valores, próximos a 20% em peso. Altas concentrações de sal não foram desejáveis do ponto de vista do processo como discutido anteriormente. Assim, devem ser incluídos os resultados das outras respostas do DCCR para a determinação da faixa otimizada de cloreto de sódio para as variáveis de estudo. Para isto, foram utilizadas as informações da Figura 4.9 (a) que mostra que menores níveis de ganho de sólidos são alcançados na faixa de 0 a 15%.

Figura 4.12–Superfícies de respostas e curvas de níveis para relação de desempenho do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (b) tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio



Fonte: o próprio autor (2017).

Através da análise conjunta das Figuras 4.6 (a), 4.9, 4.11 e 4.12 para as condições ótimas de ganho de sólidos totais, redução de atividade de água e relação de desempenho, para a desidratação osmótica de cubos de mandioca em soluções ternárias obteve-se a seguinte faixa de operação otimizada para as variáveis de estudo: temperatura na faixa de 41 a 60°C, concentração de soluto entre 45 a 60% p/p, concentrações de cloreto de sódio de 8 a 15% p/p e tempo de imersão de 100 a 190 minutos.

Os ensaios realizados com maiores conteúdos de cloreto de sódio apresentaram os melhores resultados para a operação. Porém o uso de altas concentrações de cloreto de sódio proporcionaram produtos desidratados com alto conteúdo de sal, esse fato pode restringir ou impedir o seu consumo e uso em formulações alimentares.

Para se definir valores pontuais operacionais na faixa otimizada obtida para menores conteúdos de sal, deve-se utilizar os modelos estatísticos preditivos obtidos para os principais parâmetros de avaliação da operação, tais como: Redução da atividade de água e Relação de Desempenho. No entanto, a Relação de Desempenho não apresentou um modelo estatístico

ideal, pois sua falta de ajuste calculada apresentou maiores valores em relação aos seus resultados tabelados, teóricos. Isto implica em desvios significativos dos valores estimados pelo modelo em relação aos obtidos experimentalmente com o uso dos valores otimizados das variáveis de estudo encontrados para a Relação de Desempenho. Em contrapartida, a Redução de atividade de água apresentou um modelo estatístico ideal. Assim, foram realizadas estimativas teóricas através desse modelo estatístico comparando seus resultados com os valores obtidos experimentalmente para a região otimizada e análise dos desvios médios entre esses dados, cujas informações estão apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Comparação dos resultados da Redução de atividade de água obtidos experimentalmente e pelo modelo estatístico com os valores otimizados de operação da desidratação osmótica de cubos de mandioca

Ensaio	Tratamentos				Resultados de Redução de atividade de água, RAw (%)		
	T (°C)	C (% p/p)	T (min.)	Sal (% p/p)	Dados experimentais	Dados obtidos pelo modelo estatístico ⁱ	Desvio dos dados (%)
16	52(+1)	56(+1)	160(+1)	15(+1)	19,581	18,512	5,459
22	41(0)	45(0)	190(+2)	10(0)	16,523	14,218	13,950
25 a 29	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	11,437 ⁱⁱ	11,940	4,213

Notações: i = valores obtidos pela Equação (4.4) apresentada na Seção 4.2.4, ii = média dos valores dos pontos centrais

Fonte: o próprio autor (2017).

Pode-se verificar através dos resultados da Tabela 4.7 que, o ensaio 16 apresentou a maior redução de atividade de água e o menor valor para a relação de desempenho dentro da faixa de operação otimizada em relação aos demais ensaios e um baixo desvio entre o seu valor estimado e experimental. Isto indica que as condições experimentais utilizadas neste ensaio de temperatura, concentração de soluto e tempo podem ser consideradas como os valores pontuais otimizados para desidratação osmótica de cubos de mandioca. Porém, a concentração de sal utilizada nesse ensaio foi o limite máximo adotado para a faixa otimizada de cloreto de sódio (8 a 15% em peso de solutos), ou seja, o maior conteúdo de sal utilizável. Portanto, faz necessário reduzir esse teor de sal e verificar se a redução de atividade de água permanece apresentando valores superiores a 15% através do seu modelo preditivo e ideal. A condição otimizada baseada nos valores estimados pelo modelo estatístico que forneceu um resultado de 16,54% para a redução de atividade de água com menor conteúdo de sal foi obtida a 52 °C, 56% em peso de solutos, 10% em peso de cloreto de sódio, 190 minutos e 180 rpm de agitação. Os valores de temperatura e concentração de soluto foram iguais aos utilizados no ensaio 16, porém com menor conteúdo de sal (10%) e maior tempo de operação (190 min). Essa condição pontual foi definida como otimizada e utilizada para os posteriores estudos da cinética de desidratação osmótica e secagem convectiva dos cubos de mandioca.

4.2.6 Avaliação das incorporações de sólidos solúveis nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente

Nesse tópico serão avaliados os resultados do DCCR aplicado para desidratação dos cubos de mandioca para as incorporações de sólidos solúveis, de sacarose e de cloreto de sódio nas amostras a fim de se averiguar os efeitos das variáveis de operação (concentração de soluto e de sal, temperatura e tempo) no comportamento inicial do processo de transporte mássico desses solutos para a matriz sólida. A avaliação desses parâmetros é importante para uma análise prévia de possíveis efeitos que podem ocorrer no estudo da cinética de desidratação osmótica dos cubos de mandioca apresentado nos próximos tópicos. Os resultados dessa triagem estatística visa apresentar informações sobre o efeito da magnitude dos valores definidos para essas variáveis operacionais, condição otimizada de operação, para os ensaios cinéticos que avaliam o efeito do transporte de solutos da solução desidratante para os sólidos particulados e o conteúdo de umidade desses para essa solução em relação ao tempo de operação. Portanto, as informações a seguir apresentam os resultados estatísticos do DCCR para essas incorporações, através dos diagramas de significância dos efeitos das variáveis operacionais, curvas de níveis para apreciação das condições de maiores e menores valores desses parâmetros e a estimativa de um prévio comportamento de suas taxas mássicas no decorrer dessa operação.

A condição operacional definida nos tópicos anteriores para a realização dos ensaios experimentais de cinética de desidratação osmótica é provavelmente a principal responsável pelo comportamento de transporte de umidade e de solutos. Assim, encerra-se esse tópico com informações sobre potenciais efeitos que essa condição pode transferir ao comportamento de transporte de massa da solução/sólido em função do tempo.

Os resultados obtidos de incorporações de sólidos solúveis, cloreto de sódio e sacarose dos ensaios de desidratação osmótica dos cubos de mandioca em soluções de sacarose e cloreto de sódio se encontram na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Valores experimentais das variáveis respostas para desidratação osmótica de cubos de mandioca em soluções de sacarose e cloreto de sódio

Ensaio	Tratamentos				Variáveis respostas		
	T (°C)	C (% p/p)	t (min.)	Sal (% p/p)	IS ¹ (%)	I _{NaCl} ² (%)	I _{Sac} ³ (%)
1	30(-1)	34(-1)	100(-1)	5(-1)	1,775	0,447	3,697
2	52(+1)	34(-1)	100(-1)	5(-1)	8,454	1,114	2,867
3	30(-1)	56(+1)	100(-1)	5(-1)	15,789	0,814	1,379
4	52(+1)	56(+1)	100(-1)	5(-1)	16,877	1,042	7,057
5	30(-1)	34(-1)	160(+1)	5(-1)	6,551	0,645	3,428
6	52(+1)	34(-1)	160(+1)	5(-1)	9,277	1,438	4,142
7	30(-1)	56(+1)	160(+1)	5(-1)	13,701	0,708	1,136
8	52(+1)	56(+1)	160(+1)	5(-1)	20,066	1,142	7,290
9	30(-1)	34(-1)	100(-1)	15(+1)	12,509	2,709	2,124
10	52(+1)	34(-1)	100(-1)	15(+1)	9,926	4,126	2,120
11	30(-1)	56(+1)	100(-1)	15(+1)	14,023	3,015	2,856
12	52(+1)	56(+1)	100(-1)	15(+1)	19,450	3,413	5,681
13	30(-1)	34(-1)	160(+1)	15(+1)	7,068	1,965	2,321
14	52(+1)	34(-1)	160(+1)	15(+1)	10,384	5,181	3,090
15	30(-1)	56(+1)	160(+1)	15(+1)	10,828	3,486	4,919
16	52(+1)	56(+1)	160(+1)	15(+1)	21,156	4,192	5,873
17	19(-2)	45(0)	130(0)	10(0)	9,777	1,417	0,141
18	63(+2)	45(0)	130(0)	10(0)	10,016	2,097	1,600
19	41(0)	23(-2)	130(0)	10(0)	3,965	2,274	1,953
20	41(0)	67(+2)	130(0)	10(0)	11,691	1,689	5,743
21	41(0)	45(0)	70(-2)	10(0)	8,160	1,795	3,839
22	41(0)	45(0)	190(+2)	10(0)	16,494	2,361	5,720
23	41(0)	45(0)	130(0)	0(-2)	8,062	-0,028	5,855
24	41(0)	45(0)	130(0)	20(+2)	16,677	4,777	2,450
25	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	13,800	2,233	6,750
26	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	11,935	1,968	5,963
27	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	12,382	2,041	4,696
28	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	12,471	2,014	5,675
29	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	11,516	1,661	4,851

Notações: ¹IS= incorporação de sólidos, ²I_{NaCl} = incorporação de cloreto de sódio, ³I_{Sac}= incorporação de sacarose

Fonte: o próprio autor (2017).

De acordo com a Tabela 4.8, as faixas das variáveis respostas foram: a) Incorporação de sólidos solúveis de 2 a 21% b) Incorporação de cloreto de sódio de -0,03 a 5% e c) Incorporação de sacarose de 0,1 a 7,2%. Deste modo, examinando esses valores percebe-se que:

a) Na Tabela 4.8, observa-se que o aumento da temperatura nas mesmas condições de concentração de soluto, tempo e concentração de sal provocou aumento da incorporação de sólidos solúveis, cloreto de sódio e sacarose, exceto para os ensaios 9 e 10. Nesses ensaios, o aumento da temperatura provocou ligeira diminuição de incorporação de sólidos solúveis, o valor de incorporação de sacarose permaneceu inalterado. Com relação a diminuição da incorporação de sólidos solúveis, provavelmente deve ter ocorrido erro experimental (coleta de dados), uma vez que os sólidos solúveis representam a totalidade dos sólidos dissolvidos

na água e as concentrações de sal e sacarose não diminuíram nesses ensaios (ver Apêndice A). Durante as análises foi observado que os valores de °Brix obtidos através do refratômetro de bancada oscilavam bastante.

b) O aumento da concentração de cloreto de sódio nos ensaios com iguais temperaturas, concentração de soluto e tempo, gerou aumento das incorporações de sólidos solúveis e cloreto de sódio, porém diminuição da incorporação de sacarose. Esse fato não ocorreu nos ensaios 3 e 11 e 7 e 15, onde houveram diminuição da incorporação de sólidos solúveis e aumento da incorporação de sacarose. O aumento da incorporação de sacarose se deve ao uso conjunto de alta concentração de soluto (56%) com alta concentração de cloreto de sódio (15%) na solução. O sal facilita a entrada de açúcar no material porque desestabiliza a membrana plasmática alterando sua seletividade com relação a molécula de açúcar (ALMUTHASEB et al., 2010; HEREDIA et al., 2009). A diminuição da incorporação de sólidos solúveis se deve possivelmente a erros experimentais (coleta de dados), uma vez que as concentrações de cloreto de sódio e sacarose aumentaram nos respectivos ensaios (ver Apêndice A).

c) Observa-se na Tabela 4.8, que houve decréscimo na faixa de incorporação de NaCl quando o material foi submetido a desidratação com solução cuja concentração foi (45% sacarose e 0% de sal) ensaio 23. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato do cloreto de sódio ser uma substância eletrolítica, que, portanto, se dissocia em íons, que interagem com as moléculas de água. Como a concentração desse soluto na amostra *in natura* (0,13%) foi maior do que na solução (0%), ele dissociou-se na solução osmótica de sacarose. Ocorrendo assim, a perda desse soluto da amostra para a solução desidratante, representada pelo menor valor da concentração de sal no material desidratado (ver Apêndice A) em relação ao *in natura* (0,13%) que representa seu estado inicial. Fato este, que é confirmado pelo sinal negativo na Tabela 4.8 para incorporação de cloreto de sódio do referido ensaio. Já a sacarose, por ser uma substância não eletrolítica, não se dissocia na forma de íons, assim o número de moléculas de água interagindo com este soluto foi bem menor.

d) Praticamente não houve incorporação de sacarose na amostra do ensaio 17. Esse mesmo ensaio apresentou concentração de sacarose (ver Apêndice A) similar a do seu conteúdo inicial (2,29%). Isso pode ser explicado pelo efeito da baixa temperatura (19°C). A literatura fala que baixas temperaturas aumentam a viscosidade da solução osmótica, diminuindo a

mobilidade da matriz sólida e dificultando a entrada de sacarose no material desidratado (DEEPIKA; GAYATHRI, 2015; MERCALI et al., 2010; MERCALI et al., 2011b; METHA et al., 2013; MOKHTARIAN et al., 2014; MONNERAT et al., 2010; PHISUT, 2012).

e) Nos ensaios 1 e 3 e 5 e 7 com temperatura de (30°C), baixa concentração de NaCl (5%) e com tempos de imersão iguais, o aumento da concentração de sacarose (soluto), diminuiu a incorporação da mesma no material desidratado. Quando aumentou a concentração de sacarose na solução osmótica, formou-se uma película de açúcar na superfície do material agindo como barreira e impedindo a entrada de sacarose no mesmo. O mesmo comportamento foi observado por Fernandes (2012), estudando a obtenção de chips de berinjela mediante o processo combinado de desidratação osmótica em solução ternária e secagem convectiva.

f) Nos ensaios com temperatura (30°C), alta concentração de NaCl (15%), e com mesmo tempo de imersão, houve aumento da incorporação de sacarose no material desidratado com o aumento da concentração de sacarose (soluto) na solução desidratante. A incorporação de sacarose foi facilitada provavelmente pela alta concentração de cloreto de sódio. Perez et al. (2013) e Wang et al. (2013) verificaram que a presença do sal inibe a formação de uma parede de sacarose na superfície do alimento, facilitando a entrada da mesma na matriz sólida.

g) Nos ensaios com alta temperatura (52°C) e baixas concentração de NaCl (5%), quando houve aumento da concentração de sacarose (soluto), elevou-se a incorporação da mesma no material desidratado. Altas temperaturas promovem o aumento da mobilidade da matriz sólidas, facilitando a entrada do soluto (MERCALI et al., 2010; METHA et al., 2013; MOKHTARIAN et al., 2014; YUAN, et al., 2018).

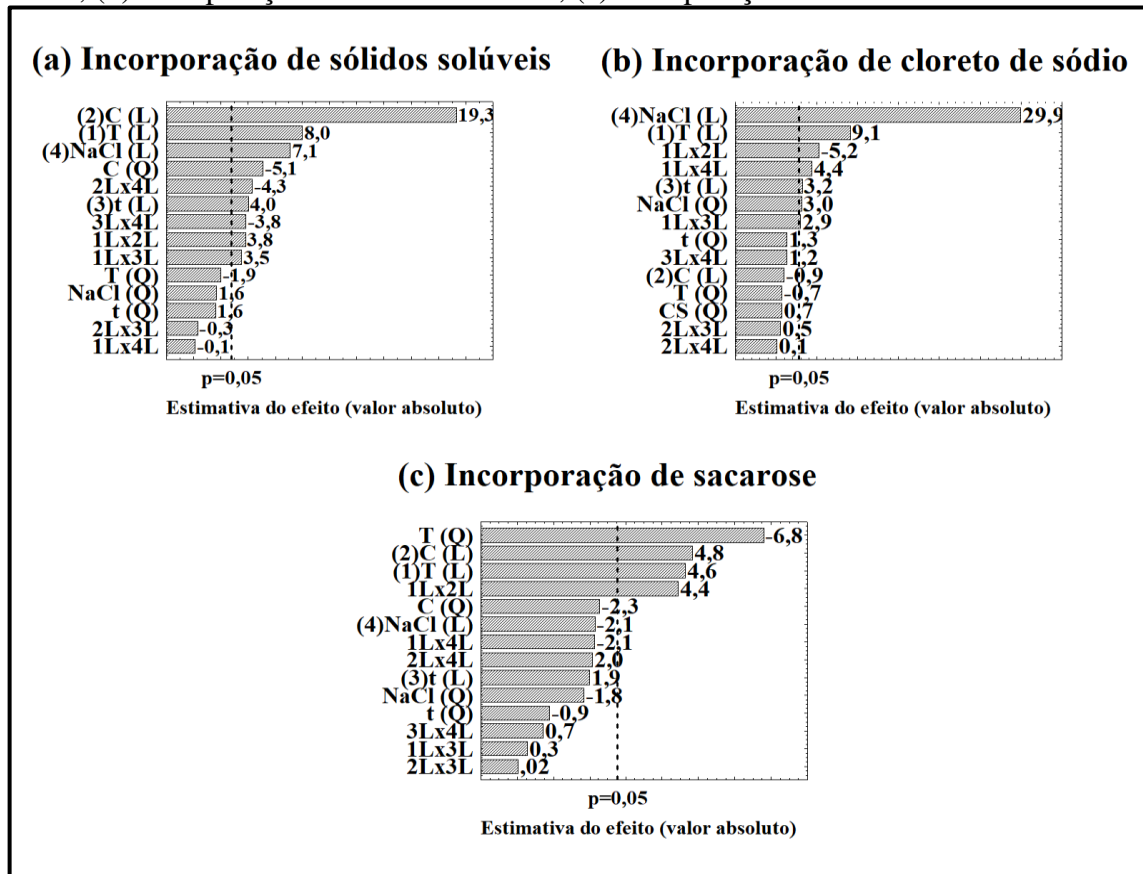
h) A maioria dos ensaios apresentou elevação da incorporação de cloreto de sódio na amostra desidratada, com exceção do ensaio 23 cuja concentração de cloreto de sódio na solução foi de 0%. Como os íons de cloreto de sódio são pequenos, eles possuem facilidade de penetrar na matriz sólida do material. Os mesmos promovem maior incorporação de sólidos devido o aumento da força motriz provocada pela maior saída de água do material (AL-MUTHASEB et al., 2010; HEREDIA et al., 2009).

Com os dados dos valores das variáveis respostas obtidas a partir das análises experimentais, foi realizada a análise estatística do DCCR aplicado para verificar o nível de significância dos efeitos através dos gráficos de Pareto e das curvas de níveis.

Para melhor ilustrar o efeito dessas quatro variáveis de operação, a Figura 4.13 apresenta o diagrama de Pareto mostrando os efeitos significativos sobre as incorporações de sólidos solúveis, cloreto de sódio e sacarose e suas respectivas importâncias.

O efeito positivo provocado pela concentração de soluto e temperatura na Figura 4.13 (a) e pela concentração de cloreto de sódio e temperatura na Figura 4.13 (b) para as incorporações de sólidos solúveis e cloreto de sódio respectivamente, mostra que a grandeza dessas variáveis de operação afeta diretamente no aumento destas variáveis respostas. Ao passo que o efeito negativo provocado pela temperatura na Figura 4.13 (c), indica que quanto maior a temperatura menor é a incorporação de sacarose. A Figura 4.16 permite uma melhor visualização do efeito da temperatura sobre a incorporação de sacarose.

Figura 4.13—Gráfico de Pareto dos efeitos das variáveis sobre: (a) incorporação de sólidos solúveis; (b) incorporação de cloreto de sódio; (c) incorporação de sacarose

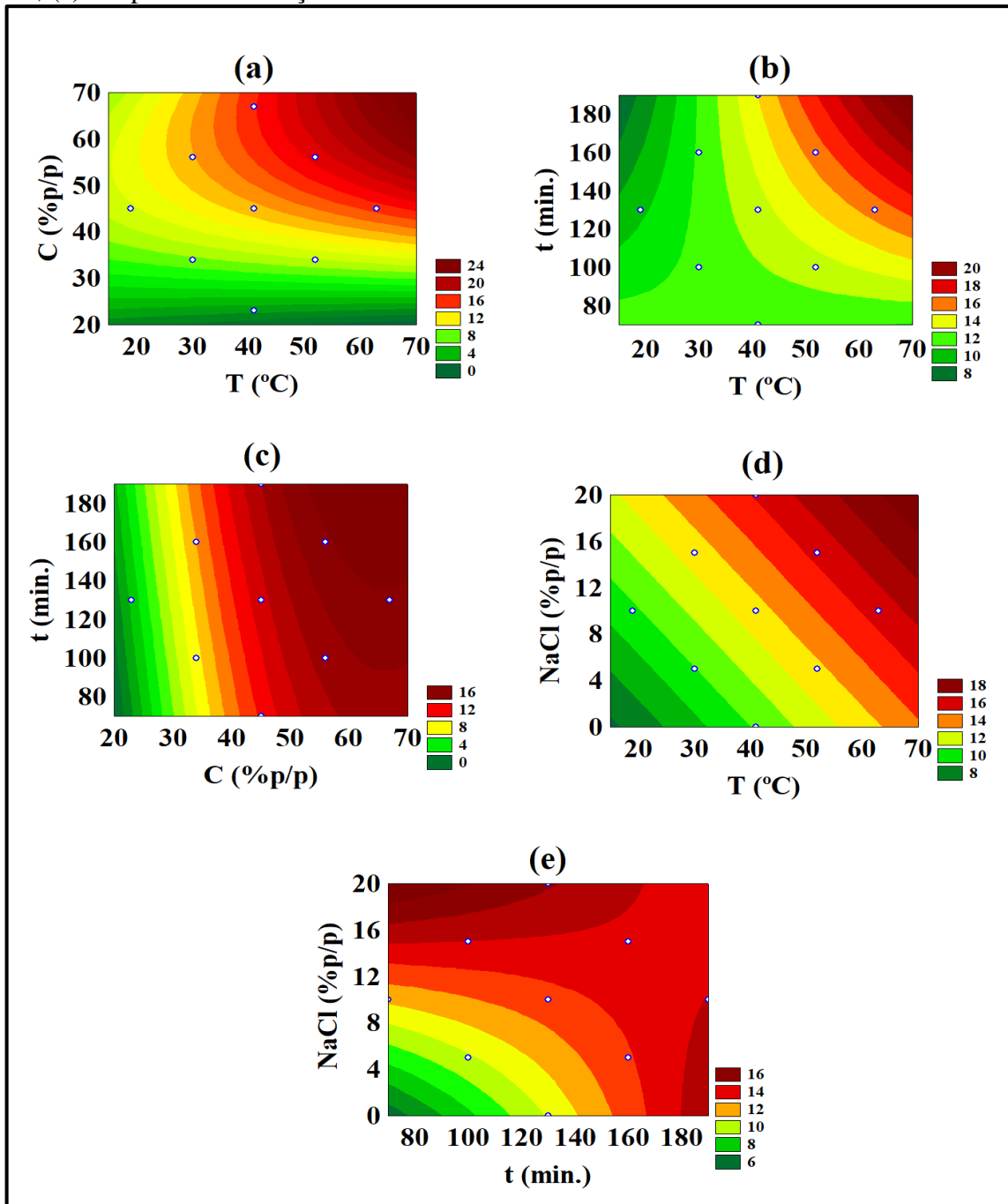


CNaCl = concentração de cloreto de sódio, T = temperatura, C = concentração de soluto, t = tempo, L = modelo matemático linear, Q = modelo matemático quadrático.

Fonte: o próprio autor (2018).

As curvas de nível para incorporações de sólidos solúveis sob diferentes temperaturas, concentrações de soluto, concentrações de cloreto de sódio e tempos, a partir do DCCR aplicado, estão apresentadas na Figura 4.14.

Figura 4.14–Curvas de níveis para incorporação de sólidos solúveis do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão; (d) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (e) tempo e concentração de cloreto de sódio



Fonte: o próprio autor (2017).

A Figura 4.14 mostra a significativa influência das variáveis de operação concentração de soluto e temperatura, sobre a incorporação de sólidos solúveis durante a desidratação osmótica de cubos de mandioca em soluções ternárias de sacarose e cloreto de sódio. Quanto a incorporação de sólidos, a literatura explica que a taxa de transferência no processo de desidratação osmótica depende em grande parte do peso molecular do soluto, bem como das

variáveis do processo, tais como a concentração da solução e a temperatura (LAZARIDES et al., 1995).

Os sólidos solúveis ($^{\circ}$ Brix) contidos nos alimentos correspondem ao total de todos os sólidos dissolvidos na água, constituído na sua maioria por açúcares e em menor quantidade por sais, proteínas, ácidos, gorduras e etc. A leitura dos valores medidos é a soma total destes componentes (MORAES, 2006). De acordo com a Figura 4.14, nota-se que a concentração de soluto foi o fator que mais influenciou a incorporação de sólidos solúveis. Esse ocorrido, explica que a incorporação dos sólidos solúveis está diretamente ligada a todos os sólidos solúveis totais contidos na amostra. Entretanto, isso não aconteceu com a incorporação de sacarose, pois o aumento da mesma foi influenciado principalmente pela temperatura do processo e não pela concentração do soluto, como mostra as Figuras 4.13 (c) e 4.16. Apesar dos sólidos solúveis serem constituídos em sua maior parte por açúcares, seu comportamento não foi igual ao da incorporação de sacarose na desidratação osmótica de cubos de mandioca.

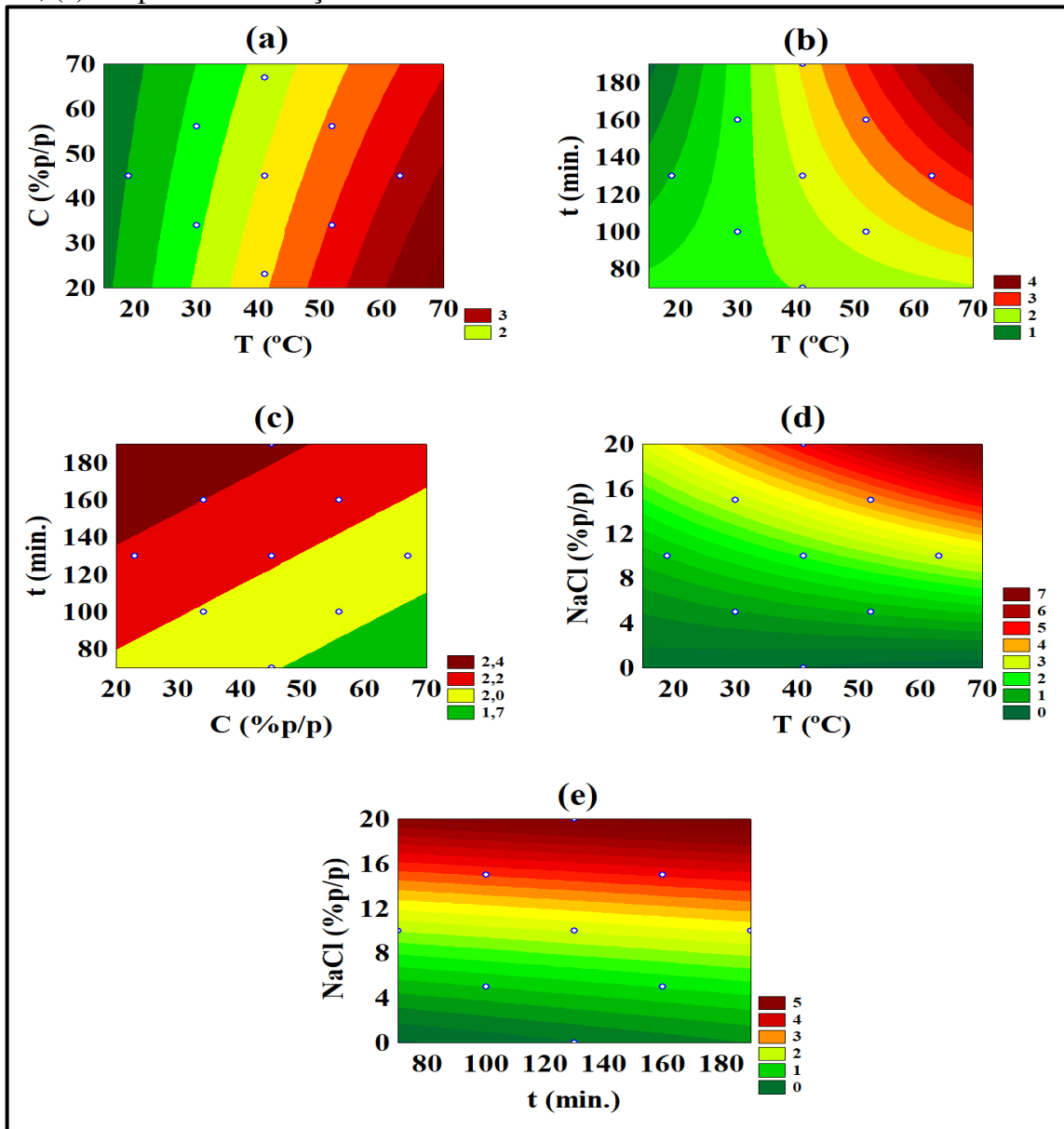
O segundo fator que mais influenciou a incorporação de sólidos solúveis foi a temperatura. Diferentes explicações são adotadas para mostrar o efeito da temperatura. Altas temperaturas promovem uma diminuição da viscosidade da solução, atrelada a um aumento das lesões causadas no tecido vegetal, levando ao aumento da difusão pelos tecidos. No entanto, devem-se assumir temperaturas que mantenham a qualidade dos vegetais, já que, a utilização de temperaturas mais elevadas causará modificações nutricionais e sensoriais no produto final (ALLALI et al., 2010; MERCALI et al., 2010; METHA et al., 2013; MOKHTARIAN et al., 2014; YUAN, et al., 2018). O aumento da concentração de soluto de 34% p/p para 56% p/p, à temperatura de 30°C, tempo de 160 minutos e concentração de cloreto de sódio de 5%, proporcionou uma incorporação de sólidos solúveis de 13,7% como mostraram os ensaios 5 e 7 da Tabela 4.8. Quando o aumento da concentração ocorreu na temperatura de 52°C, nas mesmas condições de operação de tempo e concentração de sal, a incorporação de sólidos solúveis aumentou para 20%. Castro et al (2018) e Mendes et al. (2013) também mostraram que o aumento da concentração da solução osmótica e da temperatura apresentaram resultados positivos na incorporação de sólidos solúveis, avaliando o efeito das condições de desidratação em goiaba-passa e laranja respectivamente.

Com relação à incorporação de sólidos solúveis, Silva et al. (2015) observaram que as amostras imersas nas soluções de 45 $^{\circ}$ Brix/50°C incorporou igual as amostras imersas na solução de 45 $^{\circ}$ Brix/70°C, e se diferiram das amostras desidratadas nas condições de 65 $^{\circ}$ Brix/50°C e 65 $^{\circ}$ Brix/70°C. Estas apresentaram maiores valores de incorporação de sólidos

solúveis com o aumento da temperatura, 10,01% e 12,23% respectivamente, estudando a desidratação osmótica para obtenção de caigata passa.

A Figura 4.15 exibe as curvas de níveis para incorporação de cloreto de sódio.

Figura 4.15–Curvas de níveis para incorporação de cloreto de sódio do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão; (d) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (e) tempo e concentração de cloreto de sódio



Fonte: o próprio autor (2018).

Analisando a Figura 4.15, nota-se que a concentração de cloreto de sódio na solução foi o fator que desempenhou maior importância sobre a resposta estudada. Observou-se que, quanto maior o teor de sal encontrado na solução, maior foi a sua incorporação na matriz

sólida do cubo desidratado. O efeito gerado pela impregnação desse soluto no produto desidratado é bastante significativo, mesmo havendo pequenas diferenças nas concentrações de sal nas soluções osmóticas utilizadas. A elevada incorporação de sal no alimento é decorrente das mudanças estruturais que o mesmo provoca na membrana celular, alterando suas propriedades físicas e levando a um aumento em sua permeabilidade. A membrana plasmática da célula vegetal não é seletiva com relação a molécula de cloreto de sódio porque esta possui baixo peso molecular atravessando facilmente a mesma (AL-MUTHASEB et al., 2010; CHENLO et al., 2007; HEREDIA et al., 2009). O efeito acentuado da concentração de cloreto de sódio foi estudado por Li et al. (2012) para tomates cerejas desidratados com ultrassom em soluções ternárias e por Manafi et al. (2011) no estudo cinético de desidratação osmótica de damasco em soluções salinas.

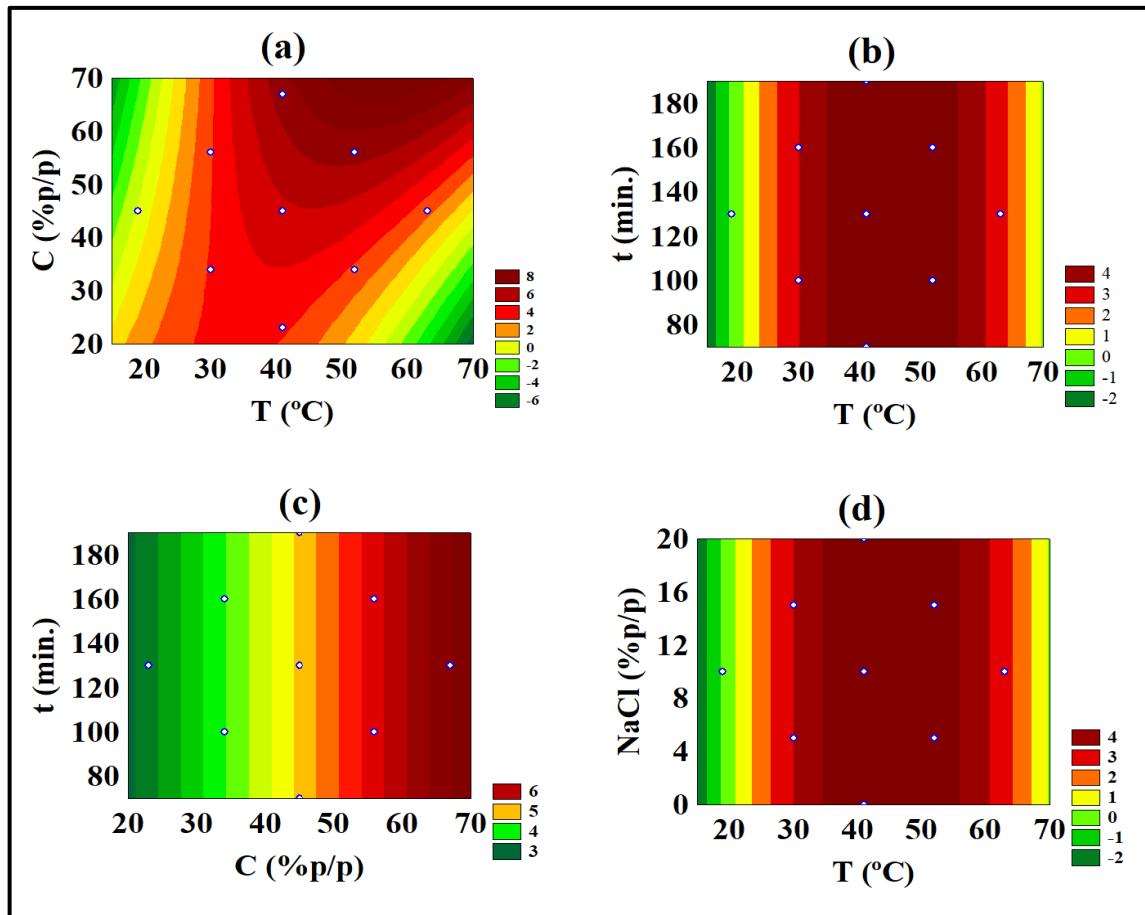
A Figura 4.15 (c) apresentou baixas incorporações de cloreto de sódio nas regiões onde houve aumento da concentração de sacarose (soluto) na solução. O aumento da concentração de sacarose, provavelmente provocou elevação da viscosidade da solução, aumentando a resistência à transferência de massa e, portanto, dificultando a incorporação do íon sódio (AN et al., 2013b; DEROSI et al., 2015; VIEIRA; et al., 2012). Além do mais, a molécula de sacarose tem maior peso molecular que o íon sódio, servindo de barreira física na superfície do alimento, o que impediria a incorporação do sal no mesmo (AL-MUTHASEB et al., 2010; CHENLO et al., 2007; HEREDIA et al., 2009). Mercali (2009) observou que o aumento da concentração de sacarose na solução, provocou diminuição da taxa de transferência de cloreto de sódio na desidratação osmótica de banana em soluções de sacarose e cloreto de sódio com diferentes concentrações.

A Figura 4.15 (a) e (b) revela que maiores incorporações de cloreto de sódio são alcançadas em elevadas temperaturas. Esse comportamento também está de acordo com os estudos de Mercali (2009) em banana. Esse efeito provavelmente está relacionado ao aumento da permeabilidade da membrana e à redução da viscosidade da solução osmótica. Possivelmente, a única resistência apresentada ao transporte deste soluto é a resistência encontrada no interior do alimento. Manafi et al. (2011) estudando a cinética de desidratação osmótica de damasco em soluções salinas, observou que o aumento da temperatura provocou a migração dos sólidos naturais do próprio vegetal para a solução osmótica, sendo estes substituídos pelo sal da solução, uma vez que os íons de sódio são pequenos e penetram facilmente na célula. Allali et al. (2010) explica dois efeitos causados pelo aumento da temperatura na desidratação osmótica. O primeiro é que o aumento da temperatura produz aumento na taxa de difusão de soluto por causa da agitação das moléculas. O segundo é que

as células que constituem o vegetal tem um valor crítico de temperatura que varia para cada tipo de célula. Quando esse valor é ultrapassado, ocorre o rompimento da célula e a saída de alguns solutos do próprio material para a solução osmótica. O valor crítico de temperatura para células de plantas é na faixa de 50 a 55°C.

A Figura 4.16 apresenta as curvas de nível para incorporação de sacarose considerando os pontos médios de temperatura, concentração da solução osmótica, tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio.

Figura 4.16—Curvas de níveis para incorporação de sacarose do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão; (d) temperatura e concentração de cloreto de sódio



Fonte: o próprio autor (2017).

Através da Figura 4.16, observa-se que a temperatura foi parâmetro que mais influenciou a transferência de massa de sacarose. Como pode ser visto na Figura 4.16 (a), (b) e (d), um valor máximo de incorporação de sacarose foi obtido quando foram utilizadas temperaturas de 41 a 52°C. Abaixo deste valor, o aumento da temperatura acarretou um aumento da incorporação de sacarose, enquanto acima deste valor, o aumento da temperatura

apresentou efeito negativo sobre essa variável dependente. Uma provável explicação para esse acontecimento pode estar relacionado ao aumento da permeabilidade da membrana celular, decorrente das alterações físicas provocadas pela temperatura (DEEPIKA; GAYATHRI, 2015; MERCALI et al., 2010; MERCALI et al., 2011b; METHA et al., 2013; MOKHTARIAN et al., 2014; MONNERAT et al., 2010; PHISUT, 2012). Em baixas temperaturas é possível que a diminuição da permeabilidade da membrana provoque uma menor penetração de sacarose no produto. Porém, a medida que a temperatura da solução aumenta ocorre efeito contrário, esta promove maior incorporação de sacarose, devido ao aumento da permeabilidade da membrana, e como comprovado na Figura 4.15, maior incorporação de cloreto de sódio também. A concorrência entre os fluxos destes dois solutos aumenta, e como o íon sódio é bem menor, este penetra muito mais facilmente que a sacarose, gerando uma redução do coeficiente de transferência de massa da mesma (MANAFI et al. 2011; PEREZ et al., 2013; WANG et al., 2013). De acordo com este trabalho, Silva Júnior et al. (2017) verificou altos índices de concentração de sacarose com aumento da temperatura e concentração de soluto em seus estudos sobre cinética de desidratação osmótica de fatias de banana em solução binária de sacarose e água. Ele constatou que a temperatura teve uma influência ligeiramente superior a concentração de soluto em todos os casos estudados. Este efeito também foi observado por outros autores: Abraão et al. (2013), Arballo et al. (2012), Mundada et al. (2011), Singh et al. (2010), Uribe et al. (2011).

A condição otimizada escolhida para a desidratação osmótica dos cubos de mandioca que opera a 52°C, 56% em peso de soluto, 10% em peso de cloreto de sódio, 190 minutos e 180 rpm de agitação se enquadraram dentro das faixas otimizadas das variáveis de operação que apresentou os maiores parâmetros de incorporações de sólidos solúveis, cloreto de sódio e sacarose que foram: temperaturas de 30 a 63°C, concentrações de soluto de 34 a 67% p/p, concentrações de cloreto de sódio entre 10 a 20% p/p, e tempos de imersão em quaisquer valores da faixa estudada. Essas faixas otimizadas de temperatura, concentração de soluto, concentração de cloreto de sódio e tempo, foram determinadas por meio da análise conjunta das Figuras 4.14, 4.15 e 4.16.

4.2.7 Variações dimensionais na desidratação osmótica

O estudo das variações dimensionais do produto na desidratação é importante para prever os perfis de umidade do material durante o processo e estimar os valores das difusividades efetivas, uma vez que a taxa de transferência de massa no material desidratado é afetada pelo encolhimento do produto e as mudanças de volume são dependentes de vários fatores, tais como: geometria, método de secagem e condições experimentais. As propriedades de transporte como coeficiente de difusão de massa e de calor estão relacionadas com as mudanças no encolhimento do material durante a desidratação (GUINÉ, et al., 2013; KOC, et al., 2008; MOREIRA; SERENO, 2003; SOURAKI et al., 2014).

Devido à complexa situação na microestrutura do tecido vegetal, os fenômenos observados durante a desidratação osmótica nem sempre podem ser explicados apenas em termos de processos osmóticos nos quais as membranas celulares atuam como uma barreira semipermeável e permitem a passagem da água. Muitos aspectos da estrutura celular são afetados durante a desidratação osmótica dos frutos, tais como deformação das paredes celulares, divisão da lamela média, lise das membranas e encolhimento do tecido (FIGIEL, 2010; JOARDDER et al., 2015). Durante a desidratação osmótica, a plasmólise (perda de água por osmose) também é acompanhada por uma perda da pressão do turgor, na solubilização da pectina e na absorção de soluto nas células (AKBARIAN, et al., 2014b). Essas alterações provocam mudanças no comportamento celular, na parede da célula e na permeabilidade da membrana, influenciando grandemente as propriedades de transporte do produto durante o processamento (NIETO et al., 2004). O rompimento das membranas celulares durante a desidratação osmótica finaliza o mecanismo osmótico e, a partir daí, a difusão, a capilaridade ou a convecção livre tornam-se os mecanismos que controlam a transferência de massa à medida que o processo avança (MOREIRA; SERENO, 2003).

A Tabela 4.9 apresenta as variações dimensionais dos cubos desidratados em relação a sua condição inicial, *in natura* representadas pelas reduções de lado (RL), de volume (RV) e de área superficial (RS) para os ensaios realizados segundo a matriz experimental do DCCR aplicado.

Tabela 4.9 – Valores experimentais das variáveis dependentes reduções de volume e de área para desidratação osmótica de cubos de mandioca em soluções de sacarose e cloreto de sódio

Ensaio	Tratamentos				Redução das dimensões do cubo desidratado em relação ao in natura (%)				
	T (°C)	C (%p/p)	t (min.)	Sal (%p/p)	RL ₁ ¹	RL ₂ ²	RL ₃ ³	RV ⁴	RS ⁵
1	30(-1)	34(-1)	100(-1)	5(-1)	3,65	4,47	2,91	10,65	7,23
2	52(+1)	34(-1)	100(-1)	5(-1)	6,50	10,08	4,37	19,65	13,55
3	30(-1)	56(+1)	100(-1)	5(-1)	3,40	4,55	2,36	9,94	6,76
4	52(+1)	56(+1)	100(-1)	5(-1)	6,94	10,24	4,38	20,14	13,90
5	30(-1)	34(-1)	160(+1)	5(-1)	6,17	6,21	3,15	14,78	10,11
6	52(+1)	34(-1)	160(+1)	5(-1)	5,13	7,85	2,45	14,88	10,09
7	30(-1)	56(+1)	160(+1)	5(-1)	3,69	4,31	2,93	10,51	7,14
8	52(+1)	56(+1)	160(+1)	5(-1)	9,33	7,84	2,34	18,40	12,66
9	30(-1)	34(-1)	100(-1)	15(+1)	7,03	9,90	6,03	21,30	14,73
10	52(+1)	34(-1)	100(-1)	15(+1)	8,69	9,63	0,98	18,36	12,56
11	30(-1)	56(+1)	100(-1)	15(+1)	8,55	8,28	7,07	22,05	15,29
12	52(+1)	56(+1)	100(-1)	15(+1)	24,19	22,55	0,77	41,74	29,63
13	30(-1)	34(-1)	160(+1)	15(+1)	6,77	9,33	6,04	20,55	14,24
14	52(+1)	34(-1)	160(+1)	15(+1)	8,67	9,96	0,97	18,57	12,67
15	30(-1)	56(+1)	160(+1)	15(+1)	10,42	9,07	7,01	24,29	16,90
16	52(+1)	56(+1)	160(+1)	15(+1)	32,88	30,54	3,09	54,81	40,29
17	19(-2)	45(0)	130(0)	10(0)	2,34	2,04	6,50	10,59	7,20
18	63(+2)	45(0)	130(0)	10(0)	7,46	7,81	7,84	21,36	14,81
19	41(0)	23(-2)	130(0)	10(0)	7,18	8,30	4,16	18,47	12,72
20	41(0)	67(+2)	130(0)	10(0)	7,62	6,62	6,40	19,24	13,29
21	41(0)	45(0)	70(-2)	10(0)	5,61	4,58	3,28	13,11	8,85
22	41(0)	45(0)	190(+2)	10(0)	8,61	7,16	6,43	20,52	14,23
23	41(0)	45(0)	130(0)	0(-2)	5,15	4,91	4,00	13,46	9,17
24	41(0)	45(0)	130(0)	20(+2)	7,91	10,39	2,32	19,49	13,42
25	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	5,95	8,61	3,13	16,59	11,38
26	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	6,67	8,32	1,54	15,73	10,70
27	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	6,84	5,84	3,53	15,28	10,47
28	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	4,82	6,93	2,26	13,48	9,13
29	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	6,79	7,57	2,28	15,80	10,80

Notações: ¹RL₁= redução do eixo x, ²RL₂ = redução do eixo y, ³RL₃= redução do eixo z, ⁴RV= redução de volume, ⁵RS= redução de área.

Fonte: o próprio autor (2017).

Analisando os resultados dessas variações dimensionais geométricas dos cubos desidratados osmoticamente apresentados na Tabela 4.9, observa-se que, as menores faixas de redução de volume e de área superficial dos cubos desidratados osmoticamente foram de 9,94 a 10,51% e de 6,76 a 7,14% respectivamente. A redução desses dois parâmetros nessas partículas é influenciada pela baixa temperatura de operação (30°C) e pela baixa concentração de NaCl (5%) na soluções desidratantes utilizadas. A maioria dos ensaios realizados em condições de baixas temperaturas e de concentração de sal apresentaram as menores reduções de volume e área. Esse comportamento pode ser atribuído a baixa incorporação de NaCl no material durante a etapa de desidratação osmótica, conforme os resultados da Tabela 4.8. O sal provoca mudanças na estrutura do alimento, aumentando a mobilidade da matriz sólida e a

sua contração durante a perda de umidade. Esse efeito pode contribuir para uma maior redução no volume dos cubos. Assim, a menor presença do sal no interior do sólido pode resultar em uma menor redução geométrica do material desidratado osmoticamente em tais soluções salinas.

As maiores faixas de redução de volume e de área foram de 41,74 a 54,81% e de 29,63 a 40,29%. A maior redução desses parâmetros no material desidratado deve ter sido influenciada pela alta temperatura (52°C) e concentração de NaCl (15%) na solução desidratante. Conforme discutido no item anterior, esse efeito pode ser atribuído a alta incorporação de NaCl no material durante a desidratação osmótica e as maiores temperaturas de operação, aumentando a mobilidade da matriz sólida. Os aumentos conjuntos da temperatura e da concentração de sal do nível de mínimo (-1) para o máximo (+1) resultaram num considerável aumento das reduções da área e do volume, conforme os resultados dos ensaios 1 e 10, 3 e 12, e 7 e 16, mostrados na Tabela 4.9. Quanto a temperatura de operação, observa-se que o aumento da mesma, utilizando as mesmas magnitudes de concentração de solutos, sal e tempo, resultou em aumento das reduções da área superficial e do volume dos cubos, duplicando seus resultados, conforme os dados dos ensaios 1 e 2, 3 e 4, 7 e 8, 11 e 12, e 15 e 16 da Tabela 4.9. Borges et al. (2008) observou um comportamento similar de maior encolhimento e redução dimensional das fatias de abóbora durante a sua secagem convectiva com o aumento da temperatura de operação de 50°C para 70°C. Em contrapartida, Leite et al. (2015) e Mendes et al. (2016) concluíram que a redução de volume apresenta um comportamento inverso com o aumento da temperatura para a secagem de bananas da variedade Terra e de grãos de feijão *azuki*, cujas partículas diminuem mais a temperaturas mais baixas de operação. Tal fato pode estar relacionado ao tipo de material, sua constituição física e química, estrutura da matriz sólida e outras. Os cubos de mandioca representam a porção descascada similar a polpa de um vegetal com características físicas mais similares a de uma abóbora, diferentemente do feijão e da banana.

O aumento da concentração de soluto em temperaturas de 30 e 52°C, associado a baixa concentração de NaCl (5%), com mesmos tempos, praticamente não alterou as reduções de volume e área (ver ensaios 1 e 3, e 2 e 4). Em contrapartida, esse aumento associado as maiores temperatura (52°C) e concentração de sal (15%), com tempos iguais de operação, provocaram acentuadas reduções de volume e área, segundo os ensaios 10 e 12, e 14 e 16.

O aumento do tempo do nível mínimo (-1) para o nível máximo (+1) em baixas concentrações de NaCl (5%) influencia de maneiras diferentes a redução das dimensões. Ele aumenta a redução do volume e da área dos cubos em condições de baixas concentração de

soluto e a baixas temperaturas (ver ensaios 1 e 5), mas não altera tais dimensões em condições nas quais apenas a concentração de soluto aumenta (ver ensaios 3 e 7). Nos ensaios a alta temperatura e baixa concentração de sal o aumento do tempo ocasiona a diminuição da redução das dimensões dos cubos para iguais concentrações de soluto das soluções desidratantes utilizadas, cujo efeito é mais significativo em baixas concentrações de soluto (ver ensaios 2 e 6, e 4 e 8). Nos ensaios com alta concentração de NaCl (15%), esse aumento do tempo nas mesmas condições de temperatura e de concentração de soluto exibiu resultados similares para as reduções de volume e de área (ver ensaios 9 e 13, 10 e 14, 11 e 15). Exceto para os ensaios 12 e 16 realizados na maior temperatura (52°C) e concentração de soluto (56% em peso), nos quais as reduções dessas dimensões aumentaram. Portanto, verifica-se que o efeito da variação do tempo é mais significativo a baixas concentrações da sal.

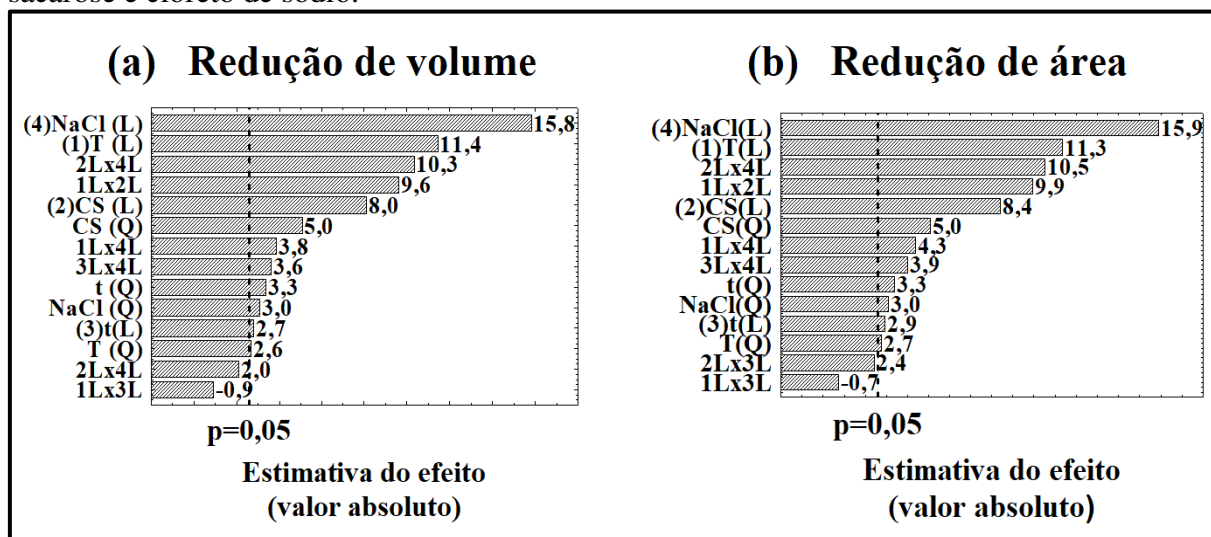
As médias das reduções dos eixos RL_1 , RL_2 e RL_3 dos cubos de mandioca desidratados em relação ao *in natura* foram de $8,10\pm 6,07$, $8,20\pm 5,47$ e $3,81\pm 2,03$ %, respectivamente. Essa menor redução do eixo RL_3 pode estar relacionada a direção da disposição das fibras no tubérculo de mandioca. Ele está localizado no lado paralelo ao conjunto das fibras, disposto na seção longitudinal do cubo de mandioca, dificultando o seu encolhimento. No caso dos eixos RL_1 e RL_2 , estes se encontram na seção transversal do cubo, as fibras se encontram perpendiculares a esses eixos, facilitando as suas reduções dimensionais através da perda de umidade dos cubos de maneira similar. Tal fato resulta em um comportamento físico anisotrópico e influencia de maneira significativa a diferença de transferência de massa no cubo em relação as suas dimensões geométricas.

Os materiais biológicos porosos se contraem de forma desigual nas direções longitudinal, tangencial e radial quando submetidos a processos de desidratação. Nota-se um comportamento diferente para cada alimento estudado e para cada geometria (BORGES et al., 2008; KATEKAWA, 2006). Estas mudanças provocam uma má impressão pelos consumidores. Contudo, existem produtos desidratados cujo encolhimento apresenta um visual desejável, como é o caso das frutas passa. O encolhimento é um fenômeno característico na desidratação de produtos, portanto, é fundamental considerá-lo para a previsão de perfis do teor de umidade do produto desidratado (CORRÊA FILHO et al., 2015). Neste sentido, inúmeros autores têm investigado as variações das dimensões, volumes, áreas e encolhimento de diferentes produtos agrícolas submetidos a desidratação (ARAÚJO et al., 2014; CORRÊA FILHO et al., 2015; DEGHANNYA et al., 2016a; DEGHANNYA et al. 2018; LEITE et al., 2015; MARTINS et al., 2017; MENDES et al., 2016; RADOJČIN et al., 2015; SIQUEIRA, et al., 2012; SMANIOTTO et al., 2015).

O nível de significância dos efeitos foi verificado através da análise estatística do DCCR aplicado e de diagramas de Pareto, de curvas de superfície de resposta e de nível. Estas curvas permitem a visualização da variação das reduções de volume e de área para as variáveis de estudo e definição de regiões otimizadas de valores mínimos e máximos desses parâmetros.

Os diagramas de Pareto para reduções de volume e de área são apresentadas pela Figura 4.17 (a) e (b), respectivamente. Esta Figura ilustra que a maioria das variáveis e suas interações apresentaram efeitos significativos e similares sobre as respostas redução de volume e redução de área. Os modelos estatísticos lineares apresentaram maior significância em relação ao quadrático para esses parâmetros. A concentração de cloreto de sódio linear foi a variável que apresentou maior influência sobre as reduções das dimensões dos cubos devido ao seu maior efeito significativo. A temperatura linear e a interação entre concentração de soluto e concentração de cloreto de sódio linear também apresentaram altos efeitos significativos sobre essas variáveis respostas, com valores absolutos próximos.

Figura 4.17– Gráfico de Pareto dos efeitos das variáveis sobre: (a) redução de volume; (b) redução de área na desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução ternária de sacarose e cloreto de sódio.



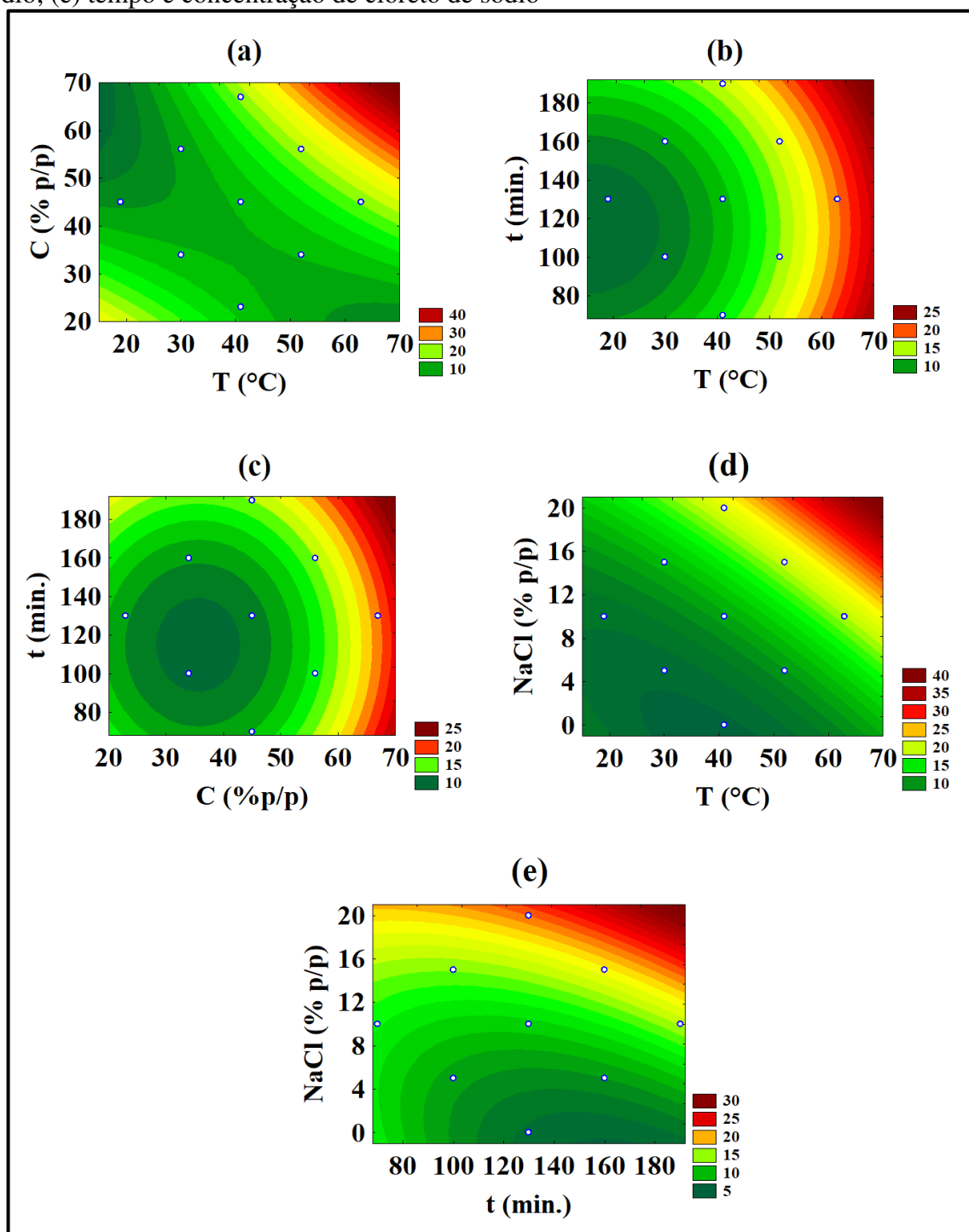
CNaCl = concentração de cloreto de sódio, T = temperatura, C = concentração de soluto, t = tempo, L = modelo matemático linear, Q = modelo matemático quadrático.

Fonte: o próprio autor (2017).

As curvas de nível para as reduções de volume e de área são mostradas na Figura 4.18. Esta apresenta os diagramas das relações da concentração de soluto com a temperatura e com o tempo de operação, temperatura com tempo e concentração de cloreto de sódio e tempo com

concentração de cloreto de sódio. Como as faixas de estudo para essas duas variáveis respostas foram iguais, elas foram representadas nos mesmos gráficos de curva de nível.

Figura 4.18– Curvas de níveis para redução de volume e de área do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão; (d) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (e) tempo e concentração de cloreto de sódio



Fonte: o próprio autor (2017).

Analisando as Figuras 4.17 (a) e (b) e 4.18, nota-se que a concentração de cloreto de sódio na solução e a temperatura desempenharam grande importância sobre as reduções de volume e de área. Verificou-se que altos níveis de reduções geométricas foram encontrados em soluções com alta concentração de cloreto de sódio e temperatura. Soluções com elevadas concentrações de soluto e temperaturas promovem maior diferença na pressão osmótica provocando elevada perda de umidade e posterior contração da matriz viscoelástica do vegetal, a qual se move preenchendo os espaços vazios que antes era ocupado pela água que foi retirada no processo de desidratação (NAHIMANA et al. 2011; YADOLLAHINIA; JAHANGIRI, 2009). Além disso, os sólidos solúveis que se encontram em grande quantidade nas soluções osmóticas, formam uma camada densa na superfície do alimento ajudando seu encolhimento.

Dehghannya et al. (2016a), Dehghannya et al. (2016b) e Dehghannya et al. (2018) relataram que a desidratação osmótica reduziu o encolhimento no produto final, e que o encolhimento diminuiu com o aumento da concentração da solução osmótica. Koocheki e Azarpazhooh (2010) verificaram que o encolhimento foi afetado principalmente pela temperatura e pela concentração de sacarose estudando a transferência de massa durante a desidratação osmótica de ameixa. Eles afirmaram que o movimento do açúcar no espaço intracelular pode ser o motivo da redução do encolhimento. Silva et al., (2015) observou maior taxa de encolhimento na desidratação osmótica de caigata em elevadas temperaturas e concentrações de sacarose. Porém menores taxas ocorreram nos menores índices desses parâmetros de operação. Radojčín et al. (2015) descreveram que altos índices de temperatura e concentração da solução intensificaram a redução de volume na desidratação osmótica de marmelos.

A mudança mais significativa no volume durante a desidratação ocorreu no tratamento com temperatura de 60°C e concentração da solução de 65°Brix. Eles concluíram que a concentração da solução foi mais influente que a temperatura. Esses estudos divergem com os verificados com Behnilian e Spiess (2006) que pesquisaram o efeito dos solutos glicose, sacarose, sorbitol, sal e glicerol na desidratação osmótica de diferentes vegetais, inclusive maçãs, cenouras e batatas. Eles constataram que o aumento na concentração de soluto gerou soluções com alta viscosidade criando resistência a transferência de massa e observaram que encolhimento macroscópico geral e o encolhimento simplasmático para amostras de maçã, cenoura e batata foram afetados pela concentração de sacarose.

Como relatado anteriormente, o encolhimento do cubo de mandioca não ocorreu igualmente em todas as direções na desidratação osmótica. Esse efeito é causado pela

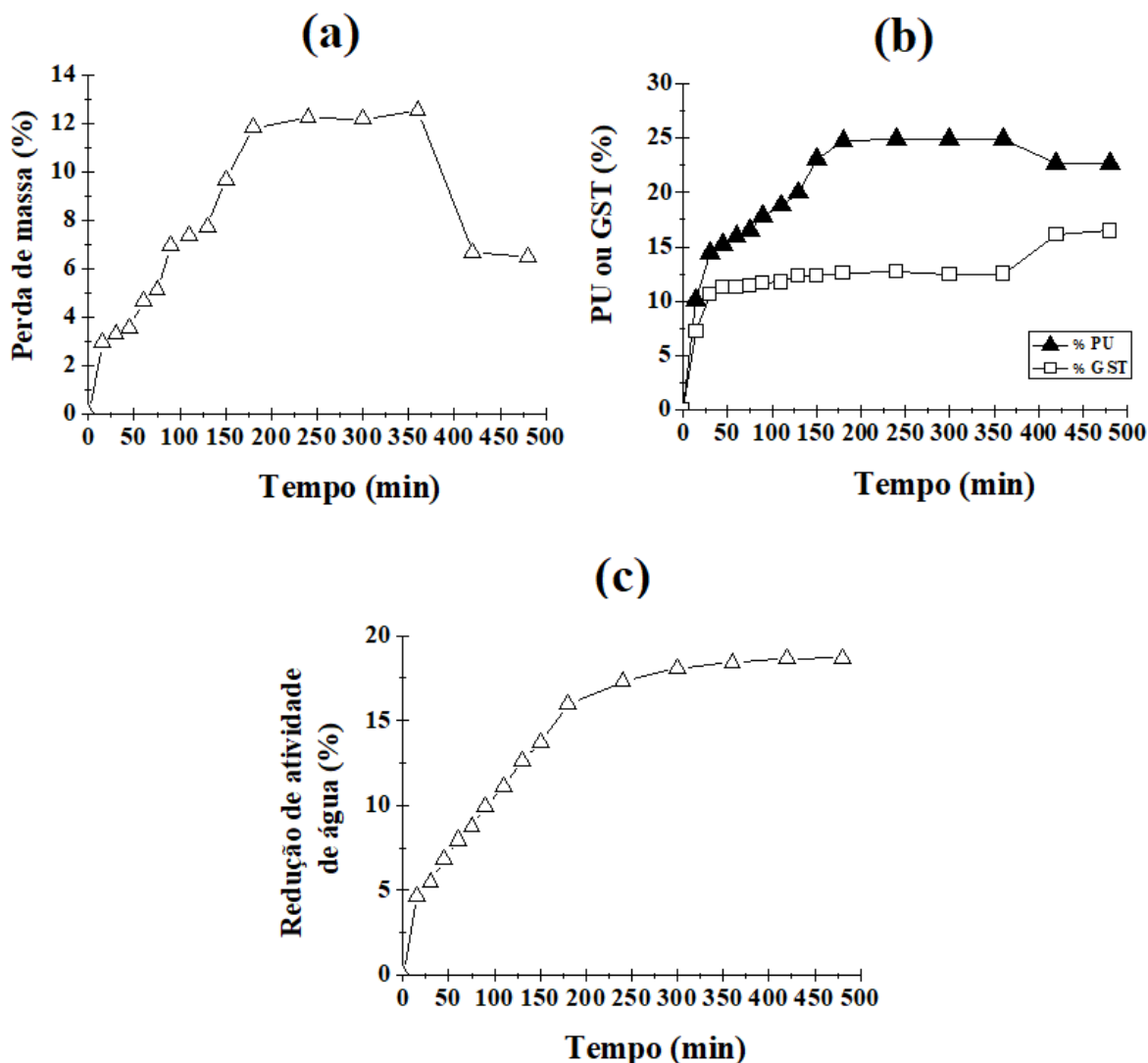
anisotropia do tecido da mandioca devido a orientação da fibra e da estrutura do material não homogêneo do vegetal. Além disso, essas características intrínsecas do tubérculo permitem a criação de rotas de transporte de umidade mais favoráveis, resultando no encolhimento do tecido intensificado em uma direção. Estes relatos estão de acordo com os descritos por Radojčin et al. (2015). Eles afirmaram a ocorrência do encolhimento anisotrópico no tecido do marmelo em forma de cubos durante sua desidratação osmótica. Os mesmos concluíram que tais mudanças na forma do material desidratado, dependem do método de secagem e do tipo de material que constitui o tecido vegetal. Diante dos relatos citados, é necessário abordar o parâmetro físico (encolhimento) para prever o perfil de umidade do cubo de mandioca que foi submetido a desidratação osmótica em soluções ternárias, pois o mesmo interfere no valor real da difusividade efetiva de umidade do mesmo. Wang et al. (2008) afirmaram que ao considerar esse fenômeno, estima-se um valor de difusividade efetiva de massa mais próximo da realidade, pois o encolhimento e a migração em massa alteram a estrutura interna do produto, afetando a mesma. Souraki et al. (2014) garantem que os valores das difusividades efetivas estimadas considerando o encolhimento foram menores que os obtidos sem considerar este fenômeno.

4.2.8 Cinética de desidratação osmótica para condição otimizada

A caracterização da cinética de desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução ternária foi realizada na condição operacional otimizada desejada de 52°C, 56% de soluto, 10% de cloreto de sódio, 190 minutos e 180 rpm de agitação. Os resultados dos parâmetros de avaliação da cinética de desidratação osmótica de cubos de mandioca estão apresentados através das curvas de perdas de massa e de umidade, ganhos de sólidos totais e redução de atividade de água do material demonstrados na Figura 4.19.

As mudanças verificadas nos valores da curva apresentada na Figura 4.19 (a) admitiram distinguir três fases distintas para o comportamento do parâmetro perda de massa em função do tempo de desidratação. Na primeira fase, a perda de massa ocorreu de forma intensa nos 180 minutos iniciais do processo, atingindo um valor máximo de 12,54%. Na fase seguinte, o fluxo de massa tendeu ao equilíbrio a partir de 180 até 360 minutos. Na última e terceira fase, a perda de massa declinou após os 360 minutos e continuou até o final do processo.

Figura 4.19– Cinéticas de perdas de massa (a), de umidade e de ganho de sólidos totais (b) e redução de atividade de água (c) na desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução de sacarose e cloreto de sódio.



PU = perda de umidade, GST= ganho de sólidos totais.

Fonte: o próprio autor (2018).

Esses resultados são semelhantes aos relatados por Freitas et al. (2011), cuja estabilidade da perda de massa no processo de desidratação osmótica foi próximo dos 180 minutos com redução máxima de massa de 10%. Eles estudaram desidratação osmótica de tomate com concentrações de NaCl de 3, 6 e 9% e de sacarose de 0,4% na solução, usando substância aromática coentro em pó, numa temperatura de 24°C.

Mendes et al. (2013) relataram que o tempo mostrou efeito negativo para perda de massa, de forma igual a deste trabalho. Eles explicaram que elevados tempos de exposição do produto na solução osmótica enfraqueceu a membrana celular do produto desidratado. Brochier et al. (2015) também constataram que houve declínio da perda de massa no final do

processo. Eles pesquisaram a desidratação osmótica de yacon com soluções de glicerol e sorbitol em diferentes concentrações e temperaturas. Semelhante a esta pesquisa, Carmo et al. (2017) encontraram valores maiores de perda de massa de 10%, bem como decréscimo da mesma no processo de desidratação osmótica de fatias de mandioca em solução ternária de cloreto de sódio, sacarose e água. No entanto, Pessoa et al. (2016) e Zou et al. (2013), afirmaram que quanto maior o tempo que as amostras ficam imersas na soluções osmóticas, maior foi a perda de massa. Pessoa et al. (2016) mostraram que os fluxos de massa não alcançaram o equilíbrio no período total de 2400 minutos de processo, pesquisando pedaços de goiaba em estágio de maturação maduro e verde, desidratados em solução de sacarose a 50°Brix numa temperatura de 24°C. Eles justificaram que a transferência de massa é decorrente da concentração de sacarose presente em cada solução desidratante. Mimura et al. (2014), observaram redução de massa similar ao desta pesquisa (-13%) para fatias de champignon desidratadas osmoticamente que passaram pelo processo de branqueamento puro.

A Figura 4.19 (b) mostra as cinéticas de perda de umidade e de ganho de sólidos em função do tempo dos cubos de mandioca processados em soluções ternárias de sacarose, cloreto de sódio e água. É possível verificar nos comportamentos das suas taxas mássicas de transferência que nos instantes iniciais de operação, primeiros 15 minutos, ocorreram os maiores gradientes de perda de umidade e de ganho de sólidos. Depois desse período, o ganho de sólidos totais tendeu ao equilíbrio a partir de 30 minutos de operação. A perda de umidade continuou aumentando até alcançar um valor máximo em 24,89% e estabilizar após 180 minutos de operação. Surgiu um fato inesperado depois de 360 minutos de desidratação osmótica dos cubos de mandioca, ocorreu um pequeno declínio da perda de umidade e um súbito aumento do ganho de sólidos totais das amostras, cujos parâmetros se reestabilizaram em valores iguais a 22,7% e 16,45% em peso de umidade e de sólidos totais, respectivamente. O ganho de sólidos totais estabilizou primeiro que a perda de umidade provavelmente devido a menor resistência interna de transferência mássica dos solutos (sacarose e sal) em relação a umidade e a água.

O comportamento das taxas mássicas de transferência de umidade e de solutos entre a matriz sólida dos cubos de mandioca e a solução hipertônica osmótica pode estar associada as características químicas, físicas e físico-químicas desses solutos. Junqueira et al. (2017) descreveram que solutos de alto peso molecular como a sacarose, são responsáveis pelo aumento da perda de umidade no produto desidratado e promove baixo ganho de sólidos. Este soluto promove um aumento na viscosidade da solução osmótica, o que pode levar à formação

de uma camada limite na superfície do vegetal, limitando sua impregnação no produto (PEREIRA et al., 2006). Porém, solutos de baixo peso molecular fornecem um maior ganho de sólidos quando comparados com os de alto peso molecular, porque são capazes de penetrar na célula do alimento, aumentando sua concentração no produto (JUNQUEIRA et al.; 2017; RUIZ-LOPEZ et al., 2011; SRITONGTAE et al. 2011). Diante dos relatos citados, a sacarose provavelmente foi responsável pela maior perda de umidade e o cloreto de sódio pelo ganho de sólidos totais na desidratação de cubos de mandioca em soluções ternárias. Como dito anteriormente, a partir dos 360 minutos, na Figura 4.19 (b), ocorreu uma diminuição inesperada para perda de umidade e um aumento súbito para o ganho de sólidos até o final do processo. Tais efeitos podem estar relacionados com o tempo da desidratação osmótica. Tempos demorados de processo implicam em modificações do tecido vegetal, sobretudo das membranas celulares, que vão enfraquecendo com prolongados períodos de contato com a solução osmótica (CÓRDOVA, 2006). Desta forma, o efeito do tempo, possivelmente provocou deformações nos tecidos que constituem os cubos de mandioca, incapacitando a membrana celular de agir como barreira efetiva à entrada de solutos, facilitando a entrada dos mesmos. O encolhimento sofrido pelas amostras durante o processo altera a estrutura interna do produto, afetando a transferência de massa (WANG et al., 2008).

O ganho de sólidos no processo de desidratação é geralmente indesejável porque pode impactar mudanças nas propriedades do produto. Altos níveis de impregnação podem modificar as características sensoriais do vegetal fresco (Mendonça et al. 2016). O aumento súbito no ganho de sólidos foi constatado por Silva et al. (2015) logo após 160 minutos, ao trabalhar com desidratação osmótica de palma forrageira numa temperatura de 40°C, concentração da solução de 60°Brix e proporção palma/solução (1:10).

Altas taxas de perda de umidade e ganho de sólidos nas primeiras horas de processo foram mencionadas por Castro et al. (2018), na desidratação osmótica de goiaba. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2012b), ao estudarem a desidratação osmótica de acerola. Segundo Ramya et al. (2014), os estágios iniciais da desidratação osmótica são os mais importantes porque os fenômenos de transporte são mais rápidos, causando maior impacto na evolução futura do processo.

Resultados de perda de umidade e de ganho de sólidos semelhantes aos encontrados nesta pesquisa, foram encontrados por Alam et al. (2013) ao usar solução binária de cloreto de sódio e água. Eles acharam um valor de 28,42% de perda de umidade e 11,24% para o ganho de sólidos na desidratação osmótica de cebola, nas condições de 25°C, 6 horas e concentração de sal na solução de 25°Brix. Entretanto, ao usar solução ternária com 55°Brix de sacarose e

15°Brix de sal, nessas mesmas condições, a perda de umidade se elevou para 48,08% e o ganho de sólidos aumentou ligeiramente para 13,53%. Segundo estes autores, a explicação para esse fato é que os aumentos da perda de umidade e do ganho de sólidos acontecem à medida que a concentração da solução aumenta.

A Figura 4.19 (c) apresenta as curvas de Redução da Atividade de água em relação ao tempo de desidratação osmótica de cubos de mandioca. Ela demonstrou que ocorreu um aumento pronunciado da redução de atividade de água do início do processo até 240 minutos. Logo após, atingiu uma taxa constante de 18% até o final da desidratação. O aumento intenso da redução de atividade de água no início do processo é explicado pelas elevadas taxas de incorporações de sacarose e cloreto de sódio nesse período, comprovado pelas Figuras 4.20 (b) e (c), respectivamente (DAMODARAN, 2010). Junqueira et al. (2017) afirma que o peso molecular do soluto influencia diretamente na redução de atividade de água. Ele analisou a desidratação osmótica de batata doce em soluções de sacarose, sorbitol e frutose, e concluiu que a frutose proporcionou maior redução de atividade de água no produto por apresentar menor peso molecular em relação aos outros solutos.

A sacarose apresenta alto peso molecular e isso dificulta sua penetração no alimento, permanecendo no espaço intracelular do tecido vegetal. Como ela fica na superfície do alimento, provoca maior diferença de concentração de soluto entre a superfície e o interior do produto, aumentando a eficiência da desidratação e conseqüentemente a redução de atividade de água. Todavia, solutos de baixo peso molecular como cloreto de sódio, penetra facilmente no alimento, originando uma diminuição gradual no gradiente de concentração. Ele é absorvido mais rápido e ao penetrar na célula provoca a plasmólise, que é a retração do volume da célula vegetal pela perda de água, reduzindo significativamente a atividade de água do produto (BROCHIER et al. 2015; CHAUHAN et al. 2011; RUBIO-ARRAEZ et al., 2015; RUIZ-LOPEZ et al. 2011).

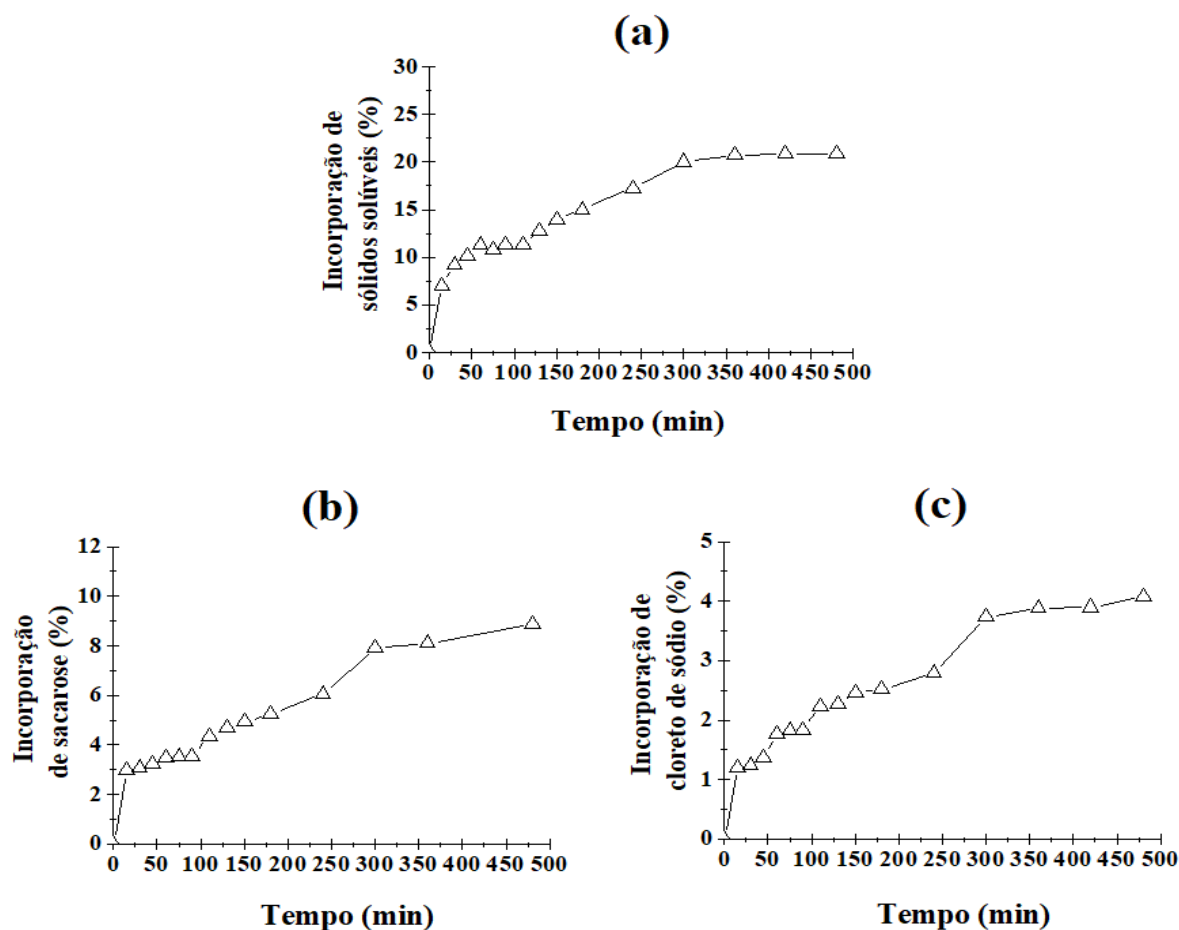
O aumento na redução de atividade de água nas primeiras horas do processo da desidratação osmótica foi observado por vários autores: Junqueira et al., 2017, Mendonça et al., 2014, Rubio-Arreaez et al., 2015, Zapata et al., 2016.

A atividade de água é um indicador de conservação de alimentos, pois esta é responsável pelas alterações ocorridas nos mesmos durante o armazenamento. Embora os processos osmóticos promovam a redução de atividade de água, o valor de atividade de água obtido para os cubos de mandioca desidratados osmoticamente na melhor condição foi de 0,853, acima do limite mínimo para o desenvolvimento de microrganismos patogênicos. Portanto, o valor deste parâmetro observado nesta etapa do trabalho não seria suficiente para

inibir o crescimento microbiano, justificando o uso da secagem convectiva, garantindo o aumento da vida de prateleira do cubo de mandioca desidratado osmoticamente. Semelhante conclusão foi obtida por: Carmo et al. (2017), Côrrea et al. (2010), Kowalski e Szadzińska (2014), Lee e Lim (2011), Vieira et al. (2012).

A Figura 4.20 mostra o perfil de difusão, ao longo do tempo, das incorporações de sólidos solúveis, sacarose e cloreto de sódio para desidratação osmótica de cubos de mandioca em soluções ternárias de sacarose, cloreto de sódio e água.

Figura 4.20– Cinéticas de incorporações de sólidos solúveis, sacarose e cloreto de sódio na desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução ternária de sacarose e cloreto de sódio



Fonte: o próprio autor (2018).

A análise dos resultados obtidos pela Figura 4.20 (a), (b) e (c) para a desidratação osmótica de cubos de mandioca, mostrou que as cinéticas de incorporação de sólidos solúveis, sacarose e cloreto de sódio apresentaram o mesmo comportamento. O ganho de sólidos solúveis, sacarose e sal, ocorreram de forma mais intensa nos primeiros 15 minutos do processo, momento em que já havia incorporado aproximadamente 7%, 3% e 1%

respectivamente. Em seguida, notou-se um ganho de forma mais lenta dessas três variáveis repostas em um intervalo de tempo de até 180 minutos. Dos 180 a 300 minutos de processo, observou-se novamente aumento nas incorporações de sólidos solúveis, sacarose e cloreto de sódio, se elevando para 20%, 6% e 3% respectivamente. Em 300 minutos, foi observada uma estabilidade nas taxas de transferência de massa para todas as incorporações. Ao final do experimento as incorporações foram aproximadamente de 21% para os sólidos solúveis, 9% para a sacarose e 4% para o cloreto de sódio.

No estudo da cinética de desidratação osmótica de fatias de mandioca em solução ternária, Carmo et al. (2017) verificaram que nas primeiras horas do processo, a presença de uma elevada concentração de açúcares proporcionou uma rápida transferência de massa, acarretando maior ganho de sólidos solúveis. Essa transferência se acomodou para um mecanismo final, até atingir um equilíbrio a partir dos 200 minutos para esse parâmetro no material, com valor final de 10%. Tal comportamento foi semelhante ao desta pesquisa no que se refere a rápida transferência de massa no início do processo, no entanto, o valor final da incorporação de sólidos solúveis para os cubos de mandioca foi de aproximadamente 20%, atingindo a estabilidade a partir dos 300 minutos. Valores de incorporação de sólidos solúveis inferiores ao desta pesquisa, também foram encontrados por Silva et al. (2015), na desidratação osmótica de caigata, eles verificaram um índice de incorporação de sólidos solúveis de 12,32%, no tratamento com solução de 65°Brix a 70°C. Do mesmo modo, Germer et al. (2011), encontraram um valor inferior de incorporação de sólidos solúveis, de 6,5% para pêssegos desidratados osmoticamente em solução de sacarose com 55°Brix a 54,1°C.

Resultados semelhantes para o encontrado com relação a cinética de incorporação de sacarose foram encontrados por Aires et al. (2016) e Castro et al. (2014) na desidratação osmótica de goiaba, e Borsato et al. (2010) na desidratação osmótica de maçã. Eles constataram que a transferência de sacarose ocorreu com maior velocidade nas primeiras horas do processo. Araújo et al. (2014) encontrou valores de incorporação de sólidos usando solução de sacarose, semelhantes ao desta pesquisa, de 22,13%. Eles verificaram o processo de desidratação osmótica de cenouras com temperatura de 50°C, tempo de 240 minutos e concentração da solução de 50°Brix. Contudo, Hadipernata e Ogawa (2016) obtiveram em sua pesquisa um ganho de sacarose bem menor, de 1,75%. Eles estudaram a desidratação osmótica de batata a 20°C, em 8 horas com concentração da solução de 20%.

Mercali (2009), ao estudar a cinética de transferência de massa de banana relatou uma alta taxa de incorporação de cloreto de sódio no início da desidratação seguida de taxas menores nos estágios finais do processo. Vázquez-Vila et al. (2009) também observaram que

o ganho de sólidos utilizando solução de cloreto de sódio entre 17, 22 e 26% p/p, a 25, 35 e 45°C, aumentou no início do processo da desidratação osmótica de cenoura. Silva Júnior et al. (2015), além de observar que a incorporação de sólidos no feijão verde desidratado com solução de cloreto de sódio aumentou no início do processo, constatou que a difusividade efetiva do sólido se elevou com o aumento da concentração de cloreto de sódio na solução de 20% para 26,5%. Com relação ao tempo de estabilização da taxa de transferência de sólidos solúveis, sacarose e cloreto de sódio, Mayor et al. (2006), de forma semelhante as informações obtidas neste trabalho, constataram que o equilíbrio ocorreu por volta de 5 horas na desidratação osmótica de abóbora em soluções de cloreto de sódio entre 5 e 25% p/p, a 12, 25 e 38°C com tempos de 0 a 9 horas. Perto dos valores obtidos neste trabalho, Kumar et al. (2017) verificaram um teor de incorporação de sólidos de 4,20%, empregando solução de cloreto de sódio em cubos de chuchu desidratados osmoticamente. As condições utilizadas foram 35°C de temperatura, tempo de 180 minutos, concentração de 10% e razão entre a fruta e solução de 1:6.

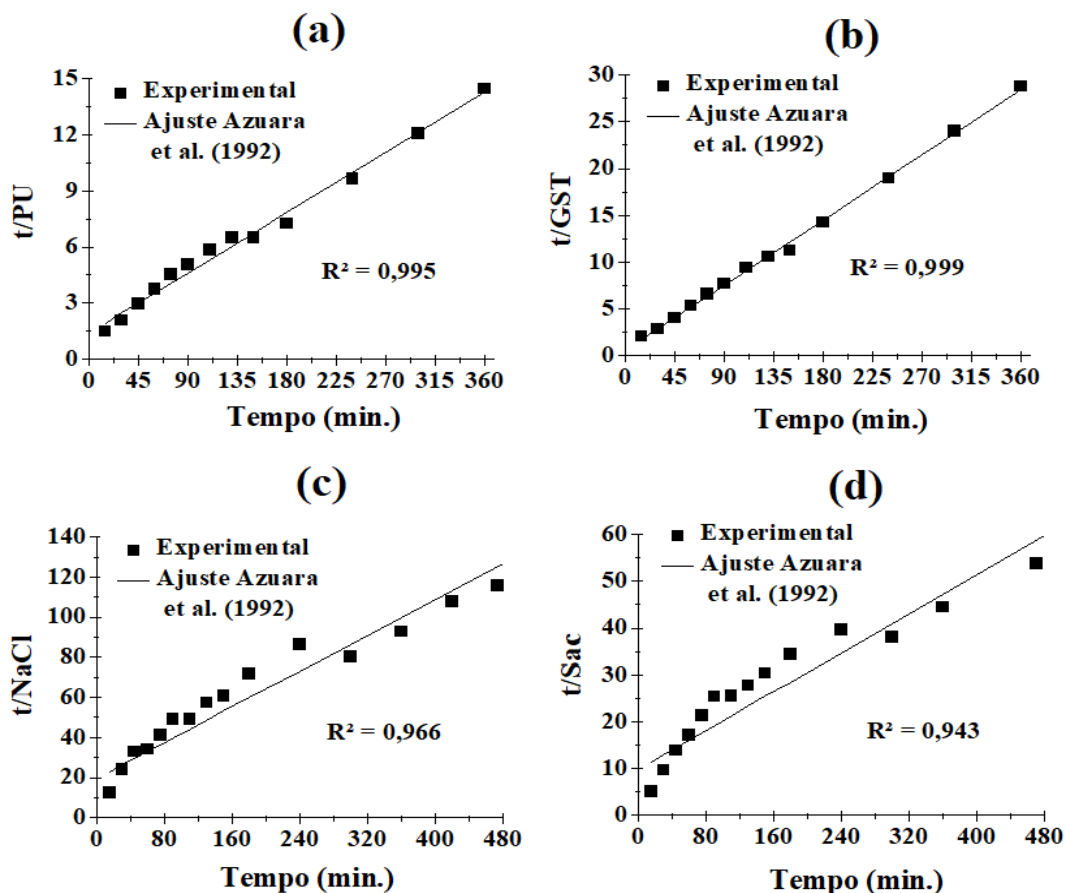
Desta forma, analisando as Figuras 4.19 e 4.20 de forma conjunta, verificou-se que os maiores níveis na cinética de desidratação osmótica foram alcançados pela perda de umidade, acompanhados da incorporação de sólidos solúveis, redução de atividade de água, ganho de sólidos totais e incorporações e de cloreto de sódio.

4.2.9 Determinação da difusividade efetiva média de perda de umidade e entrada de solutos dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente

Com a finalidade de prever a cinética de desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução de sacarose e cloreto de sódio, como também avaliar o ponto de equilíbrio dos parâmetros estudados no processo, foi realizada uma regressão linear utilizando o modelo de Azuara et al. (1992), (Equações 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11). O modelo foi ajustado aos dados observados de perda de umidade, ganho de sólidos totais, incorporações de cloreto de sódio e sacarose. Os valores do equilíbrio foram obtidos a partir das linearizações t/PU , t/GST , $t/NaCl$ e t/Sac em função do tempo de desidratação osmótica.

A Figura 4.21, mostra os dados experimentais linearizados de perda de água, ganho de sólidos totais e incorporações de cloreto de sódio e sacarose, ajustados pelo modelo de Azuara et al. (1992), afim de mostrar a adequação deste modelo.

Figura 4.21– Ajuste linear do modelo de Azuara e colaboradores (1992) para determinação da PU_{∞}^{mod} , GST_{∞}^{mod} , $NaCl_{\infty}^{mod}$, Sac_{∞}^{mod}



Fonte: o próprio autor (2018).

Através da Figura 4.21 constatou-se que o modelo utilizado representou de forma satisfatória os dados experimentais para todas as variáveis estudadas, cujos coeficientes de determinação (R^2) foram próximos a 1 (0,943 a 0,999). Como os modelos lineares das Equações 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11 para perda de umidade, ganho de sólidos totais e incorporações de cloreto de sódio e sacarose respectivamente, se ajustaram bem aos dados experimentais, e uma vez que não se dispõe dos valores experimentais destes parâmetros no equilíbrio, todas estas equações, podem ser simplificadas, considerando que as razões $PU_{\infty}^{mod}/PU_{\infty}^{exp}$, $GST_{\infty}^{mod}/GST_{\infty}^{exp}$, $NaCl_{\infty}^{mod}/NaCl_{\infty}^{exp}$, $Sac_{\infty}^{mod}/Sac_{\infty}^{exp}$ sejam iguais à unidade.

A partir dos resultados dos parâmetros de ajuste do modelo empírico foi possível determinar os demais parâmetros e se obter os valores da difusividade média de perda de umidade, ganho de sólidos totais e incorporações de cloreto de sódio e sacarose para a desidratação osmótica de cubos de mandioca na condição otimizada desejada, cujos valores estão apresentados nas Tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.10 – Parâmetros de ajuste para perda de umidade e ganho de sólidos totais, obtidos pelo modelo de Azuara et al. (1992) durante a desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução de sacarose e cloreto de sódio na melhor condição de operação

Variáveis	Parâmetros	Tempo (min)
		360
Perda de umidade	PU_{∞}^{mod}	27,967
	$S_{PU} \times 10^4$	8,265
	R^2	0,995
	P(%)	8,407
	$D_{ef} \times 10^8$ (m ² /s)	1,99
Ganho de sólidos totais	GS_{∞}^{mod}	12,923
	$S_{GS} \times 10^4$	22,521
	R^2	0,999
	P(%)	3,389
	$D_{ef} \times 10^8$ (m ² /s)	2,77

Fonte: o próprio autor (2018).

Tabela 4.11 – Parâmetros de ajuste para as incorporações cloreto de sódio e sacarose, obtidos pelo modelo de Azuara et al. (1992) durante a desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução de sacarose e cloreto de sódio na melhor condição de operação

Variáveis	Parâmetros	Tempo (min)
		480
Incorporação de cloreto de sódio	$INaCl_{\infty}^{mod}$	4,489
	$S_{INaCl} \times 10^4$	1,883
	R^2	0,966
	P(%)	15,678
	$D_{ef} \times 10^8$ (m ² /s)	1,36
Incorporação de sacarose	$ISac_{\infty}^{mod}$	9,573
	$S_{ISac} \times 10^4$	1,802
	R^2	0,943
	P(%)	22,224
	$D_{ef} \times 10^8$ (m ² /s)	1,40

Fonte: o próprio autor (2018).

Analisando de uma forma geral as Tabelas 4.10 e 4.11, o modelo de Azuara e colaboradores (1992) apresentou valores de erro médio relativo (P) na faixa de 3,4 a 22,2 %, e coeficientes de determinação (R^2) próximos da unidade para o transporte mássico de perda de umidade, sólidos totais e incorporações de cloreto de sódio e sacarose indicando um bom ajuste do modelo linearizado aos dados experimentais.

Os valores das difusividades efetivas para o transporte de umidade e de sólidos foram da ordem de 1×10^{-8} m²/s, no qual o valor médio desses parâmetros de transporte para a desidratação osmótica de cubos de mandioca foi igual a $1,88 \times 10^{-8}$ m²/s. Valores da mesma ordem de grandeza foram obtidos para diversos vegetais desidratados osmoticamente tais como, a cenoura, (SUTAR; PRASAD, 2011), a manga (ARIAS et al., 2017), a nectarina (RODRÍGUEZ et al., 2013) e a banana (GÓIS et al., 2010) .

Azarpazhooh e Ramaswamy (2012) observaram que as difusividades efetiva de umidade e de sólido na desidratação osmótica de cilindros de maçã, alcançaram valores máximos em temperaturas de 50°C e concentração da solução de 50°Brix. Estes parâmetros de operação foram próximos aos utilizados nesta pesquisa.

Assis et al. (2017) constataram que a temperatura mais alta do processo (60°C), promoveu uma difusão mais elevada de água e do soluto na desidratação osmótica de cubos de maçã. Esse comportamento também foi observado por Abbasi Souraki et al. (2012) em feijão verde desidratado osmoticamente a 30 – 50°C.

Resultados ligeiramente menores de difusividades, da ordem de 10^{-9} m²/s, foram obtidos por Rodríguez et al. (2017) na desidratação osmótica de ameixa, Assis et al. (2017) pesquisando cubos de maçã desidratados osmoticamente, Singh et al (2008) para cubos de cenoura pré- tratados em solução de cloreto de sódio, Hamedi et al. (2018) na desidratação osmótica de cilindros de gel ágar assistido por ultrassom e Azarpazhooh e Ramaswamy (2012) analisando cilindros de maçã desidratados osmoticamente.

O confronto entre os dados de difusividades efetiva citados na literatura é uma tarefa complicada devido aos diferentes métodos de estimativa e diversos modelos empregados, associado às mudanças na composição química do alimento e em sua estrutura física. Além disso, a difusividade efetiva varia ao longo do processo e o gradiente osmótico de umidade não é constante (AZOUBEL; SILVA, 2008; MERCALI et al., 2011a).

Allali et al. (2008) e Corzo et al. (2008), afirmaram que a grandeza da difusividade efetiva de umidade para materiais alimentícios varia na faixa de 10^{-8} a 10^{-12} m² /s. Essa variação é explicada pelo tipo de análise experimental, composição e fisiologia do alimento e do método de tratamento dos dados. Góis et al. (2010) relataram que as diferenças na ordem de grandeza das difusividades, decorre provavelmente do tipo de geometria usada no material.

Escobar et al. (2007) explicaram que altos valores de difusividades se deve ao efeito de medidas que provoca a morte celular do tecido vegetal antes do pré-tratamento osmótico, facilitando a transferência de massa. Os autores citam como exemplo o branqueamento.

Arias et al. (2017) e Rodríguez et al. (2013) associaram os altos coeficientes de difusão a temperatura utilizada no processo de desidratação osmótica.

Maldonado et al. (2008) justificaram que altos coeficientes de difusão estão atrelados aos altos valores de perda de umidade.

Segundo a Tabela 4.11, as constantes de velocidade de incorporações de cloreto de sódio (S_{NaCl}) e sacarose (S_{Sac}) mostraram valores semelhantes, indicando que estes dois

solutos incorporaram com mesma velocidade nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente, apresentando os mesmos valores de difusividades efetiva. Esse fato, provavelmente ocorreu devido a estrutura do material, assim como a competição entre os fluxos dos dois solutos. Como o peso molecular do sal é menor que o da sacarose, este penetra espontaneamente na célula vegetal, e acarreta uma redução do coeficiente de transferência de massa da sacarose.

Conforme dados verificados na Tabela 4.10, a constante de velocidade do ganho de sólidos totais (S_{GS}), apresentou valor bastante superior a constante de velocidade de perda de umidade (S_{PU}). A velocidade de absorção de sólidos totais nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente foi cerca de 63% superior que a velocidade da saída de água, possivelmente resultando na maior difusividade efetiva média dos sólido totais em relação a umidade. Esse comportamento provavelmente está relacionado a quantidade, ao tipo e a concentração dos solutos utilizados na solução osmótica e a temperatura de operação. Os cubos de mandioca foram desidratados em solução ternária de sacarose, sal e água, em alta concentração (56% p/p) combinada com elevada temperatura (52°C). Elevadas temperaturas, aumentam a solubilidade dos solutos e provocam alterações na estrutura celular do vegetal, elevando a velocidade de difusão do cloreto de sódio e da sacarose para o interior do cubo de mandioca, em comparação com a difusão da água. Diversos autores observaram valores de difusividade do sólido maior do que a difusividade da água na desidratação osmótica de vegetais (ARIAS et al., 2017; ASSIS et al., 2017; HAMED I et al., 2018; AZARPAZHOOH; RAMASWAMY, 2012; ZÚÑIGA; PEDRESCHI, 2011). Assis et al. (2017) verificaram menores valores de difusividade da água em relação aos sólidos totais na desidratação osmótica de cubos de maçã em solução de sacarose e sorbitol, em temperaturas que variaram de 25 a 60°C. Eles relatam que a solução de sacarose possui elevada viscosidade devido ao alto peso molecular do soluto, dificultando o transporte de água entre o produto e a solução.

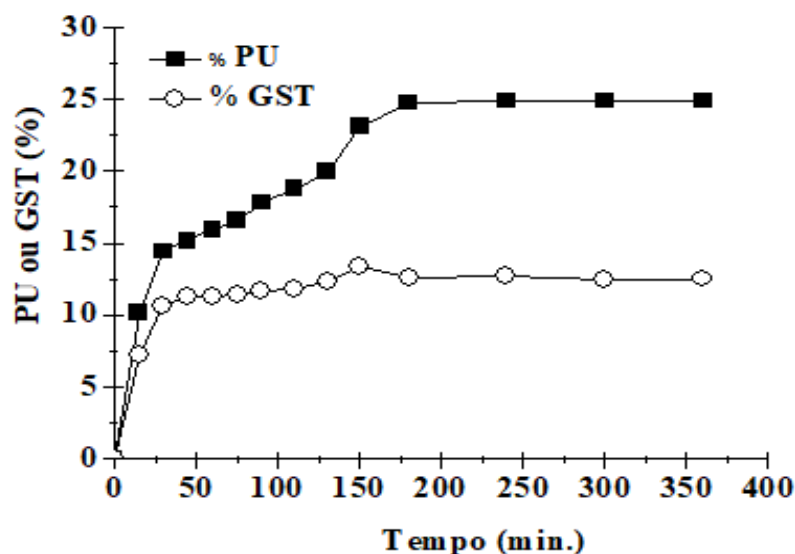
Arias et al. (2017) constataram menores valores de difusividade efetiva de umidade em mangas a 50°C, ao aumentar a concentração da solução de sacarose de 45 para 60°Brix. Eles explicaram que esse comportamento se deve ao fato de que a solução mais diluída pode penetrar melhor dentro dos tecidos, ao contrário das soluções concentradas que são mais viscosas e podem formar uma camada superficial de sacarose, dificultando a saída de água do material. Da mesma forma, Assis et al. (2017) verificaram menores valores de difusividade da água comparados a dos sólidos, na desidratação osmótica de cubos de maçã em solução de sacarose e sorbitol, em temperaturas que variaram de 25 a 60°C. Eles comprovaram que o tipo de agente osmótico utilizado, assim como seu peso molecular, influenciaram na difusão da

água, sendo obtidas difusividades menores quando a desidratação osmótica foi realizada com solução de sacarose. Os autores explicaram que a solução de sacarose é mais viscosa que o sorbitol e que a sacarose possui maior peso molecular, dificultando o transporte de água entre o produto e a solução.

Hamedi et al. (2018) observaram maiores valores de difusividade do sólido em relação a da água, na desidratação osmótica de cilindro de gel ágar, em solução de sacarose com 100% de potência no banho ultrassônico. Eles argumentaram que o aumento da concentração da solução osmótica, resultou na maior absorção de sólidos na amostra, devido ao aumento do gradiente de pressão osmótica entre a solução e o produto desidratado.

As taxas de migração dos sólidos totais e do conteúdo de umidade, apresentadas na Figura 4.22, demonstram que o ganho sólidos totais atinge mais rapidamente a condição de equilíbrio em relação a perda de umidade nos cubos de mandioca. Isto indica uma maior dificuldade de migração de água da matriz sólida para a solução osmótica circundante quando comparada com a transferência de solutos dessa (sacarose e sal) para o interior do sólido. Demais considerações, tais como, a maior quantidade de umidade em migração, o efeito sinérgico do sal para a penetração de sacarose na membrana vegetal e outros, podem esclarecer essa diferença de valores entre as difusividades efetivas média de sólidos totais e de umidade.

Figura 4.22– Cinéticas de perdas de umidade e ganho de sólidos totais, na desidratação osmótica de cubos de mandioca em solução de sacarose e cloreto de sódio.



PU= perda de umidade, GST= ganho de sólidos totais.

Fonte: o próprio autor (2018).

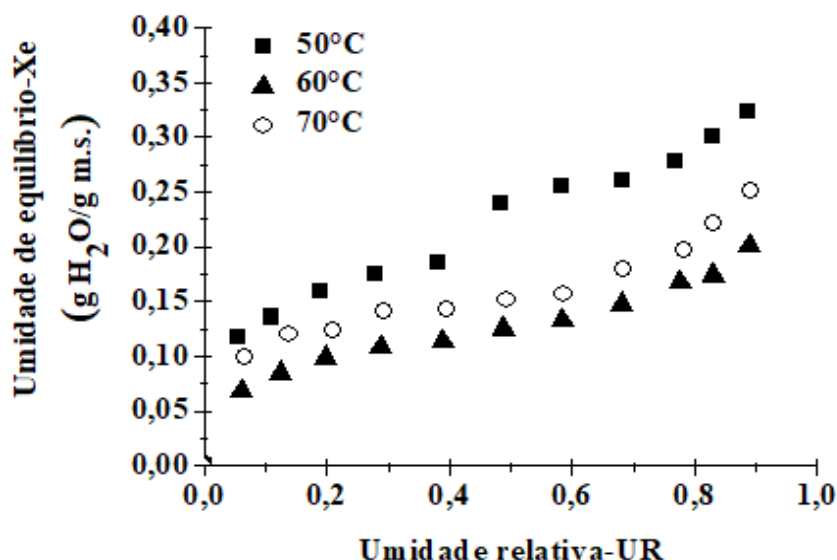
4.3 Secagem Convectiva

4.3.1 Isotermas de desorção dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados na melhor condição do pré-tratamento osmótico

Através dos valores apresentados na Tabela D.1 e D.2 (ver Apêndice D) tornou-se possível plotar as curvas de Xe obtidas experimentalmente em função de UR do ar, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, para os cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente. Tais curvas estão apresentadas na Figura 4.23 e 4.24, para os cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente, respectivamente.

Conforme a Figura 4.23, as isotermas de equilíbrio dos cubos de mandioca *in natura* demonstraram curvas com comportamento sigmoidal do tipo II, de acordo com a IUPAC 1985 e Brunauer et al. (1940). Segundo Oliveira et al. (2013), as isotermas mais comuns em alimentos são as do tipo II (características de produtos amiláceos e ricos em proteínas) e as do tipo III (características de produtos ricos em sólidos solúveis como açúcares).

Figura 4.23– Isotermas de desorção dos cubos de mandioca *in natura* obtidas experimentalmente nas temperaturas analisadas



Fonte: o próprio autor (2018).

Alimentos como: farinha de mandioca temperada (SANTOS et al., 2004), farinha de tapioca (CHISTÉ et al., 2012), farinha de mandioca do grupo seca e d'água (CHISTÉ et al., 2015) e outros produtos amiláceos como amido de mandioca (PERDOMO et al., 2009;

SOUZA et al., 2013), apresentaram isotermas do tipo II. Este fato é explicado pela presença dos biopolímeros hidrofílicos que se unem facilmente a água, como o amido, glúten e celulose (NÁVIA et al., 2011). Considerando que as moléculas de água estão intensamente ligadas a estes biopolímeros hidrofílicos (polissacarídeos), o número de sítios que se unem fortemente a molécula de água provavelmente é alto no substrato rico em carboidrato. Como resultado, alimentos ricos em amido, como a mandioca e outros produtos a base dessa matéria-prima, mostram mais isotermas do tipo II (YANNIOTIS; BLAHOVEC, 2009).

Analisando os valores das umidades de equilíbrio nos ensaios com temperaturas de 50 e 60°C na Figura 4.23, observou-se que as mesmas diminuíram com o aumento da temperatura, para semelhante valor de umidade relativa do ar. Tal comportamento está de acordo com o observado por diversos autores nos estudos de produtos agrícolas: Andrade et al. (2017), Campos et al (2016), Corrêa Filho et al. (2018) e Oliveira et al. (2017).

O decréscimo da umidade de equilíbrio, à umidade relativa constante, com o aumento da temperatura é esperado devido ao aumento da pressão de vapor da água. Este aumento é maior na superfície do produto, pois a mesma apresenta maior número de moléculas de água que o ar. Maior pressão de vapor implica em maior perda de água para que se atinja o equilíbrio (MORAES, et al., 2007). Com o aumento da temperatura as moléculas de água atingem elevados níveis energéticos, ficando termodinamicamente menos estáveis, favorecendo a quebra da ligação entre a água e os locais de sorção, diminuindo assim, o teor de água do produto (PURI; KHAMRUI, 2016; RIZVI, 2005).

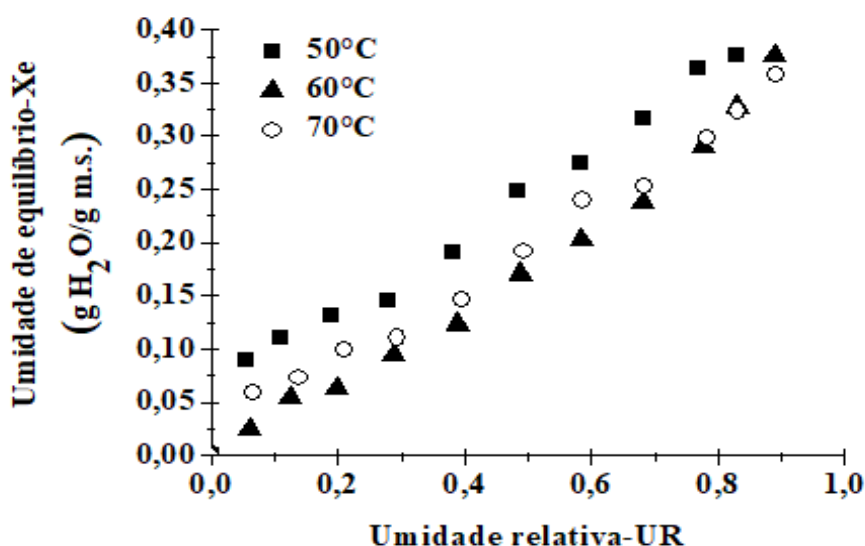
Na Figura 4.23, observou-se que os valores de umidade de equilíbrio das isotermas a 70°C foram maiores do que os valores das umidades de equilíbrio das isotermas a 60°C. Uma possível explicação para esse comportamento seria a gelatinização do amido. Quando este polissacarídeo é exposto a temperaturas superiores a 60°C, sua estrutura cristalina é rompida e os grupos hidroxilas (-OH) das cadeias de amilose e amilopectina que constituem o amido, ficam livres, aumentando os sítios de adsorção de água, elevando a umidade de equilíbrio do produto em altos valores de umidade relativa (SILVA et al., 2012a). Ascheri et al. (2009), observaram aumento da umidade de equilíbrio de adsorção do amido de rizomas do lírio-do-brejo, ao aumentar a temperatura. Eles explicaram que o aumento ocorreu provavelmente por causa da gelatinização do amido. Ayla-ponte (2011) notou que a atividade de água da farinha de mandioca aumentou com a elevação da temperatura para um valor de umidade relativa do ar fixo. O autor comprovou através da análise estatística que a temperatura apresentou efeito significativo no teor de umidade de equilíbrio de adsorção da farinha. Fiorentin et al. (2010), constataram maiores valores de umidade de equilíbrio de sorção nas maiores temperaturas, ao

trabalhar com bagaço de laranja. O esclarecimento desse comportamento foi atribuído a presença da casca de laranja no bagaço, cujo objetivo é de proteger e impedir a perda de umidade do interior do fruto para o ambiente, pois, se isto não ocorresse, a laranja poderia ter uma maior redução de umidade quando a umidade ambiente fosse baixa. Chisté et al. 2015, obtiveram resultados contrários ao desta pesquisa, eles perceberam que a umidade de equilíbrio de dessecção da farinha de mandioca diminuiu com o incremento da temperatura.

De forma semelhante aos cubos de mandioca *in natura* as isotermas de equilíbrio dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente na Figura 4.24 demonstraram curvas com comportamento sigmoidal do tipo II. Resultado semelhante para mamerlos desidratados osmoticamente, foram obtidos por Noshad et al. 2012. Porém, para outras frutas desidratadas osmoticamente como: mamão (Jain et al. 2010; Udokom et al. 2015), maçã e pêra (Mrad et al. 2013), os autores verificaram curvas com comportamento sigmoidal do tipo III. Eles argumentaram que esse comportamento é típico de alimentos com alto teor de açúcares.

Na Figura 4.24 são apresentados os valores médios do teor de umidade de equilíbrio de dessecção dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente para diferentes condições de temperatura e umidade relativa.

Figura 4.24– Isotermas de dessecção dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente obtidos experimentalmente nas temperaturas analisadas



Fonte: o próprio autor (2018).

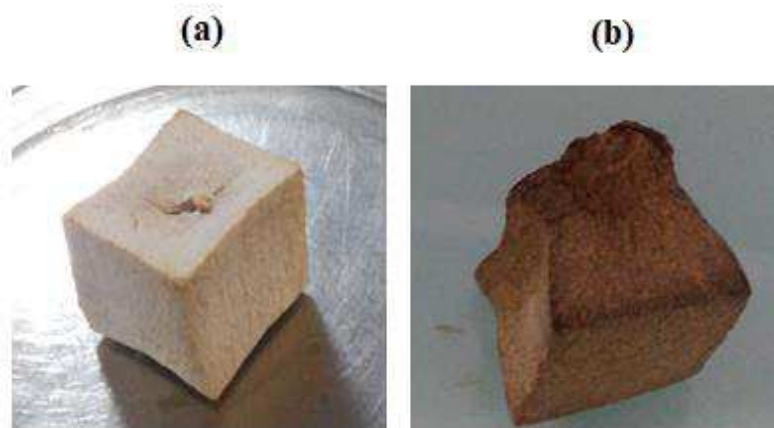
Analisando a Figura 4.24, pode-se verificar a influência da temperatura de 50 e 60°C sobre a higroscopicidade dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente, a qual está de

acordo com o observado para os cubos de mandioca *in natura*. A isoterma na temperatura de 60°C apresentou menores valores de umidade de equilíbrio comparada a de 50°C, mantendo-se abaixo da isoterma de menor temperatura. Entretanto na temperatura de 70°C observou-se um comportamento de dessorção anômalo. Ocorreu o cruzamento das isotermas de 70 e 60°C a um valor de umidade relativa do ar maior ou igual a 0,782. A partir desse valor de umidade relativa, verifica-se uma inversão de comportamento entre os valores de umidade de equilíbrio das curvas de 60 e 70°C. Essa última passa a apresentar maiores valores de umidade de equilíbrio em relação a 60°C para condições constantes de umidade relativa do ar com o aumento da temperatura. A literatura chama esse fato de “efeito de inversão da temperatura”, “ponto de inversão” ou “cruzamento de isotermas”. Ele acontece provavelmente por causa do aumento da solubilidade dos açúcares em regiões cuja umidade relativa do ar se encontra em valores altos, ou seja, superiores a 0,6 (AYRANCLE et al., 1990; FALADE; AWORH, 2004; MRAD et al., 2013; NOSHAD et al., 2012; TSAMI et al., 1990; WEISSER et al., 1982). Resultados sobre o fenômeno do cruzamento têm sido relatados em vários frutos, principalmente porque o valor de umidade relativa do ar ou atividade de água em que o ponto de inversão ocorre, depende da composição química do alimento, tipo, concentração e propriedades da solubilidade do açúcar e do tempo da desidratação osmótica que o produto foi submetido (DJENDOUBI et al., 2012; UDOKOM et al., 20015).

Resultados análogos ao deste trabalho, foram encontrados por Noshad et al. 2012. Eles verificaram que o ponto de inversão da umidade de equilíbrio de marmelos desidratados osmoticamente em solução de sacarose a diferentes temperaturas ocorreu em valores de umidade relativa próximo a 0,8. Para o damasco o ponto de inversão foi de 0,75, para ameixa 0,70, para figo 0,65 e para groselha 0,55 (TSAMI et al., 1990). Por outro lado, não foram observados cruzamentos de isotermas para algumas frutas tropicais tais como: mamão (UDOKOM, et al., 2015), manga (JANJAI et al., 2007) e lichia (JANJAI et al., 2010).

Nos ensaios experimentais de isotermas de dessorção a 70°C observou-se alterações na cor e aroma dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente, apresentando cor de caramelo e odor de queimado. Provavelmente ocorreu reação de caramelização da sacarose no produto. Esse fato não ocorreu nos ensaios de isotermas de dessorção dos cubos de mandioca *in natura* secos na mesma temperatura como mostra a Figura 4.25 (a).

Figura 4.25–Cubos secos a 70°C (a) *in natura* sem escurecimento e (b) pré-tratado osmoticamente com escurecimento



Fonte: o próprio autor (2018).

A caramelização é um processo que envolve a degradação de açúcares na ausência de proteínas ou aminoácidos, quando açúcares são aquecidos a temperaturas acima de seus pontos de fusão. Esse processo ocorre em condições ácidas ou alcalinas, estando associado a mudança de aroma, sabor e cor, formando produtos com aspectos de “queimado” (ALDRIGUE et al., 2002).

Desta forma, os maiores valores de umidade de equilíbrio nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente a 70°C, provavelmente é justificado devido ao processo da gelatinização do amido que acontece em temperaturas superiores a 60°C e também pela dissolução da sacarose que aumenta de acordo com o aumento da temperatura, promovendo reações de caramelização em meio ácido (UDOMKUN et al., 2015; SILVA et al., 2012a).

Constatou-se que os valores finais da umidade de equilíbrio dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente foram menores do que os dos cubos *in natura* segundo as Figuras 4.24 e 4.23 respectivamente. Estes resultados estão de acordo com Noshad et al. (2012), Udomkun et al. (2015) e Kurozawa et al. (2005), em seus estudos com isotermas de produtos desidratados osmoticamente e *in natura*.

Com os dados das isotermas dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente obtidos experimentalmente, realizou-se uma regressão não-linear através do método dos mínimos quadrados, utilizando as Equações de GAB, BET, Oswin, Peleg, Copace, Chung-pfost e Smith. Os modelos matemáticos foram ajustados aos dados observados de umidade de equilíbrio de dessecção para os cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente, para diferentes condições de temperatura e umidade relativa do

ar. Os resultados dos ajustes para cada temperatura estão apresentados na Tabela 4.12 e 4.13 para os cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente respectivamente.

Tabela 4.12 – Parâmetros de ajuste das isotermas de dessecção dos cubos de mandioca *in natura* para cada temperatura de estudo

Modelo	Parâmetros	Temperatura (°C)		
		50	60	70
GAB	X_m	0,171	0,091	0,106
	C	54,383	79,774	438,256
	K	0,542	0,604	0,627
	R^2	0,989	0,995	0,985
	P(%)	3,939	2,396	4,102
BET	X_m	12,561	9,861	5,168
	C	12,561	21,158	12,482
	N	0,003	0,002	0,007
	R^2	0,957	0,932	0,865
	P(%)	8,497	10,332	12,450
OSWIN	A	0,219	0,127	0,159
	B	0,204	0,211	0,196
	R^2	0,986	0,997	0,986
	P(%)	4,293	2,229	4,175
PELEG	K_1	0,159	0,092	0,111
	n_1	0,412	0,417	0,372
	K_2	0,159	0,092	0,111
	n_2	0,412	0,417	0,372
	R^2	0,978	0,956	0,910
	P(%)	5,765	7,518	9,234
COPACE	A	-1,135	-1,172	-1,126
	T	0,958	1,198	1,100
	B	0,958	1,198	1,100
	C	1,048	1,072	0,983
	R^2	0,983	0,987	0,973
	P(%)	4,816	4,594	5,223
CHUNG-PFOST	A	0,022	0,057	0,026
	T	0,087	0,096	0,070
	B	0,026	0,028	0,020
	C	0,026	0,028	0,020
	R^2	0,986	0,996	0,985
	P(%)	4,057	2,580	3,865
SMITH	A	0,143	0,082	0,107
	B	0,093	0,055	0,063
	R^2	0,956	0,984	0,990
	P(%)	7,550	5,612	3,404

Fonte: o próprio autor (2018).

Na modelagem matemática, diversos autores argumentam que os modelos que oferecem o melhor ajuste possível aos dados experimentais, são aqueles que apresentam erro médio relativo (P) menor que 10% (HENAO et al., 2009; MADAMBA et al., 1996; ROSA et al., 2010). Normalmente, o coeficiente de determinação (R^2) apresenta elevados valores para aqueles modelos com ajuste satisfatório. Todavia, este parâmetro deve ser utilizado apenas

como auxiliar e não como critério de avaliação de modelos não lineares (CUNNINGHAM et al., 2007; GONELI et al., 2010; KASHANINEJAD et al., 2007).

Desta forma e de acordo com os dados da Tabela 4.12, o modelo de GAB descreveu com maior precisão as isotermas de dessorção para os cubos de mandioca *in natura*. Ele mostrou baixos valores do erro médio relativo ($P < 10\%$) e maiores coeficientes de determinação (R^2) em todas as temperaturas consideradas. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Koua et al. (2014) em seus estudos com isotermas de dessorção de mandioca. Os modelos de Chung-Pfost e Oswin, também ajustaram satisfatoriamente essas isotermas nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Os parâmetros do modelo de GAB possuem significados físicos, onde X_m representa o valor de umidade da monocamada e corresponde a quantidade dos sítios de sorção disponíveis na superfície do material. C e K são contantes de energia. A constante “C” (constante Guggenheim) está relacionada com a diferença de potencial químico nas camadas superiores e na monocamada, enquanto K é o parâmetro que leva em conta a diferença de potencial entre a monocamada e a água livre no alimento, sendo este parâmetro menor que 1 (TIMMERMANN et al., 2001; YAN, et al., 2012).

Os valores de umidade da monocamada (X_m) apresentados pelo modelo de GAB nas temperaturas de 50, 60 e 70°C foram de 0,171, 0,091 e 0,106 $g_{\text{água}}/g_{\text{massa seca}}$ respectivamente. Esses valores mostraram a diminuição da umidade da monocamada com o aumento da temperatura, apresentando valores bem próximos nas temperaturas de 60 e 70°C. Koua et al. (2014) encontraram valores menores de umidade da monocamada de GAB nas isotermas de dessorção de mandioca em temperaturas próximas a desta pesquisa. Eles obtiveram 0,054 e 0,042 nas temperaturas de 45 e 60°C, respectivamente.

O valor da umidade de monocamada (X_m) é reduzido com a elevação da temperatura devido à diminuição de número de zonas ativas decorrente de mudanças físicas e/ou químicas causadas pela temperatura (PURI; KHAMRUI, 2016).

A umidade de monocamada (X_m) refere-se a quantidade de água que se encontra profundamente adsorvida em locais específicos do alimento, mostrando um valor que assegure a sua estabilidade (GABAS et al., 2009).

Diferentes autores encontraram valores de umidade da monocamada para diversos tipos de farinha de mandioca: 0,079 $g_{\text{água}}/g_{\text{massa seca}}$ para as farinhas de mandioca do grupo d'água, 0,09 $g_{\text{água}}/g_{\text{massa seca}}$ para a farinha de mandioca do grupo seca (CHISTÉ et al., 2015) e 0,049 $g_{\text{água}}/g_{\text{massa seca}}$ para a farinha de tapioca (CHISTÉ et al., 2012), todos a uma temperatura de 25°C.

As constantes C e K de GAB são um indicativo do tipo de isoterma, de acordo com a classificação de Brunauer et al. (1940). Os valores de $0 < K \leq 1$ e $C \geq 2$ em todas as temperaturas estudadas, observados na Tabela 4.12, indicaram que as isotermas dos cubos de mandioca *in natura*, foram do Tipo II, segundo Blahovec (2004). A Figura 4.24 comprovou visualmente essa afirmação.

Na Tabela 4.13, estão apresentados os coeficientes dos modelos ajustados aos dados observados de umidade de equilíbrio de dessorção dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, a diferentes condições de umidade relativa do ar, com seus respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2) e do erro médio relativo (P).

Dentre os modelos avaliados na Tabela 4.13, o de GAB foi o que apresentou as menores magnitudes de erro médio relativo (P) com altos coeficientes de determinação (R^2), sendo o único que atendeu aos critérios utilizados para a descrição dos fenômenos da dessorção dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente.

Observa-se na Tabela 4.13 que os valores da monocamada de GAB foram de 0,179, 0,165 e 0,176 $\text{g}_{\text{água}}/\text{g}_{\text{massa seca}}$ para as temperaturas de 50, 60 e 70°C respectivamente. Ao analisar os valores da monocamada de GAB nas temperaturas de 50 e 60°C, verifica-se que os mesmos diminuíram de acordo com o aumento da temperatura. Porém, entre as temperaturas de 60 e 70°C, observa-se que o valor da monocamada a 70°C foi maior. E entre 50 e 70°C os valores de monocamada foram semelhantes para este modelo.

O maior valor de umidade da monocamada de GAB na temperatura de 70°C é explicado pela possível gelatinização do amido e aumento da solubilidade da sacarose que promove a reação de caramelização em temperaturas superiores a 60°C, como explicado anteriormente. O aumento da temperatura acarreta o inchamento dos grânulos de amido pela adsorção de água elevando de forma contínua a disponibilidade dos grupos polares do amido e conseqüentemente a afinidade pelas moléculas de água (AL-MUHTASEB et al., 2004; URQUHART, 1959). Assim como também, promove a maior solubilidade da sacarose em água, elevando a umidade do produto (UDOMKUN et al., 2015; SILVA et al., 2012a). Desta forma, esses dois comportamentos promoveram maior valor de umidade da monocamada de GAB a 70°C nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente, mostrando que tanto faz secar os mesmos a 50 ou a 70°C, o valor de umidade da monocamada que garante a estabilidade do alimento será o mesmo. A temperatura de 60°C foi escolhida para garantir a estabilidade do cubo de mandioca desidratado osmoticamente, pois a mesma apresentou

menor valor de umidade da monocamada de GAB em relação às amostras secas a 50 e a 70°C.

Tabela 4.13 – Parâmetros de ajuste das isotermas de dessorção dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente para cada temperatura de estudo

Modelo	Parâmetros	Temperatura (°C)		
		50	60	70
GAB	X_m	0,179	0,165	0,176
	C	15,205	3,528	6,229
	K	0,675	0,700	0,633
	R^2	0,993	0,999	0,995
	P(%)	7,100	4,145	6,357
BET	X_m	485,364	120,777	332,890
	C	0,002	0,002	0,001
	N	0,573	1,459	0,891
	R^2	0,980	0,995	0,991
	P(%)	12,297	10,318	10,880
OSWIN	A	0,232	0,158	0,180
	B	0,318	0,444	0,361
	R^2	0,987	0,989	0,983
	P(%)	7,494	18,895	11,222
PELEG	K_1	0,217	0,204	0,190
	n_1	0,746	1,222	0,923
	K_2	0,217	0,204	0,190
	n_2	0,746	1,222	0,923
	R^2	0,984	0,994	0,991
	P(%)	10,650	11,641	10,307
COPACE	A	-1,435	-1,811	-1,579
	T	0,933	1,111	1,044
	B	0,933	1,110	1,044
	C	1,651	2,336	1,874
	R^2	0,992	0,993	0,990
	P(%)	6,610	17,869	8,880
CHUNG-PFOST	A	0,020	0,021	0,022
	B	0,132	0,136	0,124
	T	0,086	0,162	0,116
	C	0,086	0,162	0,116
	R^2	0,993	0,998	0,993
	P(%)	6,079	10,339	7,077
SMITH	A	0,107	0,038	0,071
	B	0,160	0,163	0,143
	R^2	0,978	0,991	0,978
	P(%)	10,511	15,738	11,910

Fonte: o próprio autor (2018).

Verificou-se que os valores de umidade da monocamada dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente foram maiores do que os dos cubos *in natura* segundo os dados das Tabelas 4.12 e 4.13, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com as informações de Kurozawa et al. (2005) que estudaram as isotermas de dessorção de cogumelo *in natura* e desidratado osmoticamente e discordam com os resultados de Nosahd et al. (2013)

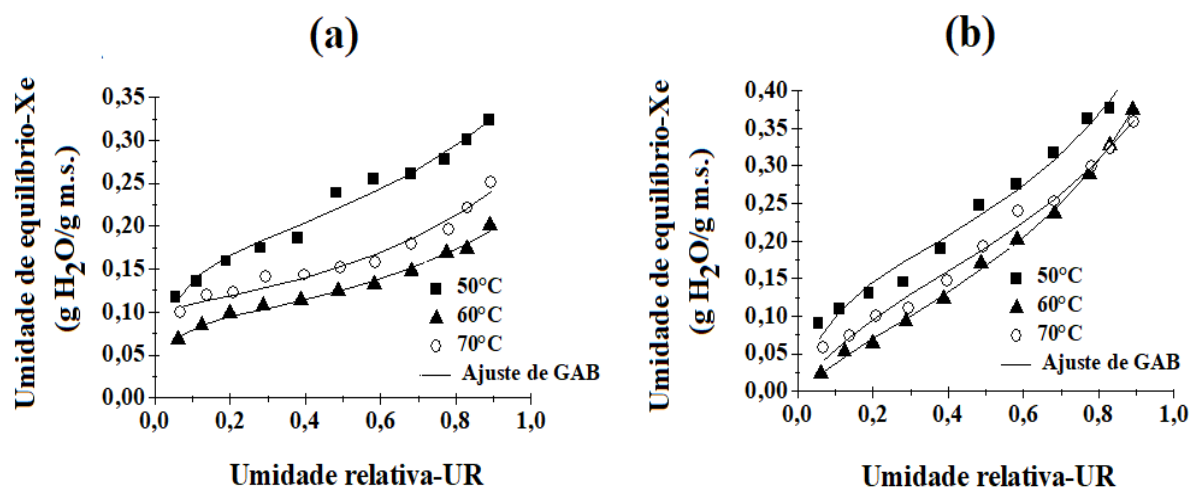
que analisaram as isotermas de dessorção de marmelos *in natura* e desidratados osmoticamente.

Observando os parâmetros C e K para o modelo de GAB na Tabela 4.13, constata-se para todas as temperaturas, os valores de $K < 1$ e $C > 2$. Isso indica, de acordo com Blahovec (2004), que esses valores configuram as isotermas do Tipo II, conforme verificado visualmente na Figura 4.25.

Na Figura 4.26 são apresentados os valores médios do teor de umidade de equilíbrio de dessorção para os cubos de mandioca *in natura* (a) e desidratados osmoticamente (b), para diferentes condições de temperatura e umidade relativa. As curvas da Figura 4.26 foram ajustadas com o modelo de GAB para os cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente, respectivamente.

O modelo de GAB se ajustou bem ao comportamento dos dados observados experimentais dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente, conforme a Figura 4.26. O mesmo apresenta a vantagem de ser um modelo relativamente simples e possui número de parâmetros (três) suficientes para justificar sua flexibilidade aos dados observados. É o modelo que melhor se ajusta as isotermas de sorção de produtos alimentícios e, portanto o mais utilizado. Ele representa adequadamente os dados experimentais na faixa de umidade relativa do ar de maior interesse prático em alimentos (0,10 a 0,90) (AKOY; HÖRSTEN, 2013; MORAES; PINTO 2012; OLIVEIRA et al., 2011b; PAGLARINI et al., 2013).

Figura 4.26—Valores observados e estimados pelo modelo de GAB, do teor de umidade de equilíbrio de dessorção dos cubos de mandioca *in natura* (a) e desidratados osmoticamente (b) respectivamente



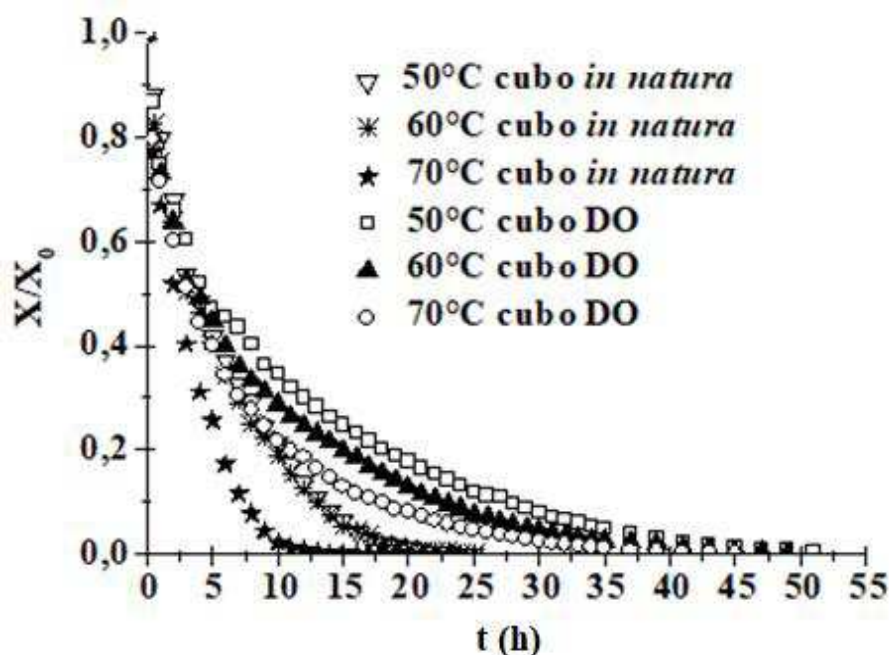
Fonte: o próprio autor (2018).

O modelo de GAB tem sido amplamente reconhecido por prever o comportamento de isotermas de alimentos ricos em amido, particularmente a mandioca, bem como as frutas desidratados osmoticamente. Chisté et al. (2015), Chisté et al. (2012), Ayala-Aponte (2011) e Cahyanti et al. (2018) obtiveram bom ajuste pelo modelo de GAB para isotermas de farinha de mandioca. Assim como Perdomo et al. (2009) para fécula e Edoun e Kuitche (2014) para folhas de mandioca. Para produtos desidratados osmoticamente, este modelo se ajustou bem as isotermas de dessecção de cubos de mamão nas temperaturas de 30, 50 e 70°C (UDOKUM et al., 2015) e pêra nas temperaturas de 45 e 60°C (MRAD et al., 2013).

4.3.2 Cinética de secagem para os cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente

A Figura 4.27 mostra os adimensionais de umidade em função do tempo de processo para os cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente nas várias temperaturas do ar de secagem. A análise das curvas de cinética da variação de umidade para os dois tipos de amostras por 53 horas, demonstrou que a redução de umidade é um processo não linear.

Figura 4.27–Adimensional de umidade em função do tempo para o processo de secagem dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente a várias temperaturas do processo



Fonte: o próprio autor (2018).

Ao comparar as curvas para os dois tipos de amostras é evidente que o menor tempo de secagem foi detectado para as amostras secas sem pré-tratamento. O cubo *in natura* seco a 70°C apresentou o menor tempo de secagem num total de 22 horas, e o cubo desidratado osmoticamente seco a 50°C apresentou o maior tempo de secagem, totalizando 53 horas de processo, mais que o dobro do tempo da amostra *in natura* seca a 70°C. Castiglioni et al. (2013) relataram que o menor tempo de secagem convectiva da massa fibrosa da mandioca foi alcançado na maior temperatura estudada, a 67°C.

Analisando a Figura 4.27 para cinética de secagem do material *in natura* seco a 50 e 60°C, observa-se tendência semelhante nas curvas de secagem para estas duas temperaturas, pois as mesmas coincidiram em todo tempo de processo. No entanto, verificando separadamente as curvas de secagem para a amostra *in natura* nas temperaturas de 50 e 70°C e 60 e 70°C, observou-se outro tipo de comportamento, a medida que a temperatura aumentou, a curva tornou-se mais acentuada. O tempo necessário para reduzir a taxa de umidade para qualquer nível determinado foi dependente da temperatura de secagem, sendo menor a 70°C, como dito anteriormente. Desta forma, o uso de temperaturas menores como 50 e 60°C no material *in natura*, precisou de mais tempo para atingir o teor de umidade desejado no processo de secagem. Por outro lado, mais de 50% da umidade dos cubos de mandioca *in natura*, foram removidas durante as primeiras 5 horas de secagem a 70°C, e nas primeiras 8 horas de secagem a 50 e 60°C. O conteúdo restante de água foi eliminado em um período comparativamente maior. Isso provavelmente ocorreu devido ao encolhimento do cubo com a correspondente redução de poros que aumentou a resistência do transporte de água durante o processo de secagem (PEREIRA et al., 2009).

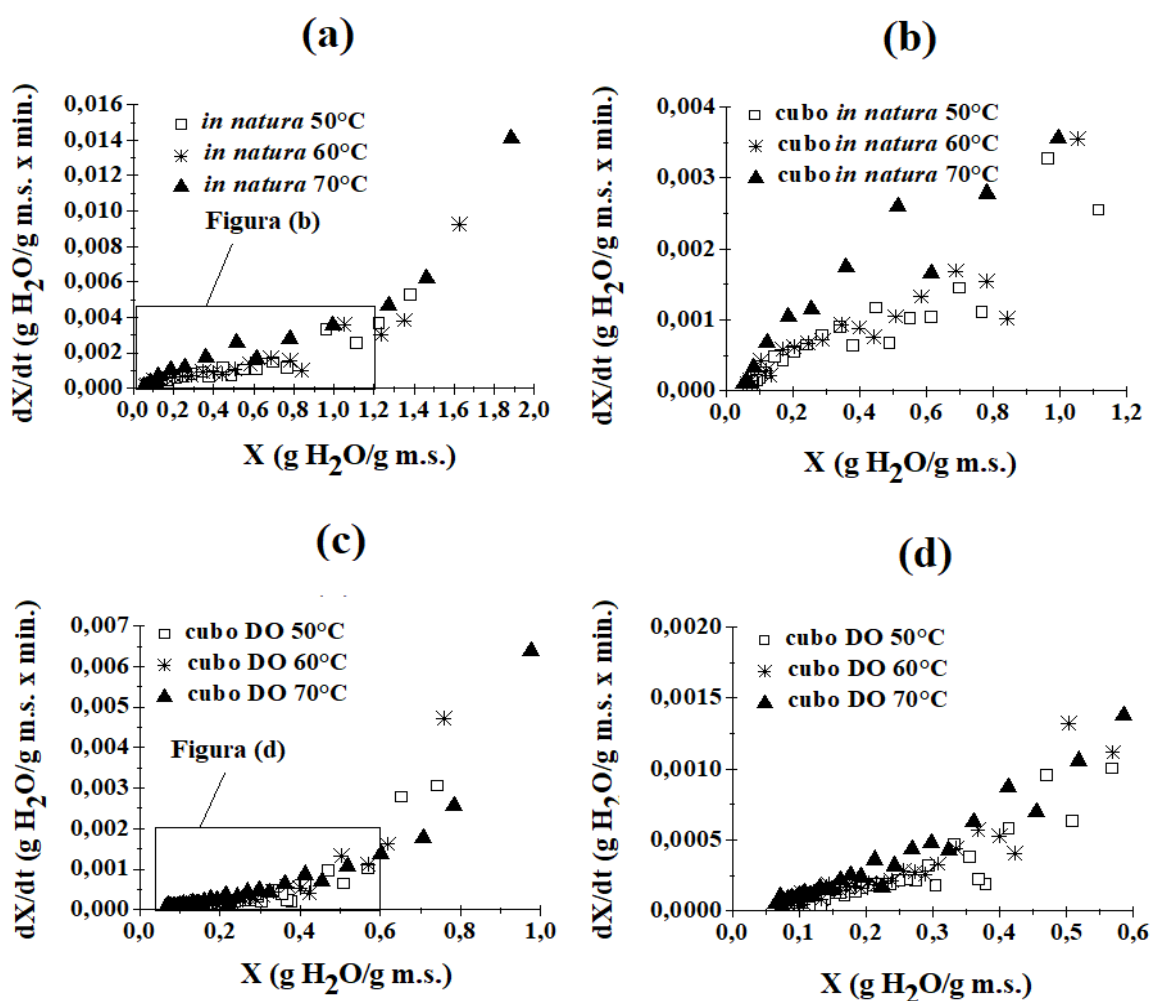
Observou-se que a umidade do material desidratado osmoticamente diminuiu rapidamente nas maiores temperaturas, gerando curvas mais pronunciadas mediante o aumento deste parâmetro, através dos resultados mostrados na Figura 4.27. Mais de 50% de umidade dos materiais pré-tratados osmoticamente nas três temperaturas analisadas, foram retiradas nas 10 horas iniciais de processo de secagem.

As amostras desidratadas osmoticamente levaram maior tempo de secagem quando comparadas com as amostras *in natura* nas três temperaturas. Pavkov et al. (2011) observaram resultado semelhante ao estudar a cinética de secagem a 60°C de sementes de nectarina *in natura* e desidratadas osmoticamente. Kowalski e Łechtańska (2015) também relataram comportamento parecido ao comparar o tempo de secagem para beterraba *in natura* e para a desidratada osmoticamente em solução de NaCl a 25% a 65°C. Eles argumentaram que o maior tempo de secagem no material desidratado, foi devido a cristalização da sacarose

contida na beterraba, e a impregnação dos solutos na superfície do alimento. Os mesmos agiram como barreira para saída de umidade do produto. Todavia, Kowalski e Mierzwa (2011), afirmaram que vegetais submetidos ao processo de desidratação osmótica devem secar em menor tempo do que os vegetais *in natura* pelo fato de apresentarem menor teor de umidade. Osidacz e Ambrosio-Ugri (2013) constataram que a berinjela desidratada osmoticamente em solução de NaCl a 10%, atingiu menor tempo de secagem a 70°C em comparação com a berinjela *in natura* seca na mesma temperatura.

As taxas de secagem dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente em função do tempo foram obtidas derivando a curva de secagem expressa por umidade em base seca (X) em função do tempo, e estão apresentadas na Figura 4.28.

Figura 4.28–Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente a várias temperaturas do processo



Fonte: o próprio autor (2018).

A Figura 4.28 revela que não há período de taxa de secagem constante para os dois tipos de materiais estudados, e que todo o processo de secagem ocorre no período de taxa decrescente, sendo representado pela primeira e segunda fase da taxa decrescente com controle interno de migração de umidade. Diversos autores também observaram esse comportamento para vários tipos de vegetais, tais como, Akoy (2014), Cabrera et al. (2016), Kek et al. (2013) e Rayaguru e Routray (2012).

No período de taxa decrescente, a mesma diminui gradualmente devido a diminuição da evaporação da água no interior do material, o processo passa a ser controlado pelo mecanismo de migração interna de umidade do material, de modo que uma camada seca começa a se formar na superfície do produto. Após a remoção da umidade ligada do alimento, acontece a mudança de fase dos vários tipos de umidade intrínsecas do alimento, onde as mesmas estão ligadas aos componentes por forças físicas e químicas (PAVKOV et al., 2011).

A influência dos níveis selecionados de temperatura do ar de secagem e do tipo de amostra na cinética de secagem é claramente visível nas imagens mostradas na Figura 4.28. Comparando as curvas de taxa de secagem para os dois tipos de amostras em todas as temperaturas analisadas, pode-se observar que as maiores taxas de secagem foram alcançadas nos materiais *in natura*, devido a sua maior umidade inicial comparada às amostras desidratadas osmoticamente. Kaya et al. (2008) pesquisando secagem de Kiwui fresco e pré-tratado osmoticamente, constataram maior taxa de secagem nas amostras *in natura* a temperaturas mais elevadas. Eles justificaram tal comportamento, ao alto valor de umidade das amostras *in natura* e explicaram que o aumento da diferença de temperatura entre o ar de secagem e o produto acelera a migração de água. A maior diferença de temperatura entre o ar seco e os cubos *in natura* aumentou o coeficiente de transferência de calor, influenciando a taxa de transferência de calor e massa. Vários autores relataram resultados semelhantes para a secagem de frutas *in natura* e desidratadas osmoticamente, como figos (BABALIS; BELESSIOTIS, 2004; GUPTA; PATIL, 2014; SACILIK; ELICIN, 2006; TOGRUL, 2005).

A impregnação da sacarose e do cloreto de sódio no material desidratado durante o pré-tratamento osmótico dos cubos de mandioca, provavelmente foi responsável pela diminuição da taxa de secagem. Resultados iguais foram verificados por diversos autores em seus estudos com secagem de vegetais pré-tratados osmoticamente, como: Osidacz e Ambrosio-Ugri (2013) para berinjela, Dionello et al. (2009) para abacaxi, Kaya et al. (2016) para cenoura, Andrés et al. (2007) para manga e Sanjinez Argandoña et al. (2005) para goiaba, Pavkov et al. (2011) para sementes de nectarina, Azoubel et al. (2009) para castanha de cajú, Guiné (2006)

e Park et al. (2002) para pêra, Korsilabut et al. (2010) para melão, Riva et al. (2005) damasco, Sankat et al. (1996) para banana e Singh e Gupta (2007) para cenoura.

Dionello et al. (2009) trabalhando com secagem de abacaxi *in natura* e desidratado em soluções de sacarose e açúcar invertido, explicaram que as baixas taxas de umidade encontradas nas amostras desidratadas osmoticamente, ocorreram devido a concentração da solução osmótica e ao tipo de soluto utilizado na mesma. Solutos com menor peso molecular como a glicose e frutose encontradas no açúcar invertido, penetram com mais facilidade que a sacarose nos tecidos da camada superficial do vegetal, entrando mais intensamente, de forma a dificultar a retirada de água no interior do alimento, reduzindo assim, a taxa de secagem.

Andrés et al. (2007) e Sanjinez Argandoña et al. (2005), descobriram que a presença de moléculas de sacarose no tecido pré-tratado de manga e goiaba, respectivamente, aumentou a resistência interna à difusão da água.

Pavkov et al. (2011), trabalhando com sementes de nectarina *in natura* e desidratadas osmoticamente, explicaram que a diferença entre as pressões parciais das moléculas de água na superfície do material *in natura* e no ar úmido é maior. Tal comportamento promove um alto coeficiente de transferência de umidade da superfície para o ar circundante, gerando evaporação mais rápida e aumento da taxa de secagem. A redução na umidade da amostra pré-tratada osmoticamente gera uma diminuição entre as pressões parciais das moléculas de água na superfície do material e no ar úmido durante o processo de secagem. A medida que a concentração do soluto no tecido do vegetal aumenta, a difusividade efetiva do coeficiente de umidade diminui, retardando a secagem da amostra desidratada osmoticamente.

A partir dos dados observados na Figura 4.28 (b) e (d), realizou-se uma análise de dispersão da primeira e segunda fase da taxa decrescente para conteúdo de umidade menor que 0,6 g H₂O/g m.s para as amostras *in natura* e menor que 1,2 g H₂O/g m.s para as amostras desidratadas osmoticamente. Deste modo, através da análise cuidadosa dos diagramas exibidos, verificou-se na Figura 4.28 (b), que o aumento no nível de temperatura de 50 para 60°C, não provocou influência sobre as taxas de secagem para os cubos de mandioca *in natura*. No entanto, a 70°C observou-se aumento nas taxas de secagem para amostra fresca. O aumento da temperatura de 50 para 70°C na secagem dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente (Figura 4.28 d), não gerou efeito nas taxas de secagem dos mesmos.

Os parâmetros que caracterizaram a secagem convectiva dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente estão apresentados na Tabela 4.14. As umidades dos dois tipos de amostras foram obtidas dinamicamente, pesando-se os cubos até alcançar peso

constante no processo de secagem convectiva dos mesmos. O parâmetro estudado foi a temperatura do ar de secagem, a qual variou de 50 a 70°C.

Tabela 4.14 – Caracterização da secagem convectiva dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente

Material	T (°C)	$X_{inicial}^i$		$X_{transição}^i$		X_{final}^i		$t_{trans}^{ii} =$ 1ªetapa (h)	$t_{2ªetapa}$ (h)	t_{total} (h)
		(b.s.)	(b.u.)	(b.s.)	(b.u.)	(b.s.)	(b.u.)			
In natura	50	1,38	0,58	1,11	0,53	0,06	0,06	1	24	25
	60	1,67	0,63	1,09	0,52	0,05	0,05	2	28	30
	70	1,88	0,65	1,00	0,50	0,04	0,04	2	20	22
Desidratado	50	0,74	0,43	0,57	0,36	0,06	0,06	1	52	53
	60	0,76	0,43	0,57	0,36	0,05	0,05	1	48	49
	70	0,98	0,49	0,60	0,37	0,04	0,04	2	43	45

Notações: ⁱValor médio em triplicata nas bases seca e úmida, ⁱⁱtempo de transição.

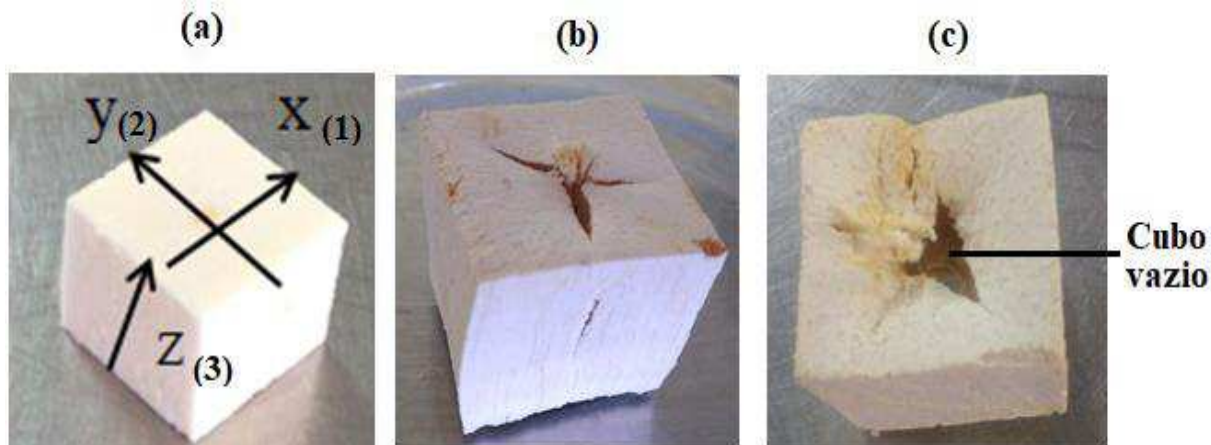
Fonte: o próprio autor (2018).

Os valores da umidade inicial ($X_{inicial}$) dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente estão apresentados na Tabela 4.14, assim como os valores do tempo total (t_{total}) de secagem convectiva para os dois tipos de amostras estudadas em todas as temperaturas. Como dito anteriormente, não houve período de taxa de secagem constante para os dois tipos de materiais. Pode-se verificar na Tabela 4.14, através dos valores da umidade de transição ($X_{transição}$), que ocorreram dois períodos da taxa decrescente de secagem com controle interno de migração de umidade, antes dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente alcançarem a umidade final (X_{final}). Os tempos de transição (t_{trans} ou 1ªetapa) e da segunda etapa ($t_{2ªetapa}$) correspondem aos períodos da primeira e segunda fase da taxa decrescente, respectivamente.

Observa-se na Tabela 4.14 que as amostras *in natura* atingiram a umidade de equilíbrio em menor tempo que as amostras desidratadas osmoticamente, como mostrado na Figura 4.27. Os valores da umidade final (X_{final}) foram iguais para os dois tipos de amostra em cada temperatura estudada.

Durante a secagem convectiva das amostras frescas e pré-tratadas osmoticamente em todas as temperaturas, surgiram rompimentos no conjunto das fibras que constituem o cubo de mandioca. As fissuras formadas nos cubos aumentaram de acordo com o tempo prolongado da secagem convectiva, e ocorreu de forma mais rápida nas amostras *in natura*, pois estas não apresentavam uma barreira de solutos para protegê-la, ao contrário dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente. A Figura 4.29 mostra os cubos de mandioca inteiro e rompidos antes e após a secagem convectiva.

Figura 4.29—Cubo *in natura* sem fissuras (a), cubo seco *in natura* (b) e pré-tratado osmoticamente (c) com fissuras



Fonte: o próprio autor (2018).

A Figura 4.29 apresenta as fissuras formadas nos eixos (1), (2) e (3) dos cubos secos. O eixo (3) se encontra na área da seção longitudinal, paralelo ao conjunto das fibras do cubo de mandioca e ao escoamento do ar de secagem. Os eixos (1) e (2) se localizam na área da seção transversal da amostra, perpendicular ao conjunto das fibras do cubo e ao escoamento do ar de secagem. As fissuras formadas nesses dois eixos da amostra foram maiores do que as formadas no eixo (3), justamente por causa de suas localizações. Como elas se encontram perpendiculares ao escoamento do ar de secagem, foram atingidas com maior impacto pelo mesmo, formando um espaço vazio no cubo, afetando seu formato inicial. Através desta constatação nos dois tipos de amostras secas, justificam-se os valores iguais de umidade de equilíbrio dos materiais *in natura* e pré-tratados osmoticamente alcançados nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Desta forma, o período “total” da secagem convectiva para os dois tipos de amostras nas três temperaturas, foi até o momento onde não ocorreu o rompimento das amostras. A Tabela 4.15 mostra os novos parâmetros da secagem convectiva para os cubos secos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente para todas as temperaturas, considerando um tempo menor de secagem sem ocorrência de fissuras.

De acordo com a Tabela 4.15, os teores de umidade encontrados nos cubos de mandioca secos *in natura* e desidratados osmoticamente em todas as temperaturas analisadas, foram abaixo de 13% em base úmida. Estes valores encontram-se dentro do padrão estabelecido pela Resolução RDC nº 23, de 14 de Dezembro de 2005 (BRASIL, 2005b). Essa legislação estabelece os limites de tolerância para os produtos amiláceos derivados da raiz de mandioca, que exige valores de umidade menores que 14% e 15% em base úmida, para fécula e tapioca respectivamente.

A Tabela 4.15 mostra que as umidades de equilíbrio dos cubos secos *in natura* foram praticamente 50% menores do que as umidades dos cubos desidratados osmoticamente e secos. Certamente, o fato ocorrido, se deve a alta concentração de sólidos incorporados no material durante a etapa de desidratação osmótica, formando um obstáculo para a saída de água na etapa de secagem convectiva. O cubo *in natura* seco a 70°C alcançou a menor umidade de equilíbrio (5,11% em base úmida). Resultado semelhante foi obtido por Pornpraipech et al. (2017) secando fatias de mandioca na forma de retângulos a 80°C. Porém Lugo et al. (2018) encontrou umidade final de 12% para mandioca seca a 70°C em sistema híbrido de secagem.

Tabela 4.15 – Caracterização da secagem convectiva dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente com menor tempo de secagem sem ocorrência de fissuras

Material	Temperatura (°C)	X_{final}ⁱ (b.s.)	X_{final}ⁱⁱ (b.u.%)	tempo_{total} (h)
<i>In natura</i>	50	0,07	6,46	21
	60	0,06	5,97	20
	70	0,05	5,11	12
Desidratado	50	0,15	12,79	24
	60	0,11	10,20	24
	70	0,09	8,06	24

Notações: ⁱValor médio em triplicata na base seca, ⁱⁱ Valor médio em triplicata na base úmida, ⁱⁱⁱUA=Umidade Absoluta.

Fonte: o próprio autor (2018).

Corrêa et al. (2017), também observaram valores de umidade de equilíbrio menores nas amostras *in natura* e maiores nas amostras desidratadas osmoticamente em solução de sacarose, ao secar abacaxi a 70°C com aplicação de ultrassom. Eles justificaram que a secagem a alta temperatura provavelmente acarretou a caramelização dos açúcares incorporados, estabelecendo barreiras adicionais à saída da água da matriz sólida do abacaxi. Assim como neste trabalho, outros autores estudando secagem de produtos frescos e pré-tratados osmoticamente, também encontraram menores valores de umidade final nos produtos *in natura* (OSIDACZ; AMBROSIO-UGRI, 2013; KAYA et al., 2016; SINGH; SINGH HATHAN, 2016).

De uma forma geral, observa-se na Tabela 4.15, que os tempos de secagem dos cubos *in natura* também foram menores do que os tempos de secagem dos cubos pré-tratados osmoticamente nas mesmas temperaturas, diminuindo de acordo com o aumento da temperatura. Entretanto, para os cubos de mandioca desidratados osmoticamente, os tempos totais foram iguais nas três temperaturas. Estes resultados concordam com os obtidos por

Kaya et al. (2016). Eles observaram tempos maiores de secagem em fatias de cenoura desidratadas osmoticamente em solução de sacarose e cloreto de sódio a 35°C, ao estudar a secagem de cenouras *in natura* e pré-tratadas osmoticamente. Garcia-Noguera et al. (2010) encontraram tempos de secagem de 612 e 891 minutos para morangos frescos e desidratados osmoticamente respectivamente, em solução de sacarose a 50%

4.3.3 Determinação da difusividade efetiva média de umidade dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente no processo de secagem convectiva

Os dados experimentais da secagem convectiva dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente, foram ajustados pelo Modelo Difusional (2ª Lei de Fick) para tempos longos de secagem, sem considerar o encolhimento.

As umidades de equilíbrio utilizadas para a modelagem da cinética para todas as amostras e em todas as temperaturas foram àquelas obtidas dinamicamente, considerando o tempo total de secagem até o momento onde não houve rompimento das amostras, conforme os dados da Tabela 4.15 (ver Item 4.3.2).

A Tabela 4.16 apresenta os valores da difusividade efetiva de umidade, obtida por meio da secagem convectiva dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Tabela 4.16 – Parâmetros de ajuste obtidos pelo modelo de Fick durante a secagem convectiva dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente em solução de sacarose e cloreto de sódio

Condições de processo (T°C)	Cubo <i>in natura</i>	Cubo desidratado osmoticamente
	$D_{ef} \times 10^{10}$ (m ² /s)	$D_{ef} \times 10^{10}$ (m ² /s)
50	5,45	2,75
60	5,83	3,61
70	9,85	4,82

Fonte: o próprio autor (2018).

De acordo com a Tabela 4.16, observou-se que a difusividade efetiva de umidade aumentou de acordo com o aumento da temperatura para as duas amostras analisadas. As amostras *in natura* mostraram maiores valores de difusividade efetiva em relação às amostras desidratadas osmoticamente devido ao alto conteúdo de umidade, facilitando a transferência de massa. Os resultados obtidos estão de acordo com os relatados na literatura (AIRES et al., 2018; AYALA-APONTE et al., 2014; REVASKAR et al., 2014; RUIZ-LÓPEZ et al., 2010; SINGH; GUPTA, 2007).

Os cubos de mandioca desidratados osmoticamente apresentaram menores valores de difusividade devido ao seu menor conteúdo de umidade e alta concentração de sólidos incorporados. O pré-tratamento osmótico acarretou redução de água livre nestas amostras, contribuindo para redução da taxa de transferência de massa na secagem convectiva.

Aires et al. (2018) e Zuñiga e Pedreschi (2012) relataram que o ganho de sólidos pode causar a formação de uma barreira, dificultando a transferência de massa dentro do produto durante a secagem convectiva.

Dehghannya et al. (2018) observaram que os cubos secos de batatas pré-tratados em soluções com maiores concentrações de sacarose (50 e 70%) apresentaram menores valores de difusividade efetiva de umidade em relação as amostras secas pré-tratadas em soluções com menores concentrações de sacorese (10 e 30%). Eles explicaram que o uso desse soluto em alta concentração nas soluções osmóticas, provocou modificações na textura da batata, que por sua vez, dificultou a remoção de umidade do produto. Segundo Dehghannya et al. (2015), soluções osmóticas em alta concentração, podem degradar a textura do vegetal e interromper a difusão de umidade durante a secagem.

Os valores da difusividade efetiva de umidade dos cubos de mandioca estão apresentados na Tabela 4.16 e variaram de $5,45 \times 10^{-10}$ a $9,85 \times 10^{-10}$ e $2,87 \times 10^{-10}$ a $4,82 \times 10^{-10}$, para as amostras *in natura* e desidratadas osmoticamente, respectivamente.

Santamaria et al. (2011) encontraram valores de difusividade da mesma ordem dos encontrados nesta pesquisa. Eles secaram a mandioca com casca na forma de cilindros em secador radial termicamente isolado e na temperatura de 70°C.

Difusividades menores, na ordem de 10^{-11} , foram obtidas na secagem de tapioca (camada fina de mandioca) em secador solar com convecção forçada, usando geometria de placa (EZEANYA et al., 2018).

Alguns autores encontraram valores maiores de difusividade para mandioca. Fernando et al. (2011) verificaram valores de difusividade na ordem de 10^{-9} ao secar cilindros de mandioca em secador convectivo de bandejas nas temperaturas de 85, 90 e 95°C. Dairo et al. (2015) constataram valores na ordem de 10^{-8} , secando fatias de mandioca num sistema de secagem solar por convecção natural, em temperaturas que variaram de 34 a 50°C. Tunde-Akintunde (2010) observaram valores de difusividade na ordem de 10^{-7} , trabalhando com chips de mandioca na forma de cilindros, secos ao sol e/ou em secador solar. Eles explicaram que os altos valores de difusividade ocorreram devido ao uso de altas temperaturas (100°C), promovendo maior transferência de umidade devido a queda da umidade relativa.

Vários autores estudando secagem convectiva de vegetais *in natura* e desidratados osmoticamente na forma de cubos encontraram diferentes valores de difusividade efetiva de umidade. Dehghannya et al. (2018), encontraram valores de difusividades na ordem de 10^{-8} e 10^{-7} na secagem de cubos de batata *in natura* e desidratados osmoticamente respectivamente. Singh e Gupta (2007) obtiveram difusividades na ordem de 10^{-9} e 10^{-10} para cubos de cenoura *in natura* e desidratados osmoticamente em solução ternária de cloreto de sódio, sacarose e água. Pisalkar et al. (2011) constataram valores na ordem de 10^{-9} na secagem de cubos de gel de aloe vera frescos e pré-tratados osmoticamente em temperaturas que variaram de 50 a 70°C.

4.3.4 Determinação da melhor condição de secagem

A determinação da melhor condição de secagem foi baseada na umidade do produto seco e no tempo de operação para os dois tipos de amostras, conforme os dados apresentados na Tabela 4.15 (Item 4.3.2). Para a escolha do melhor tratamento para o produto obtido do processo híbrido também foi avaliada a qualidade do mesmo através do aspecto visual da amostra.

De acordo com a Tabela 4.15, observa-se que para o material *in natura*, o tempo de secagem na temperatura de 70°C foi menor em relação aos outros tempos de secagem das amostras frescas secas a 50 e 60°C. Porém, em termos de umidade final, existe uma proximidade dos resultados obtidos para as amostras *in natura* nas três temperaturas analisadas. Deste modo, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) ao nível de significância de 5%, para constatar se houve diferença significativa entre os valores destas umidades nas três temperaturas, conforme os dados da Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Análise de variância para umidade final dos cubos de mandioca *in natura*

Umidade final dos cubos de mandioca <i>in natura</i>						
Fonte	SQ ¹	GL ²	MQ ³	valor-p	Fcalculado	Ftabelado ⁴
Amostras	1,0860	2	0,5430	1,1460	1,1460	6,94
Temperaturas	2,8152	2	1,4076	2,9708	2,9708	6,94
Erro	1,8952	4	0,4738			
Total	5,7964	8				

Notações: ¹SQ = soma quadrática, ²GL = grau de liberdade, ³MQ = média quadrática, ⁴Valores tabelados de F. Fonte: o próprio autor (2018).

De acordo com a Análise de variância para umidade final das amostras *in natura* mostrada na Tabela 4.17, percebe-se que não houve diferença significativa entre as amostras e entre as temperaturas ($p > 0,05$), com valores de F calculados menores que os dos F tabelados.

Assim, a melhor condição de secagem para os cubos de mandioca *in natura* foi a 70°C, pois a mesma apresentou menor tempo de secagem (12 horas) em relação aos outros tratamentos aplicados nas amostras frescas.

Em relação aos cubos de mandioca desidratados osmoticamente, os tempos de secagem nas três temperaturas foram iguais a 24h e as umidades finais também foram bem próximas, segundo a Tabela 4.15 (Item 4.3.2). Assim, foram aplicadas a análise de variância (ANOVA) e em seguida o teste de Tukey a 5% de significância, para verificar se houve diferenças entre as umidades finais nos três tratamentos.

O teste de Tukey foi empregado para verificar as diferenças entre as médias das umidades finais dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos nas três temperaturas analisadas, como mostra a Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Teste de Tukey para comparação das médias da umidade final dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos

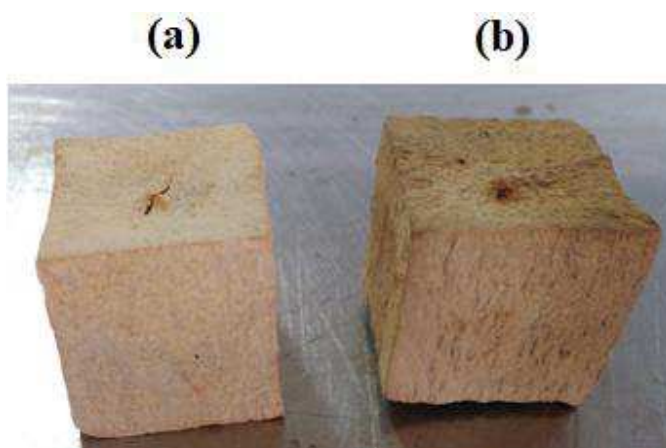
Temperaturas (°C)	Média da umidade final dos cubos DO-secos *
50	12,79 ^a
60	10,22 ^{ab}
70	8,05 ^b

*Médias seguidas da mesma letra minúscula na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: o próprio autor (2018).

Pelo teste de Tukey, as médias de umidade final dos produtos desidratados osmoticamente e secos nas temperaturas entre 50 e 60°C e 60 e 70°C não apresentaram diferença significativa. Porém entre 50 e 70°C, houve diferença significativa, deste modo, escolheu-se a temperatura de 60°C para a secagem dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente, por apresentar provavelmente, menor gasto de energia do que a de 70°C. Quanto aos aspectos da qualidade do produto, visualmente foi observada uma ligeira alteração na coloração dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos a 70°C, aproximando-se para uma cor de caramelo, como pode ser constatado na Figura 4.20. Esta mudança, provavelmente indicou algum tipo de degradação da sacarose em relação a temperatura utilizada. Tais indícios estão relacionados as alterações de cor apresentadas nas isotermas de dessecamento a 70°C. A melhor condição de secagem para os cubos de mandioca desidratados osmoticamente foi a 60°C por apresentar maior economia nos gastos de energia e melhor qualidade no aspecto visual da amostra seca.

Figura 4.30–Cubos desidratados osmoticamente e secos nas temperaturas de (a) 60°C e (b) 70°C.



Fonte: o próprio autor (2018).

4.4 Avaliação do produto obtido pelo processo híbrido

Para verificar as possíveis alterações que o processo híbrido (desidratação osmótica e secagem convectiva) exerce no produto final foi realizada a caracterização físico-química desse material, comparando seus resultados com as informações físico-químicas obtidas para os cubos apenas secos a 60 °C e os cubos *in natura*.

A Tabela 4.19 apresenta os resultados da composição química dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente e secos a 60°C, segundo os métodos referenciados no Item 3.2.1.1.

Tabela 4.19 – Caracterização físico-química dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente e secos a 60°C em base úmida

Análise	Valor médio dos cubos de mandioca <i>in natura</i> ⁱ	Valor médio dos cubos DO-secos a 60°C ⁱ
Atividade de água	0,954±0,00	0,232±0,00
Açúcares Totais (%)	2,27±0,24	15,17±0,38
Sacarose (%)	2,27±0,24	15,17±0,38
Cloreto de sódio (%)	0,13±0,02	5,34±0,05
Acidez ⁱⁱ (%)	1,89±0,21	2,89±0,37
pH	6,87±0,03	6,46±0,15
Cinzas (%)	1,26±0,39	7,02±0,03
Proteínas (%)	0,73±0,01	1,12±0,04
Lipídeos (%)	3,26±0,12	3,47±0,04
Amido (%)	22,57±0,04	44,94±0,47

ⁱValor médio ± desvio padrão, ⁱⁱem mL de hidróxido de sódio 0,1N por 100g de amostra.

Fonte: o próprio autor (2018).

O processo híbrido de redução de umidade (desidratação osmótica e secagem convectiva) produziu um material com desejável tempo de prateleira, pois reduziu o valor de atividade de água a valores inferiores a 0,6, o qual evita o crescimento de microrganismos patogênicos (ver Tabela 2.2 no item 2.2.3) que deterioram o alimento. O valor de atividade de água nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos foi de 0,232, segundo a Tabela 4.19. Os valores de atividade de água próximos aos apresentados pelos cubos desidratados osmoticamente e secos foram encontrados por Silva et al. (2013), eles verificaram atividade de água de 0,180 em farinha de tapioca Santa Izabel. Vieira et al (2010) encontraram valor de atividade de água de 0,310 para biscoitos doces preparados com 15% de fécula de mandioca. A redução de atividade de água é mais pronunciada durante a secagem convectiva, porque a água livre do alimento é evaporada, reduzindo a pressão de vapor da água que atua no alimento, atingindo valores mais baixos de atividade de água (Moreno et al., 2010). Durante o processo de desidratação osmótica, a redução da atividade de água acontece de forma lenta, porque os fenômenos difusionais ocorrem em meio aquoso.

Os valores de acidez e pH encontrados nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos a 60°C demonstrados na Tabela 4.19, encontram-se dentro dos limites de tolerância para os produtos secos amiláceos derivados da raiz de mandioca, segundo a Resolução RDC nº 23, de 14 de dezembro de 2005 (BRASIL, 2005b). Brito et al. (2015) encontraram valores de pH e acidez similares ao deste estudo, 5,84 e 3,60 para farinhas de mandioca dos grupos seca e d'água respectivamente. Assim como Rodrigues e Asquieri (2011), que verificaram pH de 6,44 e acidez de 2,03 para biscoitos de povilho elaborados com diferentes concentrações de farelo de mandioca. Silva et al. (2013) e Aviara et al. (2014) encontraram valores de pH de 5,75 e 5,88, também semelhantes ao desta pesquisa, para farinha de tapioca Santarém e amido de mandioca respectivamente. Os valores de acidez e pH foram próximos para as amostras *in natura* e secas, segundo a Tabela 4.19. Osidacz e Ambrosio-Ugri (2013), também observaram mesmo comportamento no processo híbrido de desidratação osmótica e secagem convectiva de berinjelas a 70°C, assim como Castro et al. (2016) nesse mesmo processo para goiabas. Entretanto, os resultados de Guimarães e Silva (2008) apresentam similaridades apenas para os valores de pH de muricí *in natura* e desidratados osmoticamente e secos. Moreno et al. (2010) explica que o processo de desidratação osmótica não apresenta alterações significativas no pH dos vegetais. O pré-tratamento osmótico acarreta mudanças químicas nos ácidos orgânicos que atuam como solução tampão, evitando alterações no pH do produto desidratado.

As cinzas encontradas nos cubos de mandioca pré-tratados osmoticamente e secos a 60°C, segundo a Tabela 4.19, encontram-se acima dos limites de tolerância para os produtos secos amiláceos derivados da raiz de mandioca, segundo a Resolução RDC nº 23, de 14 de dezembro de 2005 (BRASIL, 2005b). Vários pesquisadores encontraram concentrações de cinzas menores em diversos produtos desidratados osmoticamente e secos derivados de mandioca em relação aos encontrados para os cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos, tais como: Aviara et al. (2014), Vieira et al. (2010), Silva et al. (2011), Fiorda et al. (2013), Fiorda et al. (2015).

O valor das cinzas obtido para os cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos a 60°C foi duas vezes e meia maior que o da amostra *in natura*, de acordo com os dados apontados na Tabela 4.20. As cinzas são constituídas de resíduo inorgânico e possuem grandes quantidades de potássio, sódio, cálcio e magnésio (CECCHI, 2003). As concentrações de cálcio e magnésio na mandioca *in natura* são de 15 e 44 mg/100g respectivamente (TACO, 2011).

A Tabela 4.20 compara os valores da composição do material *in natura* e dos cubos desidratados osmoticamente e seco a 60°C em base seca.

Tabela 4.20 – Comparação da composição dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente e secos a 60°C em base seca

Análise	Valor médio mandioca <i>in natura</i> ⁱ	Valor médio cubos DO-secos a 60°C ⁱ
Sacarose (g /100g m.s.)	5,745±0,60	16,894±0,42
Cloreto de sódio (g /100g m.s.)	0,340±0,05	5,946±0,06
Cinzas (g /100g m.s.)	3,178±0,99	7,813±0,03
Proteínas (g /100g m.s.)	1,838±0,03	1,250±0,05
Lipídeos (g /100g m.s.)	8,458±0,29	3,861±0,05
Amido (g /100g m.s.)	57,067±0,09	50,049±0,52

ⁱValor médio ± desvio padrão.

Fonte: o próprio autor (2018).

O sódio é um metal alcalino que constitui aproximadamente 40% do sal de cozinha, ou seja, 1 g de sal de cozinha contém o equivalente a 0,4 g de sódio ou 400mg de sódio (HE; MACGREGOR, 2010). O sódio encontrado no material *in natura* (ver Tabela 4.19) foi de 52 mg/100g. Após a desidratação osmótica houve incorporação desse mineral no cubo desidratado osmoticamente, elevando sua concentração em aproximadamente 1.729 mg/100g, aumentando cerca de trinta e quatro vezes e meia o valor de sódio inicial. Os valores dos minerais cálcio, magnésio e sódio se concentraram ao secar o produto desidratados osmoticamente a 60°C, aumentando sua concentração de cinzas. Como a concentração de

sódio (1.729 mg/100g) no material antes da secagem convectiva foi bem maior do que as concentrações de cálcio (15mg/100g) e magnésio (44mg/100g), provalmente este mineral foi o responsável pelo aumento pronunciado das cinzas no produto desidratado osmoticamente-seco a 60°C, apresentando-se no mesmo numa concentração final de 2.136 mg/100g ou 2,1 g/100g, elevando em quarenta vezes a mais o valor de sódio da amostra *in natura*.

O valor de sódio encontrado nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente- secos a 60°C estão dentro da faixa de sódio encontrada em alimentos como queijo parmesão e parmesão ralado, que foi de 1.402 a 3.052 e 1.981 a 2.976 mg/100g respectivamente. Estes alimentos apresentaram os teores médios mais elevados de conteúdo absoluto de sódio, segundo o Informe Técnico 50/2012 da ANVISA que trata do teor de sódio dos alimentos processados (ANVISA 2012).

O valor de sódio encontrado de 2.136 mg na porção de 100g do cubo de mandioca desidratado osmoticamente-seco a 60°C se encontra próximo dos valores diários de referência de nutrientes estabelecidos na Resolução RDC nº 360, de 23 de dezembro de 2003, sobre rotulagem nutricional de alimentos embalados, que torna obrigatória a rotulagem nutricional e estabelece 2.400 mg de sódio como valor diário de referência de nutrientes para declaração obrigatória (BRASIL, 2003). O valor de 2.136 mg, ou 2,1g, representa 89% de sódio em uma porção do alimento. O limte máximo de sódio recomendado pela Organização Mundial de Saúde (OMS) é de 2 g por dia (SARNO et al., 2013), portanto a concentração de sódio 2,1g encontrada em 100g do cubo de mandioca desidratado osmoticamente-seco a 60°C se encontra no limite máximo de sódio recomendado pela OMS.

Como pode ser visto na Tabela 4.19, as concentrações de açúcares totais e de sacarose foram iguais. Esse fato pode ser explicado porque a glicose não foi detectada nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos a 60°C. Como este açúcar e a sacarose compõem os açúcares totais, na ausência de glicose, os açúcares totais são iguais a sacarose. Silva et al. (2011) encontraram valores de açúcares totais de 9,28 para cereal matinal extrudado de mandioca.

De acordo com os dados da Tabela 4.20, a sacarose no cubo desidratado osmoticamente e seco a 60°C apresentou um valor três vezes maior do que seu valor inicial. Porém, o cloreto de sódio mostrou um poder de incorporação maior que o da sacarose, apresentando um aumento de dezessete vezes do seu valor inicial no produto desidratado osmoticamente e seco a 60°C.

Solutos com maior peso molecular como a sacarose apresentam difusividades menos elevadas, devido ao elevado tamanho da sua molécula, permitindo menor mobilidade nos

materiais alimentícios através dos poros existentes e espaços livres dos tecidos vegetais. Os açúcares geralmente são moléculas hidrofílicas, não carregadas, que exibem taxas de difusão lenta (AGNIESZKA; ANDRZEJ, 2010; RUIZ-LÓPEZ et al., 2011; UDOMKUN et al., 2015). Udomkun et al. (2015) observaram elevadas concentrações de glicose e frutose e menor valor de sacarose em cubos de mamão pré-tratado osmoticamente e secos. Eles explicaram que o fato pode estar relacionado ao menor peso molecular dos solutos: glicose e frutose que penetram com mais facilidade na camada superficial do vegetal. Brandão et al. (2003) encontraram concentrações de sacarose mais elevadas em mangabas desidratadas osmoticamente e secas ao sol ao comparar com a mangaba *in natura*.

O valor de proteína encontrado nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos a 60°C foi de 1,12% de acordo com a Tabela 4.19. Silva et al. (2011) e Álvares et al. (2016), obtiveram resultados próximos ao deste estudo em farinhas de mandioca, 1,46 e 0,7% respectivamente. Aviara et al. (2014) também encontraram resultados próximos ao desta pesquisa, 0,85% em amido de mandioca.

Ao observar os resultados da Tabela 4.20, verificou-se que os valores de proteínas praticamente não foram alterados para as duas amostras analisadas.

Segundo a Tabela 4.19, os níveis de lipídeos (3,47%) para os cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos a 60°C foram maiores dos que os encontrados em farinhas (0,27 a 0,88%) e amido de mandioca (0,16 a 1,87%) (ÁLVARES et al., 2016; AVIARA et al., 2014; FIORDA et al., 2015; SILVA et al., 2011; SILVA et al 2013). Esse fato pode ser atribuído as propriedades intrínsecas das raízes (CHISTÉ et al. 2006), uma vez que o conteúdo de lipídeos na mandioca *in natura* (3,26%) foi mais elevado do que os encontrados por Luna et al. (2013) e Ceni et al (2009). Estes autores constataram 0,61% e faixa de variação de 0,2 a 0,7 % de lipídeos em mandioca fresca respectivamente. Entretanto, ao comparar os resultados de lipídeos em base seca para as duas amostras estudadas, segundo Tabela 4.20, verifica-se uma redução pela metade, nas concentrações das amostras pré-tratadas osmoticamente e secas. Provavelmente ocorreu perda do extrato etéreo devido a aceleração do processo oxidativo das gorduras em altas temperaturas durante a secagem convectiva (REDA; CARNEIRO, 2007). Segundo Hellín e Pilar Rueda (1984) as modificações e alterações dos óleos e gorduras podem ocorrer por vários motivos: exposição do produto em altas temperaturas, inclusive menores que 100°C e na presença de oxigênio, alterações nos aspectos fisiológicos e nutricionais dos óleos, modificações que ocorrem nas propriedades físicas e etc.

Segundo a Tabela 4.19, o conteúdo de amido encontrado nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos a 60°C foi de 44,94% em base úmida. A legislação brasileira estabelece teor de amido para farinhas seca e d'água do tipo 3 e farinha flocada, de no mínimo 80% em base úmida (BRASIL, 2011). Desta forma, o conteúdo de amido obtido nos cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos a 60°C se encontra abaixo dos valores mínimos recomendados para farinhas de mandioca. O conteúdo de amido encontrado no produto seco foi inferior aos valores encontrados por Pereira e Leonel (2014) em diversos tipos de farinha de mandioca (75,59 a 99,14%) e por Silva et al. (2013) em farinha de tapioca Santarém (84,30%) e Santa Izabel (93,03%).

A Tabela 4.20 compara as concentrações de amido nos produtos *in natura* e secos em base seca. Podemos observar que no produto seco os níveis de amido foram ligeiramente menores em relação aos do material fresco. Essa redução provavelmente está relacionada ao conteúdo de sacarose encontrado no cubo de mandioca desidratado osmoticamente e seco, uma vez que o teor de amido na amostra é calculado com a subtração do conteúdo de sacarose. Como este soluto foi incorporado no material desidratado, sua concentração no mesmo foi bem mais alta que no material *in natura*, contribuindo provavelmente para redução no conteúdo de amido do cubo de mandioca desidratado osmoticamente e seco.

O produto obtido do processo híbrido de desidratação osmótica e secagem convectiva dos cubos de mandioca pode ser empregado na produção de alimentos como insumo para o desenvolvimento de novos produtos secos com características organolépticas diferenciadas. A partir desse produto podem ser desenvolvidos novos produtos a base de mandioca, tais como: farinha de mandioca desidratada osmoticamente, purê de mandioca pronto para consumo, mistura a base de amido de mandioca para o preparo de mingau entre outros.

5 CONCLUSÕES

- A mandioca *in natura* apresentou 60,45% de umidade, 2,27% de sacarose, 0,13% de cloreto de sódio, 1,26% de cinzas, 0,73% de proteínas, 3,26% de lipídeos e 22,57% de amido.
- A condição otimizada para a desidratação osmótica dos cubos de mandioca obtida através do DCCR aplicado foi igual a 52°C, concentração da solução osmótica de 56% em peso de solutos, concentração de sal de 10% em peso, tempo de imersão de 160 minutos e agitação de 180 rpm. Essa situação apresenta os melhores resultados da relação de desempenho da operação (maior perda de umidade e menor ganho de sólidos totais) e de redução de atividade de água (menor valor) do material.
- A faixa das variáveis de operação que apresentou os maiores parâmetros de incorporações de sólidos solúveis, cloreto de sódio e sacarose foi de 30 a 63°C, 34 a 67% em peso de soluto, 10 a 20% de peso em cloreto de sódio e de 70 a 190 minutos.
- As menores faixas de redução de volume e de área superficial dos cubos desidratados osmoticamente foram de 9,94 a 10,51% e de 6,76 a 7,14% respectivamente, ocorrendo em baixas temperaturas de operação (30°C) e concentrações de NaCl (5%) nas soluções desidratantes utilizadas. As máximas faixas de redução foram de 41,74 a 54,81% para o volume e de 29,63 a 40,29% para a área, obtidas em altas temperaturas (52°C) e concentração de NaCl (15%).
- A redução dos cubos de mandioca no processo de desidratação osmótica apresentou comportamento anisotrópico. A menor redução ocorreu no eixo paralelo ao conjunto das fibras, disposto na seção longitudinal do cubo de mandioca. A maior redução aconteceu nos eixos perpendiculares ao conjunto das fibras do material, na seção transversal do cubo.
- Na cinética de desidratação osmótica as curvas de perdas de massa e de umidade, ganho de sólidos totais, redução de atividade de água e incorporações de sólidos solúveis, sacarose e cloreto de sódio demonstraram comportamento exponenciais e sigmoidal.

- A condição de equilíbrio das perdas de umidade e de massa ocorreu em 180 min, do ganho de sólidos totais em 30 min, e das incorporações de sólidos solúveis, sacarose e cloreto de sódio em 300 min.
- Os maiores valores dos parâmetros de estudo da cinética de desidratação osmótica foram iguais a 24,90% de perda de umidade, 20,85% de incorporação de sólidos solúveis, 18,68% de redução de atividade de água, 16,46% de ganho de sólidos totais, 8,87% de incorporação de sacarose e a 4,07% de incorporação de cloreto de sódio.
- As amostras *in natura* apresentaram maiores taxas de secagem em relação ao material pré-tratado osmoticamente em solução de sacarose e cloreto de sódio. Todo o processo de secagem dos cubos *in natura* e desidratados osmoticamente nas temperaturas de 50, 60 e 70°C ocorreu no período de taxa decrescente de migração de umidade.
- Durante a secagem convectiva dos cubos de mandioca *in natura* e pré-tratados osmoticamente, em todas as temperaturas, surgiram rompimentos no conjunto das fibras que constituem a amostra, alterando o formato inicial da mesma. O tempo total de secagem considerado para a determinação do parâmetro mássico de transporte foi igual ao período no qual os cubos permaneceram íntegros, sem rompimento e identificação de fissuras do seu tecido vegetal.
- Os cubos de mandioca *in natura* apresentaram menor tempo de secagem do que os cubos de mandioca desidratados osmoticamente devido a presença de sacarose na superfície externa dos cubos dificultando a remoção de umidade do interior do material.
- As temperaturas de secagem que produziram um material seco com baixa umidade final, foi a 70°C para os cubos de mandioca *in natura*, apresentando menor tempo de secagem, e a 60°C para os cubos de mandioca desidratados osmoticamente, apresentando melhor qualidade.
- As isotermas de dessorção para os cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente apresentaram a forma sigmoideal do tipo II, que são características de produtos amiláceos.

- O conteúdo de umidade de equilíbrio nas isotermas de dessorção dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente decresceu com o aumento da temperatura de 50 para 60°C. Os ensaios a 70°C apresentaram maiores valores de umidade de equilíbrio em relação a condição de 60°C para os dois tipos de amostras, provavelmente devido a gelatinização do amido. No caso da amostra desidratada osmoticamente, o aumento da umidade de equilíbrio também foi provocado provavelmente devido a reação de caramelização nas amostras, que apresentaram uma coloração de caramelo e aroma de queimado.
- O modelo de GAB foi o que apresentou os melhores ajustes aos dados experimentais das isotermas de dessorção dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente, com altos coeficientes de determinação ($R^2 > 98\%$) e baixos valores do erro médio relativo ($P\% < 10\%$). Os valores de umidade da monocamada (X_m), estimados pela equação de GAB, para as temperaturas utilizadas (50, 60 e 70°C) foram superiores aos relatados na literatura e iguais a 17, 9 e 10% em base seca para material *in natura* e de 17, 16 e 17% em base seca para os cubos de mandioca desidratados osmoticamente.
- As difusividades efetivas médias de umidade e de sólidos (determinadas a partir da perda de umidade, incorporações de sólidos totais, sacarose e cloreto de sódio e calculadas através do modelo de Azuara e colaboradores) para a desidratação osmótica dos cubos de mandioca na condição otimizada foram da ordem de $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.
- As difusividades efetivas médias de umidade, obtidas através do modelo de Fick simplificado, para a secagem convectiva dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente foram da ordem de $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.
- Os cubos de mandioca desidratados osmoticamente e secos a 60°C apresentaram 10,20% de umidade, 15,17% de sacarose, 5,34% de cloreto de sódio, 7,02% de cinzas, 1,12% de proteínas, 3,47% de lipídeos e 44,94% de amido em base úmida.
- O produto obtido do processo híbrido de desidratação osmótica e secagem convectiva dos cubos de mandioca pode ser empregado na produção de alimentos como matéria-prima para o desenvolvimento de novos produtos a base de mandioca.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar uma modelagem físico-matemática detalhada do processo híbrido de desidratação osmótica e secagem convectiva dos cubos de mandioca.
- Avaliar o comportamento geométrico (encolhimento) do material ao longo do processo híbrido.
- Formular um produto alimentício a base do material obtido do processo híbrido.
- Avaliar as características sensoriais do produto final.

REFERÊNCIAS

- ABBASI SOURAKI, B.; GHAFARI, A.; BAYAT, Y. Mathematical modeling of moisture and solute diffusion in the cylindrical green bean during osmotic dehydration in salt solution. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.90, n.1, p. 64–71, 2012.
- ABRAÃO, A.S.; LEMOS, A.M.; VILELA, A.; SOUSA, J.M.; Nunes, F.M. Influence of Osmotic Dehydration Process Parameters on the Quality of Candied Pumpkins. **Food and Bioproducts Processing**, v. 91, n.4, p. 481–494, 2013.
- AGNIESZKA, C.; ANDRZEJ, L. Rehydration and sorption properties of osmotically pretreated freeze-dried strawberries. **Journal of Food Engineering**, v.97, n. 2, p. 267–274, 2010.
- AGUIAR, E. B.; BICUDO, S. J.; CURCELLI, F.; FIGUEIREDO, P. G.; CRUZ, S. C. S. Épocas de poda e produtividade da mandioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 11, p. 1463-1470, 2011.
- AGUIAR, R.; CUNHA, R. L.; CUNHA, E. F. M.; REGO, J. Y. N. Caracterização física química de raízes de mandioca. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E 2º SEMINÁRIO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL, 18., 2014, Belém. **Anais...** Belém: Embrapa, 2014. p. 1-4.
- AIRES, J. E. F.; SILVA, W. P.; AIRES, K. L. C. A.F.; JÚNIOR, A. F. S.; 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, n.6, p. 527-536, 2016.
- AIRES, J. E. F.; SILVA, W. P. ; AIRES, K. L. C. A. F.; JÚNIOR, A. F. S.; SILVA, C. M. D. P. S. Convective drying of osmo-dehydrated apple slices: kinetics and spatial behavior of effective mass diffusivity and moisture content. **Heat Mass Transfer**, v.54, n. 4, p.1121–1134, 2018.
- AKBARIAN, M.; GHASEMKHANI, N.; MOAYEDI, F. Osmotic dehydration of fruits in food industrial: A review. **International Journal of Biosciences**, v. 4, n. 12, p.42–57, 2014a.
- AKBARIAN, M.; GHANBARZADEH, B.; SOWTI, M.; DEHGHANNYA, J. Effects of Pectin-CMC-Based Coating and Osmotic Dehydration Pretreatments on Microstructure and Texture of the Hot-Air Dried Quince Slices. **Journal of Food Processing and Preservation** v.39, n.3, p.260-269, 2014b.
- AKOY, E. O. M.; HÖRSTEN, D. Moisture sorption isotherms of mango slices. **International Journal of Agricultural and Food Science**, v. 3, n. 4, p. 164-170, 2013.
- AKOY, E. O. M. Experimental characterization and modeling of thin-layer drying of mango slices. **International Food Research Journal**, v. 21, n.5, p. 1911-1917, 2014.
- ALAM, M.M.; ISLAM, M. N.; ISLAM, M.N. Effect of process parameters on the effectiveness of osmotic dehydration of summer onion. **International Food Research Journal**, v.20, n.1, p. 391-396, 2013.

ALBUQUERQUE, J. A. A.; EVANGELISTA, M. O.; MATES, A. P. K.; ALVES, J. M. A.; OLIVEIRA, N. T.; SEDIYAMA, T.; SILVA, A. A. Occurrence of weeds in Cassava savanna plantations in Roraima. **Planta Daninha**, v. 32, n. 1, p. 91-98, 2014.

ALBUQUERQUE NETO, A. A. **Produção de farinha de mandioca (*manihot esculenta crantz.*) através de métodos combinados: desidratação osmótica e secagem convectiva**. 2015. 76f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

ALDRIGUE, M. L.; MADRUGA, M. S.; FIOREZE, R.; LIMA, A. W. O.; SOUSA, C. P. **Aspecto da ciência e tecnologia de alimentos**. João Pessoa: Ed. UFPB, v. 1, 2002. 198p.

ALLALI, H.; MARCHAL, L.; VOROBIEV, E. Blanching of strawberries by ohmic heating: effects on the kinetics of mass transfer during osmotic dehydration. **Food and Bioprocess Technology**. v.3, p.406-414, 2008.

ALLALI, A.; MARCHAL, L.; VOROBIEV, E. Effects of vacuum impregnation and ohmic heating with citric acid on the behavior of osmotic dehydration and structural changes of apple fruit. **Biosystems Engineering**, v.106, n.1, p.6– 13, 2010.

AL-MUHTASEB, A. H.; AL-HARAHSEH, M.; HARARAH, M.; MAGEE, T. R. A. Drying characteristics and quality change of unutilized-protein rich-tomato pomace with and without osmotic pre-treatment. **Industrial Crops and Products**, v. 31, n. 1, p. 171-177, 2010.

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Water sorption isotherms of starch powders Part 1: mathematical description of experimental data. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 297-307, 2004.

ÁLVARES, V. S.; MIQUELONI, D. P.; NEGREIROS, J. R. S. Variabilidade físico-química da farinha de mandioca do Território da Cidadania do Vale do Juruá, Acre. **Revista Ceres**, v. 63, n.2, p. 113-121, 2016.

ANDRADE, E. T.; FIGUEIRA, V. G.; TEIXEIRA, L. P.; TAVEIRA, J. H. S.; BORÉM, F. M. Determination of the hygroscopic equilibrium and isosteric heat of aji chili pepper. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.12, p.865-871, 2017.

ANDRADE, S. A. C.; BARROS NETO, B.; NÓBREGA, A. C.; AZOUBEL, P. M.; GUERRA, N. B. Evaluation of water and sucrose diffusion coefficients during osmotic dehydration of jenipapo (*Genipa americana L.*). **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 1, p. 551-555, 2007.

ANDRÉS, A.; FITO, P.; HEREDIA, A.; ROSA, E. M. Combined technologies for development of high quality shelf-stable mango products. **Drying Technology**, v. 25, n.11, p. 1857-66. 2007.

AN, K.; DING, S.; HONGYANTAO; ZHAO, D.; WANG, X.; WANG, Z.; HU, X. Response surface optimisation of osmotic dehydration of Chinese ginger (*Zingiber officinale Roscoe*) slices. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 48, n. 1, p. 28–34, 2013b.

AN, K.; LI, H.; ZHAO, D.; DING, S.; TAO, H.; WANG, Z. Effect of osmotic dehydration with pulsed vacuum on hot-air drying kinetics and quality attributes of cherry tomatoes. **Drying Technology**, v.31, n. 6, p. 698–706. 2013a.

ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Teor de sódio nos alimentos processados, informe técnico n. 50/2012. 2012. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/wps/content/Anvisa+Portal/Anvisa/Inicio/Alimentos/Assuntos+de+Interesse/Informes+Tecnicos>> Acesso em: 12 fev. 2018.

ARBALLO, J.R.; BAMBICHA, R.R.; CAMPAÑONE, L.A.; AGNELLI, M.E.; MASCHERONI, R.H. Mass Transfer Kinetics and Regression-Desirability Optimisation During Osmotic Dehydration of Pumpkin, Kiwi and Pear. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 47, n.2, p.306–314, 2012.

ARAÚJO, P. M.; FONSECA, J.R. L.; MAGALHÃES, M. M. A.; MEDEIROS, M. F.D. Drying of carrots in slices with osmotic dehydration. **African Journal of Biotechnology**, v.13, n.30, p. 3061-3067, 2014.

ARIAS, L.; PEREA, Y.; ZAPATA, J. E. Cinética de la Transferencia de Masa en la Deshidratación Osmótica de Mango (*Mangifera indica L.*) var. Tommy Atkins en Función de la Temperatura. **Información Tecnológica**, v. 28, n. 3, p. 47-58. 2017.

ASCHERI, D. P. R.; MOURA, W. S.; ASCHERI, J. L. R.; JUNIOR, E. A. F. Propriedades termodinâmicas de adsorção de água do amido de rizomas do lírio-do-brejo (*Hedychium coronarium*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.29, n.2, p. 454-462, 2009.

ASSIS, F. R.; MORAIS, R. M. S. C.; MORAES, A. M. M. B. Mathematical modelling of osmotic dehydration kinetics of apple cubes. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.41, n.3, p.1-16, 2017.

AURÉLIO. (2012) Dicionário. Verbetes mandioca. Disponível em: <<http://wapedia.mobi/pt/Mandioca>>. Acessado em 25 de janeiro de 2012.

AVIARA, N. A.; ONUOHA, L. N.; FALOLA, O. E.; IGBEKA, J. C. Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer. **Energy**, v. 73, n. 9, p. 809-817, 2014.

AYALA-PONTE, A.; Estimación das isothermas de adsorção e do calor isostérico em farinha de mandioca. **Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial**, v. 9, n.1, p.88-96, 2011.

AYALA-APONTE, A. ; SERNA-COCK, L.; LIBREROS-TRIANA, J.; PRIETO, C.; DI SCALA, K. Influence of osmotic pre-treatment on convective drying of yellow pitahaya. **DYNA**, v.81, n.188, p. 145-151, 2014.

AYRANCI, E.; AYRANCI, G.; ZAFER, D. Moisture sorption isotherms of dried apricot, fig and raisin at 20 C and 36 C. **Journal of Food Science and Technology**, v.55, n.6, p.1591-1593, 1990.

AZARPAZHOOH, E.; RAMASWAMY, H. S. Modeling and Optimization of Microwave Osmotic Dehydration of Apple Cylinders Under Continuous-Flow Spray Mode Processing Conditions. **Food and Bioprocess Technology**, v.5, p. 1486-1501, 2012.

AZOUBEL, P. M.; DA SILVA, F. O. Optimisation of osmotic dehydration of “Tommy Atkins” mango fruit. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 43, n. 7, p. 1276-1280, 2008.

AZOUBEL, P. M.; EL-AOUAR, A. A.; TONON, R. V.; KUROZAWA, L., E.; ANTONIO, G. C.; MURR, F. E. X.; PARK, K. J. Effect of osmotic dehydration on the drying kinetics and quality of cashew apple. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 44, n.5, p. 980-986,2009.

AZUARA, E.; BERISTAIN, C. I.; GARCIA, H. S. Development of a Mathematical Model to Predict Kinetics of Osmotic Dehydration. **Journal of Food Science and Technology**, v. 29, n. 4, p. 239-242, 1992.

BABALIS, J. S.; BELESSIOTIS, G. V. Influence of drying condition on the drying constants and moisture diffusivity during the thin layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v. 65, n.6, p. 449–458. 2004.

BADWAK, L. S.; CHOUDHURY, S.; BORAH, P. K.; DEKA, S. C. Optimization of Osmotic Dehydration Process of Bamboo Shoots in Mixtures of Sucrose and Sodium Chloride Solutions. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 37, n. 6, p. 1068-1077, 2013.

BARANZELLI, J.; PINTO, V. Z. P.; COLUSSI, R. BRUNI, G. P.; EVANGELHO, J. A.; ZAVAREZE, E.; MIRANDA, M. Z.; DIAS, A. R. G. Caracterização de amido de diferentes cultivares de trigo. In: Simpósio de Alimentos, 9., 2015, Rio grande do Sul. **Anais...** Passo Fundo:UFP, 2015.p.

BARAT, J. M.; CHIRALT, A.; FITO, P. Equilibrium in cellular food osmotic solution systems as related to structure. **Journal of Food Science**, v. 63, n. 5, p. 836-840, 1998.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; FONTANA, J. A.; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. **Water activity in foods: fundamentals and applications**. Ames: Blackwell Publishing Profesional, 2007.

BARROS NETO, B.; SCARMÍNIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e Otimização de Experimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003.

BEHSNILIAN, D.; SPIESS Walter, E.L. Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetable. In Proceedings of the 13th World Congress of Food Science & Technology, Nantes, France, September 17–21, Ed: Colonna, P. **Anais...**INRA, Paris, 1857–1869, 2006.

BEKELE, Y.; RAMASWAMY, H. Going beyond conventional osmotic dehydration for quality advantage and energy savings. **Journal of Applied Science and Technology**, v.1, n. 1, p. 1–15, 2010.

BELLARY, A. N.; RASTOGI, N. K. Effect of hypotonic and hypertonic solutions on impregnation of curcuminoids in coconut slices. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 16, n.8, p.33-40. 2012.

BENELLI, J.; TONIAZZO, G.; PRESTES, R. C.; TRES, M. V. Development and utilization of pork skin emulsion in mortadella as a soy protein substitute. **International Food Research Journal**, v. 22, n. 5, p. 2126-2132, 2015.

BETIOL, L. F. L. **Estudo das isotermas de adsorção do bagaço de mandioca proveniente da indústria de fécula**. 2016. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos). Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2016.

BLAHOVEC, J. Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. **Journal of Food Engineering**, v.65, n.4, p.489-495, 2004.

BORGES, S. V.; MANCINI, M. C.; CORRÊA, J. L. G.; NASCIMENTO, D. A. Secagem de fatias de abóboras (*Cucurbita moschata*, L.) por convecção natural e forçada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 2, p. 245-251, 2008.

BORGES, S. V.; MANCINI, M. C.; CORRÊA, J. L. G.; LEITE, J. Secagem de bananas prata e d'água por convecção forçada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, n. 3, p. 605-612, 2010.

BORSATO, D.; MOREIRA, I.; SILVA, R. S. S.F.; BONA, E.; NÓBREGA, M. M.; PINA, M. V. R.; MOREIRA, M. B. Simulação da difusão multicomponente durante a desidratação osmótica em maçã: determinação dos coeficientes de difusão pelo método simplex. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 2, p. 391-404, 2010.

BRANDÃO, M. C. C.; MAIA, G. A; LIMA, D. P.; PARENTE, E. J.; CAMPELLO, C. C.; NASSU, R. T.; FEITOSA, T.; SOUSA, P. H. M. Análise físico-química, microbiológica e sensorial de frutos de manga submetidos à desidratação osmótico-solar. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 25, n.1, p. 38-41, 2003.

BRANDINI, K. J.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P. FABBRO, I. M. D. Secagem: Fundamentos e Equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.16, n.1, p.93-127, 2014.

BRASIL. Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimento**. Brasília. IV ed. 2005a.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 23, de 14 de dezembro de 2005. Aprova o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade dos Produtos Amiláceos derivados da raiz da mandioca. **Diário Oficial da [República Federativa do Brasil]**, Brasília p.5, dez. 2005b. Seção 1.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº52, de 07 de novembro de 2011. Regulamento técnico da farinha de mandioca. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, DF, 07 de novembro de 2011.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução nº 360 de 23 de dezembro de 2003. **Regulamento técnico sobre rotulagem nutricional de alimentos embalados.** / Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Brasília: Ministério da Saúde, 2003. 9p.

BRITO, V. H. S.; SILVA, E. C.; CEREDA, M. P. Digestibilidade do amido *in vitro* e valor calórico dos grupos de farinhas de mandioca brasileiras. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 18, n.2, p. 185-191, 2015.

BROCHIER, B.; MARCZAK, L. D. F.; NOREÑA, C. P. Z. Osmotic Dehydration of Yacon Using Glycerol and Sorbitol as Solutes: Water Effective Diffusivity Evaluation. **Food Bioprocess Technol**, v. 8, n. 3, p. 623-636, 2015.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds.** Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.

BRUNAUER, S.; DEMING, L. S.; TELLER, E. On a theory of Van der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical Society**, v.62, n.7, p.1723-1732, 1940.

BUI, H. T. ; MAKHLOUF, J.; RATTI, C. Osmotic dehydration fo tomato in sucrose solutions: Fick's law classical modeling. **Journal of food science**, v. 74, n. 5, p 250-2588, 2009.

CABRERA, E.; SANJUÁN, N.; PANADÉS, G.; CRUZ, L. Influence of osmotic pretreatment on the convective drying of guava. **International Food Research Journal**, v. 23, n.4, p.1623-1628 2016.

CAHYANTI, M. N.; ALFIAH, M. N.; HARTINI, S. Sorption Isotherm Modelling Of Fermented Cassava Flour by Red Yeast Rice. In: Joint Conference on Chemistry, 12,2018. **Anais...IOP**, 2018.

CAMPOS, C. D. M.; SATO, A. C. K.; TONON, R. V.; HUBINGER, M. D.; CUNHA, R. L. Effect of process variables on the osmotic dehydration of star-fruit slices. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 32, n. 2, p. 357-365, 2012.

CAMPOS, R. C.; CORRÊA, P. C. C.; FERNANDES, L. S.; BAPTESTINI, F. M.; COSTA, C. F.; BUSTOS-VANEGAS, J. D. Bean grain hysteresis with induced mechanical damage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.10, p.930-935, 2016.

CARDOSO, A. D.; VIANA, A. E. S.; MUNIZ, W. F.; ANDRADE, J. S.; MOREIRA, G. L. P.; JÚNIOR, N. S, C. Avaliação de variedades de mandioca tipo indústria. **Magistra**, v. 26, n.4, p. 456- 466, 2014.

CARMO, A. S.; ALVES, T. C. O.; MARTINS, P. C. Estudo da cinética de desidratação osmótica de fatias de mandioca. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v. 7, n.2, p. 266-272, 2017.

CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A.; CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR, M. S. Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.9, p.987–994, 2013.

CASTRO, D. S.; NUNES, J. S.; JÚNIOR, A. F.S.; AIRES, J. E. F. A.; SILVA, W. P.; GOMES, J. P. Influência da temperatura no processo de desidratação osmótica de pedaços de goiaba. **Revista GEINTEC**, v.4, n.5, p.1413 -1423, 2014.

CASTRO, D. S.; AIRES, J. E. F.; AIRES, K. L. C. A. F.; Junior, A. F. S.; Silva, W. P.; Gomes, J. P. Physical and chemical changes in guava raisin (*Psidium guajava l.*) produced by osmotic dehydration and drying convective . **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n.10, p. 1449-1454, 2016.

CASTRO, D. S.; SILVA, W. P.; GOMES, J. P.; AIRES, J. E. F.; AIRES, K. L. C. A. F.; JUNIOR, A. F. S. Desenvolvimento e avaliação sensorial de goiaba-passa desidratada osmoticamente. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21, e2016013, p. 1-8, 2018.

CECCHI, H. M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos**. 2^a ed. Campinas: Editora Unicamp, 2003. 207p.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de Secagem de alimentos**. Planatina, DF: Embrapa cerrados, 2010.

CENI, G. C.; COLET, R.; PERUZZOLO, M.; WITSCHINSKI, F.; TOMICKI, L.; BARRIQUELLO, A. L.; VALDUGA, E. Evaluation of nutritional of components of cassava's varieties (*Manihot esculentaCrantz*). **Alimentos e Nutrição, Araraquara**, v.20. n.1, p. 107-111, 2009.

CHABBOUH, M.; HAJJI, W.; AHMED, S. B. H.; FARHAT, A.; BELLAGHA, S. SAHLI, A. Combined effects of osmotic dehydration and convective air drying on kaddid meats: Kinetics and quality. **Drying Technology**, v. 29, n. 13, p. 1571–1579. 2011.

CHAVAN, U. D.; AMAROWICZ, R. et al. Osmotic dehydration process for preservation of fruits and vegetables. **Journal of Food Research**, v. 1, n. 2, p.201-209, 2012.

CHAUHAN, O. P., SINGH, A., SINGH, A., RAJU, P. S., BAWA, A. S. Effects of osmotic agents on colour, textural, structural, thermal, and sensory properties of apple slices. **International Journal of Food Properties**, v.14, n.5, p.1037-1048, 2011.

CHENLO, F.; MOREIRA, R.; FERNÁNDEZ-HERRERO, C.; VÁZQUEZ, G. Osmotic dehydration of chesnut with sucrose, Mas transfer processes and global kinects modelling. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 3-4, p. 765-774, 2007.

CHICHERCHIO, C. L. S. **Mandioca e principais derivados**. In: CONAB. **Perspectivas para agropecuária: Safra 2014/15**. Brasília: CONAB, 2014. p. 106-117.

CHIN, N. L.; KEK, S. P.; YUSOF, Y. A. Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. **Food and Bioproducts Processing**, v.91, n. 4, p. 495-506, 2013.

CHISTÉ, R. C.; CARDOSO, J. M.; SILVA, D. A.; PENA, R. S.; Comportamento higroscópico das farinhas de mandioca tipos seca e d'água. **Ciência Rural**, v.45, n. 8, p. 1515-1521, 2015.

CHISTÉ, R. C.; COHEN, K. O.; MATHIAS, E. A.; RAMOS JÚNIOR, A. G. A. Qualidade da farinha de mandioca do grupo seca. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n 4, p. 861-864, 2006.

CHISTÉ, R. C.; SILVA, P. A.; LOPES, A. L.; PENA, R. S. Sorption isotherms of tapioca flour. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 47, n. 4, p. 870-874, 2012.

CIURZYŃSKA, A.; CICHOWSKA, J.; KOWALSKA, H.; CZAJKOWSKA, K.; LENART, A. Osmotic dehydration of Braeburn variety apples in the production of sustainable food products. **International Agrophysics**, v.32, n.1, p.141-146, 2018.

COIMBRA, L. M. P. L.; ARRUDA, H. A. S.; MACHADO, E. C. L. M.; SALGADO, S. M.; ALBUQUERQUE, S. S. M. C.; ANDRADE, S. A. C.; MARIA. Water and sucrose diffusion coefficients during osmotic dehydration of sapodilla (*Achras zapota L.*). **Ciência Rural, Santa Maria**, v.47, n. 8, p. 1-7, 2017.

CÓRDOVA, K. R. **Desidratação osmótica e secagem convectiva de maçã Fuji comercial e industrial**. 2006. 148f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CÔRREA FILHO, L. C. C.; ANDRADE, E. T.; MARTINAZZO, A. P.; D'ANDREA, E. M.; SOUSA, F. A.; 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, n.8, p.797-802, 2015.

CORRÊA FILHO, L. C.; MARTINAZZO, A. P.; TEODORO, C. E. S.; ANDRADE, E. T. Post-harvest of parsley leaves (*Petroselinum crispum*): Mathematical modelling of drying and sorption processes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.2, p.131-136, 2018.

CORRÊA, J. L.G.; PEREIRA, L.M.; VIEIRA, G.S.; HUBINGER, M. D. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. **Journal of Food Engineering**, v. 96, n. 4, p. 498-504, 2010.

CORRÊA, J.L.G.; RASIAB, M.C.; MULETC, A.; CÁRCEL, J. A. Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*). **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v.41, p. 284-291, 2017.

CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; BOTELHO, S. C. C.; GONELI, A. L. D. Isotermas de sorção de água de frutos de *Coffea canéfora*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 18, n. 10, p. 1047-1052, 2014.

CORZO, O.; BRACHO, N.; ALVAREZ, C. Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying. **Journal of Food Engineering**, v.87, n.4, p. 479-484. 2008.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; SOUSA, K. A. Isotherms and isosteric heat in the seeds of *Buchenavia capitata* (Vahl) Eichler. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 46, n. 3, p. 516-523, 2015.

COUTO, E. M. **Caracterização de cultivares de mandioca do semi-árido mineiro em quatro épocas de colheita**. 2013. 117f. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2. ed. Oxford: Clarendon, 1975.

CUNNINGHAM, S. E.; MCMINN, W. A. M.; RICHARDSON, P. S. Modelling water absorption of pasta during soaking. **Journal of Food Engineering**, v.82, n.4, p.600–607, 2007.

DAIRO, O. U.; ADERINLEWO, A. A.; ADEOSUN, O. J.; OLA, I. A.; SALAUDEEN, T. Solar Drying KineticS of caSSava SliceS in a MixeD flow Dryer. **Acta Technologica Agriculturae**, v.18, n.4, p. 102-107, 2015.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de alimentos de Fennema**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010, 900p.

DEEPIKA, K.; GAYATHRI, V. Optimization of Process Parameters on Osmotic Dehydration of Radish Slices using Response Surface Methodology (RSM). **International Journal of Pharmaceutical Sciences and Business Management**, v. 3, n. 3, p. 1-10, 2015.

DEHGHANNYA, J.; BOZORGHI, S.; HESHMATI, M. K. Low temperature hot air drying of potato cubes subjected to osmotic dehydration and intermittent microwave: drying kinetics, energy consumption and product quality indexes. **Heat Mass Transfer**, v. 54, n.4, p. 929–954, 2018.

DEHGHANNYA, J.; GORBANI, R.; GHANBARZADEH, B. Effect ofultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on drying kinetics and effective moisture diffusivity of Mirabelle plum. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.39, n.6, p. 2710-2717, 2015.

DEHGHANNYA, J.; GORBANI, R.; GHANBARZADEH, B. Shrinkage of Mirabelle plum during hot air drying as influenced by ultrasoundassisted osmotic dehydration. **International Journal Food Properties**, v.19, n.5, p. 1093–1103, 2016a.

DEHGHANNYA, J.; NAGHAVI, E. A.; GHANBARZADEH, B. Frying of potato strips pretreated by ultrasound-assisted air-drying. **Journal Food Processing and Preservation**, v.40, n.4, p. 583–592, 2016b.

DEM CZUK JÚNIOR, B.; FACHIN, D. T.; RIBANI, R. H.; FREITAS, R. J. S. Degradação da cor e do ácido ascórbico na desidratação osmótica de kiwi. **Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos**, v.26, n.2, p.229-238, 2008.

DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com as propriedades físico-químicas, **Ciência Rural**, v.39, n.3, p.945-954, 2009.

DEROSSI, A.; SEVERINI, C.; DEL MASTRO, A.; DE PILLI, T. Study and optimization of osmotic dehydration of cherry tomatoes in complex solution by response surface methodology and desirability approach. **Food Science and Technology**, v. 60, n. 2, p. 641–648, 2015.

DEVIC, E.; GUYOI, S.; DAUDIN, J.; BONAZZI, C. Effect of temperature and cultivar on polyphenol retention and mass transfer during osmotic dehydration of apples. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 1, p. 606-14, 2010.

DIONELLO, R. G.; BERBERT, P. A.; MOLINA, M. A. B.; VIANA, A. P.; CARLESSO, V. O.; QUEIROZ, V. A. Desidratação por imersão-impregnação de abacaxi em soluções de sacarose e em xarope de açúcar invertido. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 4, p. 701-709, 2007.

DIONELLO, R. G.; BERBERT, P. A.; MOLINA, M. A. B.; PEREIRA, R. C. VIANA, A. P.; CARLESSO, V. O. Secagem de fatias de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação: cinética e avaliação de modelos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.29, n.1, p. 232-240, 2009.

DJENDOUBI MRAD, N.; BONAZZI, C.; BOUDHRIOUA, N., KECHAOU, N., COURTOIS, F., Influence of sugar composition on water sorption isotherms and on glass transition in apricots. **Journal of Food Engineering**, v. 111, n.2, p. 403–411. 2012.

DUARTE, M. E. M.; UGULINO, S. M. P.; MATA, M. E. R. M. C.; GOUVEIA, D. S.; QUEIROZ, A. J. M. Desidratação osmótica de fatias de jaca. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 478-483, 2012.

EDOUN, M.; KUITCHE, A. Sorption isotherms and isosteric energy of Manihot esculenta leaves. **International Food Research Journal**, v. 21, n. 1, p. 343-348, 2014.

EGEA M. B, BORSATO D, SILVA RSSF, YAMASHITA F. Osmo-dehydrated functional product containing fructo-oligosaccharides: physical, chemical and sensorial characteristics. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 55, n. 6, p. 927-36, 2012a.

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

EGEA M. B, SILVA RSSF, YAMASHITA F, BORSATO D. Optimizing dehydration of apples Malus Domestica with fructooligosaccharide incorporation. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 55, n. 5, p. 751-762, 2012b.

ESCOBAR, M.P.; GALINDO, F.G.; WADSO, L.; NAJERA, J.R.; SJOHOLM, I. Effect of long-term storage and blanching pre-treatments on the osmotic dehydration kinetics of carrots (*Daucus carota* L. cv. Nerac). **Journal of Food Engineering**, v. 81, n.2, p. 313-317, 2007.

EL-AOUAR, A. A. **Estudo do processo de secagem de mamão formosa fresco e pré-tratado osmoticamente**. 2005. 215f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

ELER, F.M.; SILVA, T.C.; SOUZA, B.M.; MANCINI, M.C. Estudo da desidração osmótica de fatias de maçã verde em batelada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8, 2009, Uberlândia. **Anais...Uberlândia: COBEQIC**, 2009. P.1-4.

ELIASSON, A.C. **Starch in food – Structure, function and applications**. New York: Boca Raton, CRC, 2004. 605p.

EL-SHARKAWY, M. A. Stress-tolerant cassava: the role of integrative ecophysiology-breeding research in crop improvement. **Open Journal of Soil Science**, v. 2, n. 2, p. 162-186, 2012.

EROGLU, E.; YILDIZ, H. Recent Developments in Osmotic Dehydration. **Akademik Gıda**, v. 8, n. 6, p. 24-28, 2010.

EZEANYA, N. C.; AKUBUO, C. O.; CHILAKPU, K. O.; IHEONYE, A. C. Modeling of thin-layer solar drying kinetics of cassava noodles (tapioca). **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 20, n. 1, p.139-200, 2018.

FAO Agriculture. **FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION**, 2011. Disponível em: <http://faostat.fao.org>. Acesso em: 2016.

FALADE, K.; AWORH, O. Adsorption isotherms of osmo-oven dried African star apple (*Chrysophyllum albidum*) and African mango (*Irvingia gabonensis*) slices. **European Food Research Technology**, v. 218, n.3, p. 278–283. 2004.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de Alimentos: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.602p.

FERNANDES, M. A.; **Obtenção de “chips” de berinjela (*Solanum melongena* L.) mediante processo combinado de desidratação osmótica em solução ternária e secagem convectiva**. 2012. 53f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

FERNANDO, W.J.N.; LOW, H.C.; AHMAD, A.L. Dependence of the effective diffusion coefficient of moisture with thickness and temperature in convective drying of sliced materials. A study on slices of banana, cassava and pumpkin. **Journal of Food Engineering**, v.102, n.4, p. 310–316, 2011.

FERREIRA, L. F. D.; PIROZI, M. R.; RAMOS, A. M.; PEREIRA, J. A. M. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.6, p.855-862, 2012.

FIALHO, J.F.; VIEIRA, E.A. **Mandioca no Cerrado: orientações técnicas/editores técnicos**, 2 ed., Planaltina- DF, Embrapa Cerrados, 2011. 208p.

FIGIEL, A. Drying Kinetics and Quality of Beetroots Dehydrated by Combination of Convective and Vacuum Microwave Methods. **Journal of Food Engineering**, v.98, n.4, 461–470, 2010.

FIORDA, F. A.; SOARES M. S. JR.; DA SILVA, F.A.; GROSMANN, M.V.E. Microstructure, texture and colour of gluten-free pasta made with amaranth flour, cassava starch and cassava bagasse. **LWT-Food Science and Technology**, v. 54, n.1, p.132–138, 2013.

FIORDA, F. A.; JÚNIOR, M. S.S.; SILVA, F. A.; MOURA, C. M. A.; GROSSMANN, M. V. E. Physical quality of snacks and technological properties of pre-gelatinized flours formulated with cassava starch and dehydrated cassava bagasse as a function of extrusion variables. **LWT - Food Science and Technology**, v. 62, n.2, p. 1112-1119, 2015.

FIORENTIN, L. D.; MENON, B. T.; BARROS, S. T. D.; PEREIRA, N. C.; LIMA, O. C. M.; MODENES, A. N. Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial bagaço de laranja, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.14, n.6, p.653–659, 2010.

FORTES M.; OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to food and grain. In: MUJUMDAR, A. **Advances in Drying**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation v.1 p. 119-154, 1980.

FREITAS, L. A.; MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M.; FERREIRA, J. C. ; SILVA, F. A. S.; CAVALCANTI, R. F. R. M. Cinética de desidratação osmótica de tomates com soluções hipertônica contendo compostos aromáticos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, n.Especial, p.337-344, 2011.

GABAS, A. L.; TELIS-ROMERO, J.; GIRALDO-GÓMEZ, G. I.; TELIS, V. R. N. Propiedades termodinámicas de sorción de agua de la pulpa de lulo en polvo com encapsulantes. **Ciências e Tecnologia de Alimentos**, v.29, n.4, p.911-918, 2009.

GARCÍA, F.; MARTÍNEZ A. EVALUACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE SORCIÓN EN CEREALES PARA DESAYUNO. **Superficies y Vacío**, v. 19, n. 1, p. 12-19, 2006.

GARCIA-NOGUERA, J.; OLIVEIRA, F. I. P.; GALLÃO, M. I.; WELLER, C. L.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F. A. N. Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration of Strawberries: Effect of Pretreatment Time and Ultrasonic Frequency. **Drying Technology**, v. 28, n.2, p. 294-303, 2010.

GENINA-SOUTO, P.; BARRERA-CORTES, J.; GUTIERREZ-LOPEZ, G.; NIETO, E.A. Temperature and concentration effects of osmotic media on profiles of sweet potato cubes. **Drying Technology**, v.19, n.3-4, p.547-558, 2011.

GERMER, S. M.; QUEIROZ, M. R.; AGUIRRE, J. M.; BERBARI, S. A. G.; ANJOS, V. D. Desidratação osmótica de pêssegos em função da temperatura e concentração do xarope de sacarose. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.2, p.161–169, 2011.

GERMER, S. P. M.; QUEIROZ, M. R.; AGUIRRE, J. M.; BERBARI, S. A. G.; ANJOS, V. D. ANJOS. Variáveis de processo na desidratação osmótica de pêssegos em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v.30, n. 4, p. 940-948, 2010.

GHEYBI, F.; RAHMAN, R.A.; BAKAR, J.B.; AZIZ, S. H. A. Optimization of osmotic dehydration of honeydew using response surface methodology. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v. 5, n. 19, p. 2308-2317, 2013.

GÓIS, J. L. C. X.; COSTA, A. K. L.; FILHO, R. S. F. Estudo da cinética de desidratação osmótica de banana maçã (*Musa acuminata* Colla x *Musa balbisiana* Colla, Grupo AAB). **Instituto Federal de Educação**, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, IFRN, p. 1-8. 2010.

GOMES, A. M. M. ; SILVA, P. L. ; SOARES, S. A. ; SILVA, C. M. ; GALLAO, M. I.; GERMANI, R.; RICARDO, N. M P S. Isolation and physico- chemical and rheological characterization of the Brazilian jalap starch (*Operculina tuberosa* Meisn). **Carbohydrate Polymers**, v. 1, n. 77, p. 885-890, 2009.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M. Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds. *Transactions of the ASABE*, v.53, n.1, p.191–197, 2010.

GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. C.; VILHASANTI, H. C. B.; GONÇALVES, A. A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.

GOULA, A. M.; LAZARIDES, H. N. Modeling of mass and heat transfer during combined processes of osmotic dehydration and freezing (Osmo-Dehydro- Freezing). **Chemical Engineering Science**, New York, v. 82, n. 12, p. 52-61, 2012.

GUERRA, I. C. D. G.; MEIRELES, B. R. L. A.; FÉLEX, S. S. S.; CONÇEIÇÃO, M. L.; SOUZA, E. L.; BENEVIDES, S. D.; MADRUGADA, M. S. Carne de ovinos de descarte na elaboração de mortadelas com diferentes teores de gordura suína. **Ciência Rural**, v. 42, n. 12, p. 2288-2294, 2012.

GUIMARÃES, M. M.; SILVA, M. S. Valor nutricional e características químicas e físicas de frutos de murici-passa (*Byrsonima verbascifolia*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, n.4, p. 817-821, 2008.

GUINÉ, R. P. F.; BARROCA, M.J.; SILVA, V. Mass Transfer Properties of Pears for Different Drying Methods. **International Journal of Food Properties**, v.16, n.2, 251–262, 2013.

GUINÉ, R. P. F. Moisture diffusivity in pears: Experimental determination and derivation of a mathematical prediction model, *International Journal of Food Science and Technology*, v. 41, n. 10, p. 1177-1181, 2006.

GUPTA, R.; SINGH, B.; SHIVHARE, U.S. Optimization of osmo-convective dehydration process for the development of honey-ginger candy using response surface methodology. **Drying Technology**, v. 30, n. 7, p. 750–759. 2012.

GUPTA, S. V.; PATIL, B. N. Convective drying of osmo-dehydrated sapota slices. **International Journal of Agriculture and Food Science Technology**, v. 5, n.4, p. 219-226, 2014.

HADIPERNATA, M.; OGAWA, M. Mass Transfer and Diffusion Coefficient of D-Allulose during Osmotic Dehydration. **Journal of Applied Food Technology**, v.3, n.2, p.6-10, 2016.

HAMEDI, F. ; MOHEBBI, M.; SHAHIDI, F.; AZARPAZHOOH, E.; Ultrasound-Assisted Osmotic Treatment of Model Food Impregnated with Pomegranate Peel Phenolic Compounds: Mass Transfer, Texture, and Phenolic Evaluations. **Food and Bioprocess Technology**, v.11, n.5, p. 1061–1074, 2018.

HE, J. F.; MACGREGOR, G. A. Reducing population salt intake worldwide: from evidence to implementation. **Progress in Cardiovascular Diseases**, v.52, n. 5, p. 363-382, 2010.

HELLÍN, L.C.; CLAUSELL, M. P.R. Incidencia de la Fritura en la Composición de la Fracción Lipídica de diversos aperitivos de consumo generalizado en nuestro País. **Anal. Bromatol.**, v.36, n.1, p.5 – 31, 1984.

HERMAN-LARA, E.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C. E.; PACHECO-ÂNGULO, H.; CARMONIA-GARCIA, R.; RUIZ-ESPINOZA, R.; RUIZ-LÓPEZ, I. I. Mass transfer modeling of equilibrium and dynamics periods during osmotic dehydration of radish in NaCl solutions. **Food and Bioproducts Processing**, v.91, n.3, p. 216-224, 2013.

HENAO, J. D.; QUEIROZ, M. R.; HAJ-ISA, N. M. A. Umidade de equilíbrio de café cereja descascado baseada em métodos estático e dinâmico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 470–476, 2009.

HEREDIA, A.; PEINADO, I.; BARRERA, C.; GRAU, A.A. Influence of process variables on colour changes, carotenoids retention and cellular tissue alteration of cherry tomato during osmotic dehydration. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 22, n. 4, p. 285-294, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2016). Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA). **Dados de previsão de safra de mandioca**. Recuperado em 30 de dezembro de 2016, de <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>.

ISQUIERDO, E. P.; BORÉM, F. M.; ANDRADE, E. T.; CORRÊA, J. L. G.; OLIVEIRA, P. D.; ALVES G. E. Drying kinetics and quality of natural coffee. **Transactions of the ASABE**, v. 56, n. 3, p. 1003–1010, 2013.

IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984), **Pure & Applied Chemistry**, v.57, n.4, p.603-619, 1985.

JAIN, S. K.; VERMA, R. C.; SHARMA, G. P.; JAIN, H. K. Studies on moisture sorption isotherms for osmotically dehydrated papaya cubes and verification of selected models. **Journal of Food Science and Technology**, v.47, n.3, p. 343-346, 2010.

JAIN, S. K.; VERMA, R. C.; MURDIA, L. K.; JAIN, H. K.; SHARMA, G. P. Optimization of process parameters for osmotic dehydration of papaya cubes. **Journal Food Science Technology**, v. 48, n. 2, p. 211–217, 2011.

JANJAI, S.; BALA, B.K.; TOHSING, K.; MAHAYOTHEE, B.; HAEWSUNGCHARERN, M.; MÜLLER, J. Moisture sorption isotherms and heat of sorption of mango. **International Agricultural Engineering**, v. 16, n. 3-4, p. 159-168, 2007.

JANJAI, S.; LAMLERT, N.; TOHSING, K.; MAHAYOTHEE, B.; BALA, B.K.;MÜLLER, J.; 2010. Measurement and modeling of moisture sorption isotherm of litchi (*Litchi chinensis Sonn.*). **International Journal of Food Properties**, v.13, n.2, p. 251-260, 2010.

JOARDDER, M.U.H.; BROWN, R.J.; KUMAR, C.; KARIM, M.A. Effect of Cell Wall Properties on Porosity and Shrinkage of Dried Apple. **International Journal of Food Properties**, v.18, n.10, p. 2327-2337, 2015.

JUNQUEIRA, J. R. J.; CORREA, J. L. G.; MENDONÇA, K. S. Evaluation of the shrinkage effect of sweet potato. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.41, n.3, p. 1-10, 2017.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, n.1, p. 98–108, 2007.

KATEKAWA, M. E. **Análise teórico-experimental do encolhimento: estudo da secagem de banana**. 2006. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

KAYA, A.; AYDIN, O.; DINCER, I. Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits (*Actinidia Deliciosa Planch*), **Journal Food Engineering**, v. 88, n.3, p. 323 330, 2008.

KAYA, A.; AYDIN, O.; KOLAYLI, S. Influence of osmotic dehydration on drying kinetics of carrot. **Journal of Thermal Science and Technology**, v. 36, n. 2, p.155-162, 2016.

KEK, S. P.; CHIN, N. L.; YUSOF, Y. A. Simultaneous time-temperature-thickness superposition theoretical and statistical modelling of convective drying of guava. **Journal of Food Science and Technology** ,v.51, n.12, p. 3609-3622. 2013.

KHAN, M.A.; SHUKLAA R.N.; ZAIDI, S. Mass Transfer during Osmotic dehydration of Apple using Sucrose, Fructose and Maltodextrin Solution In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENGINEERING AND FOOD, 11, 2011, Athenas. **Anais...** Grecia. ICEF, 2011.

KOC, B.; EREN, I.; ERTEKIN, F.K. Modelling Bulk Density, Porosity, and Shrinkage of Quince During Drying: The Effect of Drying Method. **Journal of Food Engineering**, v.85, n.6, p. 340–349, 2008.

KOOCHEKI, A.; AZARPAZHOOH, E. Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of plum using response surface methodology. **International Journal of Food Properties**, v. 13, n.1, p. 155–166, 2010.

KOPRIVICA, G.; MIŠLJENović, N.; LEVIĆ, L.; PEZO.; ĆURČIĆ, B.; KULJANIN, T.; KNEŽEVIĆ, V. Osmotic dehydration of carrot cubes in the solution of sugar beet molasses - kinetics model. **Journal on Processing and Energy in Agriculture**, v.17, n. 2, p 80-85, 2013.

KORSRILABUT, J.; BOROMPICHAICHARTKUL, C.; DUANGMAL, K. Effect of invert sugar on the drying kinetics and water mobility of osmoted-air dried cantaloupe, *International Journal of Food Science and Technology*, v. 45, n.7, p. 1524-1531. 2010.

KOUA, B. K.; KOFFI, P. M. E.; GBAHA, P.; TOURE, S. Thermodynamic analysis of sorption isotherms of cassava (*Manihot esculenta*). *Journal Food of Science and Technology*, v.51, n.9, p. 1711-1723, 2014.

KOWALSKI, S.; ŁECHTAŃSKA, J.M. Drying of red beetroot after osmotic pretreatment: Kinetics and quality considerations. *Chemical and Process Engineering*, v. 36, n. 3, p. 345-354, 2015.

KOWALSKI S.J.; MIERZWA D. Influence of preliminary osmotic of carrot (*Daucus Carota* L.). *Chemistry. Process Engineering*, v. 32, n.3, p.185-194. 2011.

KOWALSKI, S.; SZADZIŃSKA, J. Convective–intermittent drying of cherries preceded by ultrasonic assisted osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 82, n.82, p. 65-70, 2014.

KUROISHI, A. M.; QUEIROZ, M. B.; ALMEIDA, M. M.; QUAST, L. B. Avaliação da cristalização de mel utilizando parâmetros de cor e atividade de água. *Brazilian Journal. Food Technology*, v. 15, n. 1, p. 84-91, 2012.

KUROZAWA, L.E.; EL-AOUAR, A. A.; MURR, F. E. X. Obtenção de isotermas de dessorção de cogumelo *in natura* e desidratado osmoticamente. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 25, n.4, p. 828-834, 2005.

LAZARIDES, H. N.; KATSANIDIS, E.; NICKOLAIDIS, A. Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. *Journal of Food Engineering*, v. 25, n. 2, p. 151-166, 1995.

LAZOU, A. E.; GIANNAKOUREOU, M. G.; LAFKA, T. I.; LAZOS, E. S. Kinetic Study of the Osmotic Pretreatment and Quality Evaluation of Traditional Greek Candied Pumpkin. *Gavin Journal of Food and Nutritional Science*, v. 2016, n. 1, p. 1-9, 2016.

LEE, J.; LIM, L. Osmo-dehydration pretreatment for drying of pumpkin slice. *International Food Research Journal*, v.18, n. 4, p. 1223-1230, 2011.

LEITE, A. L. M. P.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; PIASSON, D.; SANTOS, P. Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 45, n. 2, p. 155-162, 2015.

LENART, A., LEWICKI, P. Handbook of Industrial Drying, Boca Ration: Ed. Taylor and Francis group. In: P. LEWICKI, A. L. (Ed.). *Drying Techonology*. 3. ed., v. 6, p. 665-681, 2006.

LI, H.; DING, S.; WANG, Z.; ZHAO, C.; GUO, Y.; AN, K. Mass transfer evaluation of ultrasonic osmotic dehydration of cherry tomatoes in sucrose and salt solutions. *International Journal of Food Science & Technology*, v.47, n.5, p. 954-960, 2012.

LI, H.; RAMASWAMY, H. S. Osmotic dehydration: dynamics of equilibrium and pseudo-equilibrium kinetics. **International Journal of Food Properties**, v. 13, n. 2, p. 234-250, 2010.

LILEY, P. E.; THOMPSON, G. H.; FRIEND, D. G.; DAUBERT, T. E.; BUCK, E. Physical and Chemical Data. In **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 7th ed.; PERRY, R. H., GREEN, D. W., MALONEY, J. O., (editors).; McGrawHill: New York, NY, USA, 1999; Section 2.

LOMAURO, C.J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Evaluation of food moisture isotherm equations. Part I: Fruit, vegetable and meat products. **Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie**, v.18, n.2, p.111-117, 1985.

LUCHESE, C. L. **Avaliação da Influência da Temperatura e da Concentração da Solução de Sacarose na Desidratação Osmótica de Physalis (*Physalis peruviana* L.)** 2013. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

LUGO, P. J. M. ; PADILLA, K. A. M.; GALLO, R. T.; FANDIÑO, J. M. M. ; VASQUEZ, R. D. G. Evaluación experimental del secado de yuca variedad venezolana por medio de un sistema híbrido de calentamiento de aire. **Revista chilena de ingeniería**, v. 26, n. 2, p. 329-338, 2018.

LUNA, A. T.; RODRIGUES,, F. F. G.; COSTA, J. G. M.; PEREIRA, A. O. B. Estudo físico-químico, bromatológico e microbiológico de *Manihot esculenta* Crantz (mandioca). **Revista Interfaces: Saúde, Humanas e Tecnologia**, v. 1, n.3, p. 1-11, 2013.

MACHADO, A. V.; LEANDRO DE OLIVEIRA, E. L.; SANTOS, E. S.; ARAÚJO DE OLIVEIRA, J.; FREITAS, L. M. Avaliação de um secador solar sob convecção forçada para a secagem do pedúnculo de caju. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2011.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLLB, R. H.; BUCKLEB, K. A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.1, p.75-97, 1996.

MAIEVES, H. A. **Caracterização Física, Físico Química e Potencial Tecnológico de novas Cultivares de Mandioca**. 2010. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MAKOWSKA, A.; CAIS-SOKOLIŃSKA, D.; LASIK, A. Effect of technological factors on water activity of extruded corn product with an addition of whey proteins. **Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria**, v. 13, n. 3, p. 243–247, 2014.

MALDONADO, S.; SANTAPAOLA, J. E.; SINGH, J.; TORREZ, M.; GARAY, A. Cinética de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de yacón (*Smallanthus sonchifolius*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, n. 1, p. 251-256, 2008.

MANAFI, M.; HESARI J.; HADI PEIGHAMBARDOUST, S.; DAMIRCHI, S. A.; KHOYI, M. R. A kinetic study of osmotic dehydration of apricot using salt solutions Estudio cinético de la deshidratación osmótica de albaricoque usando soluciones salinas. **Cyta - Journal of Food**, v. 9, n. 3, p. 167-170, 2011.

MANIVANNAN, P.; RAJASIMMAN, M. Otimization of process parameters for the osmotic dehydration of beetroot in sugar solution. **Journal of Food Process Engineering**. v. 34, n. 3, p. 804-825, 2011.

MAYOR, L.; MOREIRA, R.; CHENLO, F.; SERENO, A. M. Kinectcs of osmotic dehydration of pumpkin with sodium chloride solutions. **Journal of food engineering**, v.74, n.2, p. 253-262, 2006.

MAYOR, L.; MOREIRA, R. ; SERENO, A. M.; Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 103, n. 1, p. 29-37, 2011.

MARTINS, E. A. S.; GONELI, A. L.D.; GONÇALVES, A. A.; FILHO, C. P. H.; RECH, J.; OBA, G. C. Physical properties of safflower grains. Part II: Volumetric shrinkage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.5, p.350-355, 2017.

MARTINS, M. C. P.; CUNHA, T. L.; SILVA, M. R. Efeito das condições da desidração osmótica na qualidade de passas de caju-do cerrado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 1, p. 158-165, 2008.

MD SALIM, N. S.; GARIÈPY, Y.; RAGHAVAN, V. Effects of operating factors on osmotic dehydration of broccoli stalk slices. **Cogent Food & Agriculture**, v. 2, n.1, p. 1-11, 2016.

MEHTA, B. K.; JAIN, S. K.; SHARMA, G. P.; DOSHI, A.; JAIN, H. K.; KENDRA, K. V. Response Surface Optimization of Osmotic Dehydration Process Parameters for Button Mushroom (*Agaricus bisporus*) - Part I. **Focusing on Modern Food Industry (FMFI)**. v. 2, n.2. p.91-102, 2013.

MELLO, L.R.P.F.; MALI, S. Use of mal bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch. **Industrial Crops and Products**, v. 55, 187 – 193. 2014.

MENDES, R. L.; FREITAS, C. H.; SCAGLIONI, P. T.; SCHMIDT, C. G.; FURLONG, E. B. Condições para desidração osmótica de laranjas e as propriedades funcionais do produto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.11, p.1210–1216, 2013.

MENDES, U. C.; RESENDE, O.; DONADON, J. R.; ALMEIDA, D. P.; ROCHA, A. C.; OLIVEIRA, D. E. C. Efeito da secagem nas propriedades físicas dos grãos de feijão adzuki. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 6, p. 3871-3880, 2016.

MENDONÇA, A. K. S.; CORRÊA, J.L.G.; JESUS, J.R.; PEREIRA, M.C.A.; VILELA, M.B. Optimization of osmotic dehydration of yacon slices. **Drying Technology**, v. 34, n.4, p. 386-394, 2016.

MENDONÇA, K. S. **Otimização da desidratação osmótica de fatias de yacon assistida por ultrassom**. 2014. 137f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos). Universidade Federal de Lavras, 2014.

MENDONÇA, K. S.; JESUS, J. R.; PEREIRA, M. C. A.; CORRÊA, J. L. G. Osmotic dehydration of yacon slices: effect of different polyols on mass transfer parameters. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 20, 2014, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: COBEQ, 2014, P. 1-8.

MERCALI, G. D. **Estudo da transferência de massa na desidratação osmótica de banana (*Musa sapientum*, shum.)**. 2009. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MERCALI, G. D.; KECHINSKI, C. P.; COELHO, J. A.; TESSARO, I. C.; MARCZAK, L. D. F. Estudo da transferência de massa durante a desidratação osmótica de mirtilo. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 13, n. 2, p. 91-97, 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, n. 1, p. 82-91, 2011b.

MERCALI, G. D.; KECHINSKI, C. P.; COELHO, J. A.; TESSARO, I. C.; MARCZAK, L. D. F. Estudo da transferência de massa durante a desidratação osmótica de mirtilo. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 13, n. 2, p. 91-97, 2011a.

METTA, F. I. K.; AYROSA, A. M. I. B.; PALETTA, F. C. **O papel da liofilização na conservação de alimentos pelo controle da umidade**. In: XII Safety, Health and Environment World Congress, 2012.

MIMURA, H. J.; JORGE, R. M. M.; MATHIAS, A. L. Pré-tratamentos na secagem e reidratação de champignon em fatias. **Ciência Rural, Santa Maria**, v.44, n.4, p.717-722, 2014.

MOKHTARIAN, M.; MAJD, M. H.; KOUSHKI, F.; BAKHSHABADI, H.; GARMAKHANY, A. D.; RASHIDZADEH, S. Optimisation of pumpkin mass transfer kinetic during osmotic dehydration using artificial neural network and response surface methodology modelling. **Quality Assurance and Safety of Crops & Foods**, v. 6, n. 2, p. 201 – 214, 2014.

MONNERAT, S. M.; PIZZI, T. R. M.; MAURO, M. A.; MENEGALLI, F. C. Osmotic dehydration of apples in sugar/salt solutions: concentration profiles and effective diffusion coefficients. **Journal of Food Engineering**, v. 100, n. 4, p. 604-612, 2010.

MORAES, K.; PINTO, L. Desorption isotherms and thermodynamics properties of anchovy in natura and enzymatic modified paste. **Journal of Food Engineering**, v. 110, n.4, p. 507-513, 2012.

MORAES, M. A.; ROSA, G. S.; ALMEIDA PINTO, L. A. Isotermas de Equilíbrio para Quitina: Determinação do Calor de Dessorção. **Brazilian Journal Food Technology**, v. 10, n. 3, p. 212-219, 2007.

MORAES RR. Refratometria. Disponível em: <http://www.fapepi.pi.gov.br/novafapepi/ciencia/documentos/REFRAT%D4METRO.PDF> Acesso em 20 de maio de 2018.

MOREIRA, G. L. P.; PRATES, C. J. N.; OLIVEIRA, L. M.; VIANA, A. E. S.; JÚNIOR, N. S. C.; FIGUEIREDO, M. P. Composição bromatológica de mandioca (*Manihot esculenta*) em função do intervalo entre podas. **Revista de Ciências Agrárias**, v.40, n.1, p. 144-153, 2017.

MOREIRA, R.; SERENO, A.M. Evaluation of Mass Transfer Coefficients and Volumetric Shrinkage During Osmotic Dehydration of Apple Using Sucrose Solutions in Static and Non-Static Conditions. **Journal of Food Engineering**, v. 57, n.1, p. 25-31, 2003.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M. D.; VALLEJO, N. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. **Journal Food Engineering**, v.88, p. 514–521. 2008.

MORENO, A.; LEÓN, D.; GIRALDO, G.; RIOS, E. Estudio de la cinética fisicoquímica del mango (*Mangifera indica L. Var. tommy Atkins*) tratado por métodos combinados de secado. **DYNA**, v.77, n.162, p. 75-84, 2010.

MOYERS, C. G. and BALDWIN, G. W., Psychrometry, Evaporative Cooling and Solids Drying. In: PERRY, R. H.; GREEN, D. W.. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, Nova York, Estados Unidos, Ed. Mac Graw-Hill, 7 th edition, Cd-ROM, p. 12-1: 12-90, 1999.

MRAD, N. D.; BONAZZI, C.; COURTOIS, F.; KECHAOUC, N.; MIHOUBI, N. B. Moisture desorption isotherms and glass transition temperatures of osmo-dehydrated apple and pear. **Food and Bioproducts Processing**, v. 91, n. 2, p. 121-128, 2013. MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3rd ed. Boca Raton: CRC, 2007.

MUNDADA, M.; HATHAN, B. S.; MASKE, S. Mass Transfer Kinetics During Osmotic Dehydration of Pomegranate Arils. **Journal of Food Science**, v.76, n.1, p. 31-39, 2011.

NAHIMANA, H.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S.; DING, Z. Mass Transfer Modeling and Shrinkage Consideration during Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables. **Food Reviews International**, v. 27, n.4, p. 331–356, 2011.

NASCIMENTO, V. R. G.; BIAGI, J. D.; OLIVEIRA, R. A. Modelagem matemática da secagem convectiva com radiação infravermelha de grãos de Moringa oleífera. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.7, p.686–692, 2015.

NAVIA, D. P.; ALFREDO-AYALA, A.; VILLADA, H. S.; Isotermas de adsorção de farinha de mandioca bioplásticos moldadas por compressão. **Bioteconología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial**, v. 9, n.1, p.77-87, 2011.

NIETO, A.B.; SALVATORI, D.M.; CASTRO, M.A.; ALZAMORA, S.M. Structural Changes in Apple Tissue During Glucose and Sucrose Osmotic Dehydration: Shrinkage, Porosity, Density, and Microscopic Features. **Journal of Food Engineering** v. 61, n.2, p. 269–278, 2004.

NOSHAD, M.; SHAHIDI, F.; MOHEBBI, M.; ALI MORTAZAVI, S. Desorption isotherms and thermodynamic properties of fresh and osmotic–ultrasonic dehydrated quinces. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.37, n.5, p.1-20, 2012.

NOSHAD, M.; SHAHIDI, F.; MOHEBBI, M.; MORTAZAVI, S. Desorption isotherms and thermodynamic properties of fresh and osmotic–ultrasonic dehydrated quince. **Journal of Food Processing Preservation**, v.37, n. 5, p.1–12, 2013.

OLADEJO, D.; ADE-OMOWAYE, B. I. O.; ADEKANMI, A. O. Experimental study on kinetics, modeling and optimisation of osmotic dehydration of mango (*Mangifera indica* L). **The International Journal Of Engineering And Science**, v. 2, n. 4, p. 1-8, 2013.

OLIVEIRA, D. C. **Caracterização e potencial tecnológico de amidos de diferentes cultivares de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)**. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina, 2011a.

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; FERREIRA JÚNIOR, W. N.; SILVA, I. O. F. Hygroscopicity of baru (*Dipteryx alata* Vogel) fruit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.4, p.279-284, 2017.

OLIVEIRA, M. I. S.; TONON, R. V.; NOGUEIRA, R. I.; CABRAL, L. M. C. Estabilidade da polpa de morango atomizada utilizando diferentes agentes carreadores. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 16, n. 4, p. 310-318, 2013.

OLIVEIRA, R. F.; SANTOS, L. M. M.; CLEMENTE, E. Physicochemical characteristics of guava “Paluma” submitted to osmotic dehydration. **Acta Scientiarum**, v. 36, n. 4, p. 733-737, 2014.

OLIVEIRA, S. P.; VIANA, A. E. S.; MATSUMOTO, S. N.; JÚNIOR, N. S. C.; SEDIYAMA, T.; SÃO JOSÉ, A. R. Efeito da poda e de épocas de colheita sobre características agrônômicas da mandioca. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 99-108, 2010.

OLIVEIRA, V. S.; AFONSO, M. R. A.; COSTA, J. M. C. Caracterização físico-química e comportamento higroscópico de sapoti liofilizado. **Revista Ciência Agrônômica**, 42, n. 2, p. 342-348, 2011b.

OSIDACZ, R. C.; AMBROSIO-UGRI, M. C. B. Physicochemical quality of eggplant dehydrated with varied pretreatments. **Acta Scientiarum Technology**, v. 35, n. 1, p. 175-179, 2013.

PAGLARINI, C. S.; SILVA, F.; PORTO, A. G.; PIASSON, D.; SANTOS, P. Histerese das isotermas de sorção da polpa de manga (*Mangifera indica* L.) variedade manteiga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 299-305, 2013.

PARK, K. J.; BIN, A.; PEDRO, R. B. F. Drying of pear dAnjou with and without osmotic dehydration. **Journal of food Engineering**, v 56, n.1, p. 97-103, 2002.

PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. Secagem: Fundamentos e Equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.16, n.1, p.93-127, 2014.

PASCOAL FILHO, W.; SILVEIRA, S. R. **Cultura da Mandioca (Manihot esculenta subsp esculenta)**. Minas Gerais: EMATER, 2012.

PAVKOV, I.; BABIĆ, L.; BABIĆ, M.; RADOJČIN, M.; STOJANOVIĆ, C. Effects of osmotic pre-treatment on convective drying kinetics of nectarines halves (*Pyrus persica L.*). **Journal on Processing and Energy in Agriculture**, v. 15, n.4, p. 217-222, 2011.

PERDOMO, J.; COVA, A.; SANDOVAL, L.; GARCÍA, L.; LAREDO, E.; MÜLLER, A. J. Glass transition temperatures and water sorption isotherms of cassava starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 76, n. 2, p. 305-313, 2009.

PEREIRA, B. L. B.; LEONEL, M. Resistant starch in cassava products. **Food Science and Technology**, v.34, n.2, p. 298-302, 2014.

PEREIRA, L. M.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. ; HUBINGER, M. D. Microscopic features, mechanical and thermal properties of osmotically dehydrated guavas. **LWT Food Science and Technology**, v.42, n. 1, p. 378-384. 2009.

PEREIRA, L.M.; FERRARI, C.C.; MASTRANTONIO, S.D.S.; RODRIGUES, A.C.C.; HUBINGER, M.D. Kinetic aspects, texture, and color evaluation of some tropical fruits during osmotic dehydration. **Drying Technoly**, v.24, n. 4, p. 475-484, 2006.

PEREZ, L.G.; OLIVEIRA , F. M. N.; ANDRADE, J. S.; MOREIRA FILHO, M. Cinética de secagem da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pré desidratada por imersão-impregnação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 102-6, 2013.

PESSOA, T.; AMARAL, D. S.; DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. GURJÃO, F. F. Avaliação sensorial de goiabas passas obtida por técnicas combinadas de desidratação osmótica e secagem. **Holos**, v. 4, n. 27, p. 137-147, 2011.

PESSOA, T.; SILVA, D. R. S.; GURJÃO, F. F.; MIRANDA, D. S. A.; DUARTE, M. E. M.; MATA, M. E. M. R. C. Cinética de desidratação osmótica e características físico-químicas de goiaba Paluma. **Tecnologia & Ciências Agropecuária**, v. 10, n. 6, p. 77-82, 2016.

PHISUT, N. 2012. Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits.. **International Food Research Journal**, v.19, n.1, p.7–18, 2012.

PISALKAR, P.S.; JAIN, N. K.; JAIN, S. K. Osmo-air drying of aloe vera gel cubes. **Journal of Food Science Technology**, v. 48, n. 2, p. 183–189. 2011.

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**, v. 119, n. 3, 490-496, 2013.

PORNPRAIPECH, P.; KHUSAKUL, M.; SINGKLIN, R.; SARABHORN, P.; AREEPRASERT, C. Effect of temperature and shape on drying performance of cassava chips. **Agriculture and Natural Resources**, v. 51, n. 5, p. 402-409, 2017.

PORTO, M. A. L.; GUERRA, N. B.; VASCONCELOS, M. A. S.; SIQUEIRA, A. M. O.; ANDRADE, S. A. C. Otimização da desidratação osmótica de uva Crimson **Seedless**. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 2, p. 249-256, 2014.

PURI, R.; KHAMRUI, K.. Effect of temperature on sorption isotherms and thermodynamics of intermediate moisture category indian milk product cham-cham. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 40, n. 5, p. 999-1009, 2016.

QUEJI, M. F. D.; PESSOA, L. S. Influência do tratamento osmótico na produção de tomate desidratado. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 5, n. 1, p. 282-92, 2011.

RADOJČIN, M.; BABIĆ, M.; PAVKOV, I.; STAMENKOVIĆ, Z. Osmotic drying effects on the mass transfer and shrinkage of quince tissue. **Journal on Processing and Energy in Agriculture**, v. 19, n. 3, p 113-119, 2015.

RAMYA, H.G., KUMAR, S. and KUMAR, M. 2014. Mass exchange evaluation during optimization of osmotic dehydration for oyster mushrooms (*Pleurotus sajor-caju*) in salt-sugar solution. **Journal of Applied and Natural Science**, v. 6, n. 1, p.110-116 2014.

RAMYA, V.; JAIN, N. K. A review on osmotic dehydration of fruits and vegetables: an integrated approach. **Journal of Food Process Engineering**, v.40, n.3, p. 1-22, 2016.

RAYAGURU, K.; ROUTRAY, W.; Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of stone apple slices. **International Food Research Journal**, v.19, n.4, p. 1503-1510. 2012.

REDA, S. Y.; CARNEIRO, P. I. B. Óleos e gorduras: aplicações e implicações. **Revista Analytica**, v.8, n. 27, p.60-67, 2007.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

REVASKAR, V.A.; PISALKAR, P.S.; PATHARE, P.B.; SHARMA, G.P. Dehydration kinetics of onion slices in osmotic and air convective drying process. **Research in Agricultural Engineering**, v.60, n.3, p.92-99, 2014.

RINALDI, M. M. ; VIEIRA, E. A.; FIALHO, J. F.; MALAQUIAS, J. V. Efeito de diferentes formas de congelamento sobre raízes de mandioca. **Brazilian Journal of Food Thechnology**, v. 18, n. 2, p. 93-101, 2015.

RIVA, M.; CAMPOLONGO, S.; LEVA, A. A.; MAESTRELLI, A. TORREGGIANI, D. Structure-property relationships in osmo-airdehydrated apricot cubes. **Food Research International**, v.38, n.5, p. 533-542, 2005.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. (Eds.). **Engineering Properties of Foods**. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005. cap. 7, p. 1-88.

ROCHA, R. H. C.; MENEZES, J. B.; MORAIS, E. A. M.; SILVA, G. G.; AMBRÓSIO, M. M. Q.; ALVEZ, M. Z. Uso do índice de degradação de amido na determinação da maturidade da manga ‘Tommy Atkins’. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 23, n. 2, p. 302-305, 2001.

RODRIGUES, J. P. M.; ASQUIERI, E. R. Caracterização e análise sensorial de biscoitos de polvilho elaborados com diferentes níveis de farelo de mandioca. **Ciência Rural**, v.41, n.12, p. 2196-2202, 2011.

RODRÍGUEZ, M. M.; ARBALLO, J. R.; CAMPAÑONE, L. A.; COCCONI, M. B.; PAGANO, A. M.; MASCHERONI, R. H. Osmotic Dehydration of Nectarines: Influence of the Operating Conditions and Determination of the Effective Diffusion Coefficients. **Food Bioprocess Technology**, v. 6, n. 10, p. 2708–2720, 2013.

RODRÍGUEZ, M. M.; ARBALLO, J. R.; CAMPAÑONE, L. A.; MASCHERONI, R. H. Analysis of Operating Conditions on Osmotic Dehydration of Plums (*Prunus Domestica* L.) and 3D-Numerical Determination of Effective Diffusion Coefficients. **International Journal of Food Engineering**, v.13, n.11, p. 1-13, 2017.

ROSA, G. S.; MORAES, M. A.; PINTO, L. A. A. Moisture sorption properties of chitosan. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, v.43, n.3, p.415-420, 2010.

RUBIO-ARRAEZ, S.; CAPELLA, J. V.; ORTOLLÁ, M. D.; . LUISA CASTELLÓ, M. Modelling osmotic dehydration of lemon slices using new sweeteners. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 50, n. 9, p. 2046-2051, 2015.

RUIZ-LOPEZ, I. I.; CASTILLO-ZAMUDIO, R. I.; SALGADOCERVANTES, M. A.; RODRIGUEZ-JIMENES, G.C.; GARCIA-ALVARADO, M. A. Mass transfer modelling during osmotic dehydration of hexahedral pineapple slices in limited volume solutions. **Food Bioprocess Technology**, v. 3, n. 3, p. 427–433, 2010.

RUIZ-LÓPEZ, I.I.; HUERTA-MORA, I. R.; VIVAR-VERA, M. A.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C. E.; HERMAN-LARA, E. Effect of Osmotic Dehydration on Air-Drying Characteristics of Chayote. **Drying Technology**, v. 28, n.10, p. 1201–1212, 2010.

RUIZ-LÓPEZ, I. I.; RUIZ-ESPINOSA, H.; HERMAN-LARA, E.; ZÁRATE-CASTILLO, G. Modeling of kinetics, equilibrium and distribution data of osmotically dehydration carambola (*Averrhoa carambola* L.) in sugar solutions. **Journal of Food Engineering**, v.104, n. 2, p.218-226, 2011.

SACILIK, K.; ELICIN, A. K. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. **Journal of Food Engineering**, v. 73, n.3, 281–289, 2006.

SAKHALE, B. K.; PAWAR, V. N. Studies on effect of syrup concentration and drying modes on quality of kesar mango slices. **Journal of Food Science and Engineering**, v. 1, n. 4, p. 263–270, 2011.

SÁNCHEZ, T. **Evaluación de 6000 variedades de yuca**. Cali: CIAT, 2004. (Programa de mejoramiento de yuca).

SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J.; BRANCO, I. G.; BITTENCOURT, T. U.; MUNHOZ, C. L. Influência da geometria e da temperatura na cinética de secagem de tomate (*Lycopersicum esculentum*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 31, n. 2, p. 308-312, 2011.

SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J.; CUNHA, R. L.; MENEGALLI, F. C.; HUBINGER, M. D. Evaluation of total carotenoids and ascorbic acid in osmotic pretreated guavas during convective drying. **Italian Journal of Food Science**, v. 17, n.3, p. 305-314. 2005.

SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J. S. **Goiabas desidratadas osmoticamente e secas: Avaliação de um sistema osmótico semicontínuo, da secagem e da qualidade**. 2005. 157f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SANKAT, C. K.; CASTAIGNE, F.; MAHARAJ, R. The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 3, n. 2, p. 123-135, 1996.

SANTAMARIA, H.; DURANGO, N.; BULA, A.; SANJUAN, M. Non dimensional analysis of cassava transient drying in packing beds. **Latin American Applied Research**, v.41, n.1, p.87-93, 2011.

SANTOS, F. S. A.; FIGUEIRÊDO, QUEIROZ, A. J. M. Isotermas de Adsorção de umidade de farinhas de mandioca temperadas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 6, n. 2, p. 149-155, 2004.

SANTOS, J. C.; SOUZA, D. C. L.; SANTANA, M. M.; CASTRO, A. A.; SILVA, G. F. Estudo da Cinética de secagem de batata-doce (*Ipomoea batatas*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.14, n.4, p.323-328, 2012.

SANTOS, M. S. S.; LIMA, J. J.; PETKOWICZ, C. L. O.; CANDIDO, L. M. B. Chemical characterization and evaluation of the antioxidante potential of gabioba jam (*Campomanesia xanthocarpa* Berg). **Acta Scientiarum**, v. 35, n.1, p. 73-82, 2013.

SANTOS, P.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; SILVA, F. T. C.; FURTADO, G. F. Influência de pré-tratamentos na cinética de secagem em diferentes temperaturas de banana da variedade terra (*Musa sapientum*, Linneo). **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 4, n. 2, p. 218-234, 2010.

SARNO, R. M.; LEVY, R. B.; BANDONI, D. H.; MONTEIRO, C. A. Estimativa de consumo de sódio pela população brasileira, 2008-2009. **Revista Saúde Pública**, v.47, n. 3, p. 571-578, 2013.

SCHMIDT, C. G.; SALAS-MELLADO, M. Influência da ação das enzimas Alcalase e Flavourzyme no grau de hidrólise das proteínas de carne de frango. **Química Nova**, v.32, n.5. p.1144-1150, 2009.

SEAB – Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Departamento de Economia Rural. **Análise da Conjuntura Agropecuária – Mandioca Safra 2014/2015**. 18p.

SEAB – Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Departamento de Economia Rural. **Análise da Conjuntura Agropecuária – Mandioca Safra 2015/2016**. 20p.

SEGUÍ, L.; FITO, P. J.; FITO, P. Understanding osmotic dehydration of tissue structured foods by means of a cellular approach. **Journal of Food Engineering**, v. 110, n. 2, p. 240-247, 2012.

SHAMAEI, S.; EMAM-DJOMEH, Z.; MOINI, S. Modeling and optimization of ultrasound assisted osmotic dehydration of cranberry using response surface methodology. **Journal Agriculture Science Technology**, v. 14, n. 20, p.1523–1534, 2012.

SILVA, C. D. M.; PIRES, C. R. F.; LIMA, J. P.; PEREIRA, A. S.; SILVA, C.A. Desidratação osmótica para obtenção de cagaita passa. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 2, n.4: p.226-233, 2015.

SILVA, P. A.; ASSIS, G. T.; CARVALHO, A. V.; SIMÕES, M. G. Desenvolvimento e caracterização de cereal matinal extrudado de mandioca enriquecido com concentrado proteico de soro de leite. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 14, n. 4, p. 260-266, 2011.

SILVA, P. A.; CUNHA, R. L.; LOPES, A. S.; PENA, R. S. Caracterização de farinhas de tapioca produzidas no estado do Pará. **Ciencia Rural**, v.43, n. 1, p. 185-191, 2013.

SILVA, P. A.; MELO, W. S.; CUNHA, R. L.; CUNHA, E. F.M.; LOPES, A. S.; PENA, R. S. Obtenção e caracterização das féculas de três variedades de mandioca produzidas no estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 19, 2012, Rio de Janeiro. **Anais... Búzios**. COBEQ, 2012a.

SILVA-JÚNIOR, A. A.; ALBUQUERQUE, S. S. M. C.; ANDRADE, S. A. C.; VASCONCELOS, M. A. S.; BARROS, R. A. Análise da influência da forma geométrica na desidratação osmótica do tomate verde em solução de sal e vinagre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 50, 2010, Mato Grosso. **Anais... Cuiabá**. CBQ, 2010. P. 1.

SILVA JÚNIOR, A. F.; AIRES, J. E. F.; CLEIDE, K. L. C. A. F. A.; SILVA, M. D. P. S.; FARIAS, V. S. O. Effects of Salt Concentration on Osmotic Dehydration of Green Bean. **Journal of Agricultural Studies**, v.3, n.1, p.60-78, 2015.

SILVA JÚNIOR, A. F. S.; 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, n. 6, p. 1313–1325, 2017.

SILVA, L. M. M.; CORDEIRO DE SOUSA, F.; PIANCÓ DE SOUSA, E.; MOREIRA, E. R.; MATA, C.; DUARTE, M. E. M. Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu. **Brazilian Journal of food Technology**, v. 17, n. 4, p. 310-318, 2014.

SILVA, M. A. C.; SILVA, Z. E.; MARIANI, V. C.; DARCHE, S.. Mass transfer during the osmotic dehydration of West Indian cherry. *LWT - Food Science and Technology*, v. 45, n. 2, p. 246-252, 2012b.

SILVEIRA, M. S. **Efeitos da desidratação osmótica e desidratação osmótica assistida por ultrassom na secagem convectiva de cenoura (*Daucus carota* L.)**. 2014. 100f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

SINGH, B.; GUPTA, A. K. Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, v.79, n.2, p. 459-470, 2007.

SINGH, B.; PANESAR, P.S.; NANDA, V.; KENNEDY, J.F. Optimisation of Osmotic Dehydration Process of Carrot Cubes in Mixtures of Sucrose and Sodium Chloride Solutions. *Food Chemistry*, v.123, n.3, p. 590–600, 2010.

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, n.8, p. 1361-1370, 2008.

SINGH, B.; SINGH HATHAN, B. Convective dehydration kinetics and quality evaluation of osmo-convective dried beetroot candy. *Italian Journal of Food Science*, v.28, n.4, p. 669-682, 2016.

SINGH, N.; SINGH, J.; KAUR, L.; SODHI, N. S.; GILL, B. S. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, v.81, n. 2, p.219-231, 2003.

SIQUEIRA, L. P. **Desidratação osmótica como alternativa tecnológica para a preservação do gengibre**. 2014. 109f. Tese (Doutorado em Nutrição) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Determination of the volumetric shrinkage in jatropha seeds during drying. *Acta Scientiarum*, v. 34, n. 3, p. 231-238, 2012.

SIVIERO, A.; PESSOA, J.; LESSA, L. S. Avaliação de genótipos de mandioca da reserva extrativista cazumbá-iracema, Acre. *Revista Raízes e Amidos Tropicais*, v. 8, p.57-64, 2012.

SMANIOTTO, T. A. S.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; SIQUEIRA, V. C.; SOUSA, K. A. Ajuste de modelos matemáticos a contração volumétrica unitária e da massa dos grãos de soja. *Revista Agro@mbiente On-line*, v. 9, n. 4, p. 397-404, 2015.

SOARES, R.M.D, **Caracterização parcial de amido em cultivares brasileiros de cevada (*Hordeum vulgare* L.)**. 2003. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

SOURAKI, B. A.; BAYAT, A. G. Mathematical modeling of moisture and solute diffusion in the cylindrical green bean during osmotic dehydration in salt solution. *Food and Bioproducts Processing*, v. 90, n. 1, p. 64-71, 2012.

SOURAKI, B.A.; GHAVAMI, M.; TONDRO, H. Correction of Moisture and Sucrose Effective Diffusivities for Shrinkage During Osmotic Dehydration of Apple in Sucrose Solution. **Food and Bioproducts Processing**, v. 92, n.1, p. 1–8, 2014.

SOUZA, D, S, S.; PIMENTEL, J. D. R.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. M. Avaliação da Influência de Variáveis de Processo Sobre a Cinética de Desidratação Osmótica da Polpa de Abacate (*Persea americana* L.). **UNOPAR Científica Ciências Biológicas e da Saúde**, v. 14, n. 1, p. 31-35, 2012.

SOUZA, T. C. L.; SOUZA, H. A.; PENA, R. S. A rapid method to obtaining moisture sorption isotherms of a starchy product. **Starch/Stärke**, v. 65, n. 56, p. 433-436, 2013.

SREEJA, V.G.; NAGAHARA, N.; LI, Q.; MINAMI, M. New aspects in pathogenesis of konzo: neural cell damage directly caused by linamarin contained in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **British Journal of Nutrition**, v. 90, n. 2, p. 467-472, 2003.

SRITONGTAE, B.; MAHAWANICH, T.; DUANGMAL, K. Drying of osmosed cantaloupe: Effect of polyols on drying and water mobility. **Drying Technology**, v.29, n. 5, p. 527-535, 2011.

STATSOFT. **Statistica for windows**, Tulsa, USA, 1997.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design**. N. York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

SUTAR, N.; SUTAR, P. P. Developments in osmotic dehydration of fruits and vegetable: A review. **Trends in Post Harvest Technology**, v. 1, n.1, p. 20–36. 2013.

SUTAR, P. P.; PRASAD, S. Modeling Mass Transfer Kinetics and Mass Diffusivity During Osmotic Dehydration of Blanched Carrots. **International Journal of Food Engineering**, v. 7, n. 4, p. 1-20, 2011.

TACO. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos**. 4 ed. revisada e ampliada. Campinas, SP: UNICAMP, 2011. Disponível em http://www.unicamp.br/nepa/taco/contar/taco_4_edicao_ampliada_e_revisada.pdf?arquivo=taco_4-versao_ampliada_e_revisada.pdf. Acesso em 03 de fevereiro de 2017

THARANATHAN, R.N. Food-derived carbohydrates – Structural complexity and functional diversity. **Critical Reviews in Biotechnology**, v.22, n.1, p.65-84, 2002.

TOGRUL, H. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. **Journal of Food Engineering**, v. 71, p. 311–323, 2005.

TOĞRUL, I. T.; İSPIR, A. Equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of apricot. **Food Bioprod Process**, v.86, n.4, p. 254-267, 2008.

TOLDRÁ F. **Handbook of Fermented Meat and Poultry**. 2. ed. Hoboken: Wiley Blackwell, 2014.

TONON, R. V.; BARONI, A. F.; HUBINGER, M. D. Estudo da Desidratação Osmótica de Tomate em Soluções Ternárias pela Metodologia de Superfície de Resposta. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 3, p. 715-723, 2006.

TORREZAN, R. **Preservação de polpa de goiaba por métodos combinados**. 1996. 211f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos)–Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

TORTOE, C. A review of osmo-dehydration for food industry. **African Journal of Food Science**, v. 4, n. 6, p. 303–324, 2010.

TSAMI, E.; MARINOS KOURIS, D.; MAROULIS, Z. Water sorption isotherms of raisins, currants, figs, prunes and apricots. **Journal of Food Science**, v.55, n.6, p. 1594–1597, 1990.

TUNDE-AKINTUNDE, T. Y. Mathematical Modelling of Thin Layer Sun and Solar Drying of Cassava Chips. **International Journal of Food Engineering**, v.6, n.6, p.1-20, 2010.

UDOMKUN, P.; ARGYROPOULOS, D.; NAGLE, M.; MAHAYOTHEE, B.; MÜLLER, J. Sorption behaviour of papayas as affected by compositional and structural alterations from osmotic pretreatment and drying. **Journal of Food Engineering**, v. 157, p. 14-23, 2015.

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, n.2, p.320–326, 2011.

URQUHART, A. R. Sorption of water by cellulose and starch. In J. HONEYMAN (Ed.), **Recent advances in the chemistry of cellulose and starch**. London: Heywood & Company, p. 240–264, 1959.

VALDUGA, E.; TOMICKI, L.; WITSCHINSKI, F.; COLET, R.; PERUZZOLO, M., CENI, G.C. Avaliação da aceitabilidade e dos componentes minerais de diferentes cultivares de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) após a cocção. **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v. 22, n. 2, p. 205-210, 2011.

Van Den BERG, C.; BRUIN, S. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In: L. B. ROCKLAND; G. F. STEWART (Eds.), **Water activity: influences on food quality**, New York: Academic Press, p. 1-61, 1981.

VASCONCELOS, J. I. L. A. **Desidratação osmótica de Figo da Índia (*Opuntia ficus indica*)**. 2010. 76f. Dissertação (Mestrado em ciência e Tecnologia de Alimentos), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.

VÁZQUEZ-VILA, M. J.; CHENLO-ROMERO, F.; MOREIRA-MARTÍNEZ, R.; PACIOS-PENELAS, B. Dehydration kinetics of carrots (*Daucus carota* L.) in osmotic and air convective drying processes. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.7, n.4, p. 869-875, 2009.

VERMEULEN, A.; MARVIG, C. L.; DAELMAN, J.; XHAFERI, R.; NIELSEN, D. S.; DEVLIEGHERE, F. Strategies to increase the stability of intermediate moisture foods towards *Zygosaccharomyces rouxii*: the effect of temperature, ethanol, pH and water activity, with or without the influence of organic acids. **Food Microbiology**, v. 45, Part A, p. 119-125, 2014.

VIEIRA, G. S.; PEREIRA, L. M.; HUBINGER, M. D. Optimisation of osmotic dehydration process of guavas by response surface methodology and desirability function. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 47, n. 1, p. 132–140, 2012.

VIEIRA, J. C.; MONTENEGRO, F. M.; LOPES, A. S.; PENA, R. S. Qualidade física e sensorial de biscoitos doces com fécula de mandioca. **Ciência Rural**, v.40, n.12, p.2574-2579, 2010.

VIEIRA, L. J.; TAVARES FILHO L.F.Q.; SOUZA, F.V.D.; ALVES A.C.C; OLIVEIRA, E.J. Development of interspecific hybrids of *Manihot esculenta* and paternity analysis with molecular markers. **Journal of Agricultural Science**, v. 151, n. 6, p. 849-861, 2013.

VILHALVA, D. A. A.; SOARES JÚNIOR, M. S.; CALIARI, M.; SILVA, F. A. Secagem convencional de casca de mandioca proveniente de resíduos de indústria de amido. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, n.3, p.331-339, 2012.

WANG, X.; GAO, Z.; XIAO, H.; WANG, Y.; BAI, J. Enhanced mass transfer of osmotic dehydration and changes in microstructure of pickled salted eff under pulsed pressure. **Journal of Food Engineering**, v. 117, n.1, p. 141-150, 2013.

WANG, C.; LI, L.; LI, Z.; LIU, C.; CHEN, M. Optimization of osmotic dehydration of *Toona sinensis* leaves using response surface methodology. **International Journal of Food Engineering**, v.4, n.6, p.1-10, 2008.

WEISSER,H.; WEBER,J.; LONCIN, M. Water vapor sorption isotherms of sugar substitutes in the temperature range 25 to 80°C. **Institut Zeitschrift Lebens Verfahrens**, v.33, p. 89-97, 1982.

WÓJCIAK, K. M.; KRAJMAS, P.; SOLSKA, E.; DOLATOWSKI, Z. J. Application of acid whey and set milk to marinate beef with reference to quality parameters and product safety. **Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria**, v. 14, n. 4, p. 293–302, 2015.

YADAV, B. S.; YADAV, R. B.; JATAIN, M. Optimization of osmotic dehydration conditions of peach slices in sucrose solution using response surface methodology. **Journal Food Science Technology**, v. 49, n. 5. p. 547–555, 2012.

YADAV, A. K.; SINGH, S.V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review. **Journal Food Science Technology**, v. 51, n.9, 1654–1673, 2014.

YADOLLAHINIA, A.; JAHANGIRI, M. Shrinkage of potato slice during drying. **Journal Food Engineering**, v. 94, n.1, p.52–58, 2009.

YAN, H.; CAI, B.; CHENG, Y.; GUO, G.; LI, D.; YAO, X.; NI, X.; PHILLIPS, G. O.; FANG, Y.; JIANG, F. Mechanism of lowering water activity of konjac glucomannan and its derivatives. **Food Hydrocolloids**, v.26,n.2, p.383-388, 2012.

YANNIOTIS, S.; BLAHOVEC, J. Model analysis of sorption isotherms. **LWT - Food Science and Technology**, v.42, n.10, p.1688-1695, 2009.

YEOMANS, J. S.; YANG, X. Determining optimal osmotic drying parameters for papaya using the firefly algorithm. **Lecture Notes in Management Science**, v. 6, p. 32–39, p. 32–39, 2014.

YUAN, Y.; TAN, L.; XU, Y.; DONG, J.; ZHAO, Y.; YUAN, Y. Optimization of Processing Parameters for Lettuce Vacuum Osmotic Dehydration Using Response Surface Methodology. **Polish Journal of food and Nutrition Sciences**, v. 68, n. 1, p. 15-23, 2018.

ZAPATA, J. E.; RESTREPO-SUÁREZ, A. M.; ARIAS, L. Cinética de la Deshidratación Osmótica del Aguacate (*Persea americana*), y Optimización del Color por Medio de Superficies de Respuesta. **Información Tecnológica**, v. 27, n.4, p.17-32, 2016.

ZOU, K. ; TENG, J.; HUANG, L.; DAI, X.; WEI, B. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. **Food Science and Technology**, v.51, n.1 p.253-259, 2013.

ZÚÑIGA, R. N.; PEDRESCHI, F. Study of the pseudo-equilibrium during osmotic dehydration of apples and its effect on the estimation of water and sucrose effective diffusivity coefficients. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, n. 7, p. 2717-2727, 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Os Resultados experimentais para perda de massa (PM), atividade de água (A_w), concentração de cloreto de sódio (C_{NaCl}) e concentração de sacarose (C_{Sac}) dos ensaios de desidratação osmótica dos cubos de mandioca em soluções de sacarose e cloreto de sódio são apresentados na Tabela A1.

Tabela A1 – Valores experimentais das variáveis respostas perda de massa, atividade de água, concentração de cloreto de sódio e concentração de sacarose

Ensaio	Tratamentos				Variáveis respostas			
	T (°C)	C (% p/p)	t (min.)	Sal (% p/p)	PM ¹ (%)	A_w ²	C_{NaCl} ³ (%)	C_{Sac} ⁴ (%)
1	30(-1)	34(-1)	100(-1)	5(-1)	9,691	0,938	0,547	6,085
2	52(+1)	34(-1)	100(-1)	5(-1)	12,732	0,923	1,297	5,706
3	30(-1)	56(+1)	100(-1)	5(-1)	22,220	0,923	0,951	3,478
4	52(+1)	56(+1)	100(-1)	5(-1)	24,773	0,913	1,486	10,565
5	30(-1)	34(-1)	160(+1)	5(-1)	12,772	0,918	0,758	5,862
6	52(+1)	34(-1)	160(+1)	5(-1)	16,021	0,914	1,646	7,094
7	30(-1)	56(+1)	160(+1)	5(-1)	23,829	0,914	0,846	3,240
8	52(+1)	56(+1)	160(+1)	5(-1)	26,387	0,890	1,568	10,599
9	30(-1)	34(-1)	100(-1)	15(+1)	10,719	0,919	3,048	5,708
10	52(+1)	34(-1)	100(-1)	15(+1)	13,555	0,896	4,505	5,035
11	30(-1)	56(+1)	100(-1)	15(+1)	25,135	0,890	3,508	6,283
12	52(+1)	56(+1)	100(-1)	15(+1)	26,848	0,874	4,323	9,215
13	30(-1)	34(-1)	160(+1)	15(+1)	19,412	0,911	2,251	5,924
14	52(+1)	34(-1)	160(+1)	15(+1)	16,066	0,866	5,625	6,068
15	30(-1)	56(+1)	160(+1)	15(+1)	27,278	0,844	4,052	8,653
16	52(+1)	56(+1)	160(+1)	15(+1)	29,903	0,853	4,980	8,965
17	19(-2)	45(0)	130(0)	10(0)	18,961	0,920	1,577	2,234
18	63(+2)	45(0)	130(0)	10(0)	18,404	0,851	2,351	3,825
19	41(0)	23(-2)	130(0)	10(0)	12,406	0,923	2,486	5,487
20	41(0)	67(+2)	130(0)	10(0)	25,324	0,844	2,016	10,014
21	41(0)	45(0)	70(-2)	10(0)	14,796	0,913	2,041	7,166
22	41(0)	45(0)	190(+2)	10(0)	18,948	0,854	2,724	8,606
23	41(0)	45(0)	130(0)	0(-2)	10,949	0,941	0,079	9,767
24	41(0)	45(0)	130(0)	20(+2)	18,106	0,810	5,278	6,254
25	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	15,265	0,905	2,558	9,615
26	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	14,320	0,881	2,246	9,545
27	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	15,816	0,908	2,343	8,268
28	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	16,096	0,913	2,298	9,324
29	41(0)	45(0)	130(0)	10(0)	15,382	0,894	1,885	8,744

Notações: ¹PM= perda de massa, ² A_w = atividade de água, ³ C_{NaCl} = concentração de cloreto de sódio, ⁴ C_{Sac} = concentração de sacarose.

Fonte: o próprio autor (2017).

Perda de massa

Os resultados da análise estatística obtidos a partir dos dados experimentais de perda de massa na desidratação osmótica de cubos de mandioca em soluções ternárias encontram-se na Tabela A.2 Os efeitos dos fatores são apresentados através dos modelos estatísticos de ajuste linear e quadrático, representados pelas notações L e Q, respectivamente. Os valores em negrito presentes nas tabelas dos efeitos estimados representam que eles são significativos a 5% de significância ($p < 0,05$) ou 95% de confiança.

Tabela A.2 – Efeito estimado, erro, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para perda de massa, calculado pelo Erro puro

Variável	Efeito	Erro puro	t(4)	P
(1)T L	2,344892	0,138476	16,933593	0,000071
T (Q)	-0,531252	0,133182	-3,988930	0,016279
(2)C (L)	4,450970	0,138476	32,142601	0,000006
C (Q)	0,102450	0,133182	0,769252	0,484650
(3) t(L)	0,145255	0,138476	1,048955	0,353394
t (Q)	0,245373	0,133182	1,842394	0,139211
(4) NaCl(L)	2,249900	0,138476	16,247608	0,000084
NaCl(Q)	0,605545	0,133182	4,546758	0,010443
1L x 2L	2,644251	0,169597	15,591335	0,000099
1L x 3L	-0,910910	0,169597	-5,371009	0,005803
1L x 4L	-1,698453	0,169597	-10,014613	0,000559
2L x 3L	-0,885453	0,169597	-5,220910	0,006423
2L x 4L	0,358376	0,169597	2,113098	0,102133
3L x 4L	-0,538846	0,169597	-3,177206	0,033625

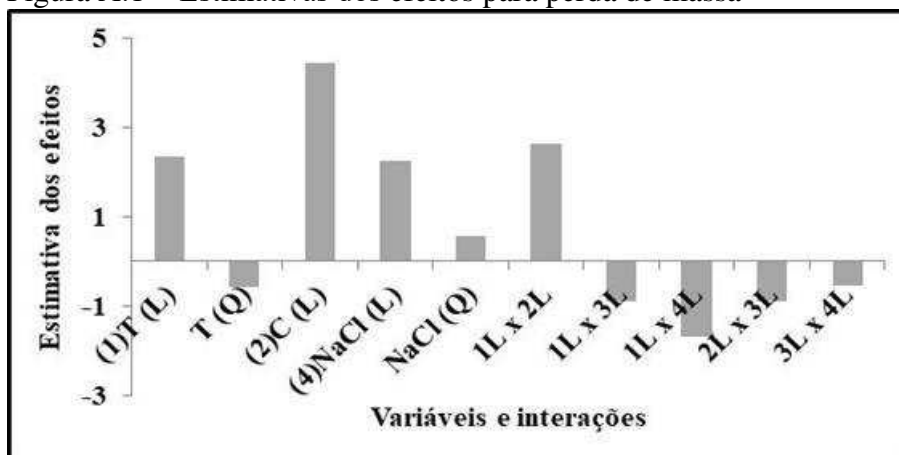
Fonte: o próprio autor (2017).

O efeito medido de uma variável representa a sua magnitude de influência sobre a resposta. Assim, quanto maior for o seu valor, maior será a sua influência sobre a resposta. Efeito positivo eleva o valor da variável resposta e no caso contrário a reduz.

Analisando os resultados obtidos na Tabela A.2, observa-se que os efeitos lineares e quadráticos de temperatura e concentração de cloreto de sódio foram significativos, assim como o efeito da concentração de soluto linear. As interações entre temperatura e concentração de soluto, temperatura e tempo, temperatura e concentração de cloreto de sódio, concentração de soluto e tempo, e tempo e concentração de cloreto de sódio foram significativas, exceto a interação entre tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio.

Na Figura A.1 são apresentados os efeitos significativos de cada parâmetro e suas interações na forma de um diagrama de barras para comparar suas respectivas grandezas para perda de massa.

Figura A.1 – Estimativas dos efeitos para perda de massa



Notação: CNaCl = concentração de cloreto de sódio, T = temperatura, t = tempo, C= concentração de soluto, L= modelo matemático linear, Q = modelo matemático quadrático.

Fonte: o próprio autor (2017).

Através do histograma da Figura A.1, verifica-se que a concentração de soluto foi a variável que mais influenciou na perda de massa, apresentando efeito linear positivo. O efeito da concentração de soluto foi aproximadamente duas vezes maior que os efeitos lineares da temperatura e da concentração de cloreto de sódio. Observa-se que, quanto maior o efeito linear da concentração de soluto presente na solução osmótica, maior será a perda de massa no processo. Os efeitos das interações que possuem o tempo de imersão foram todos negativos, significando que o aumento destes promove decréscimo da perda de massa.

Eliminando-se os fatores não-significativos, verificou-se a significância da regressão e da falta de ajuste em relação a 95% de confiança ($p < 0,05$), através do teste F, na análise de variância. Na Tabela A.3, encontram-se os valores calculados e tabelados de F. Este procedimento foi repetido para todas as demais respostas em estudo e discutidos nos próximos itens.

Conforme os resultados apresentados na Tabela A.3, observa-se que o modelo foi preditivo, apresentando regressão e falta de ajuste significativas ao nível de 95% de confiança, com o valor de F calculado cinco vezes maior que o de F tabelado. O coeficiente de determinação (R^2) para o modelo ajustado foi de 0,86661, indicando que o modelo explicou 86,66% da variação dos dados observados.

Tabela A.3 – Análise de variância do modelo ajustado para perda de massa

Perda de massa					
Fonte	SQ ¹	GL ²	MQ ³	Fcalculado	Ftabelado ⁴
Regressão	234,5272	10	23,4527	11,6945	2,41
Resíduo	36,0981	18	2,0054	-	-
Falta de ajuste	35,6378	14	2,5456	22,1251	5,43
Erro puro	0,4602	4	0,1151	-	-
Total	270,6253	28	-	R ² = 0,86661	

Notações: ¹SQ = soma quadrática, ²GL = grau de liberdade, ³MQ = média quadrática, ⁴Valores tabelados de F a p < 0,05.

Fonte: o próprio autor (2017).

O modelo proposto para representar a perda de massa (PM) na desidratação osmótica de cubos de mandioca, para faixa de estudo das variáveis do planejamento experimental aplicado é dado a seguir:

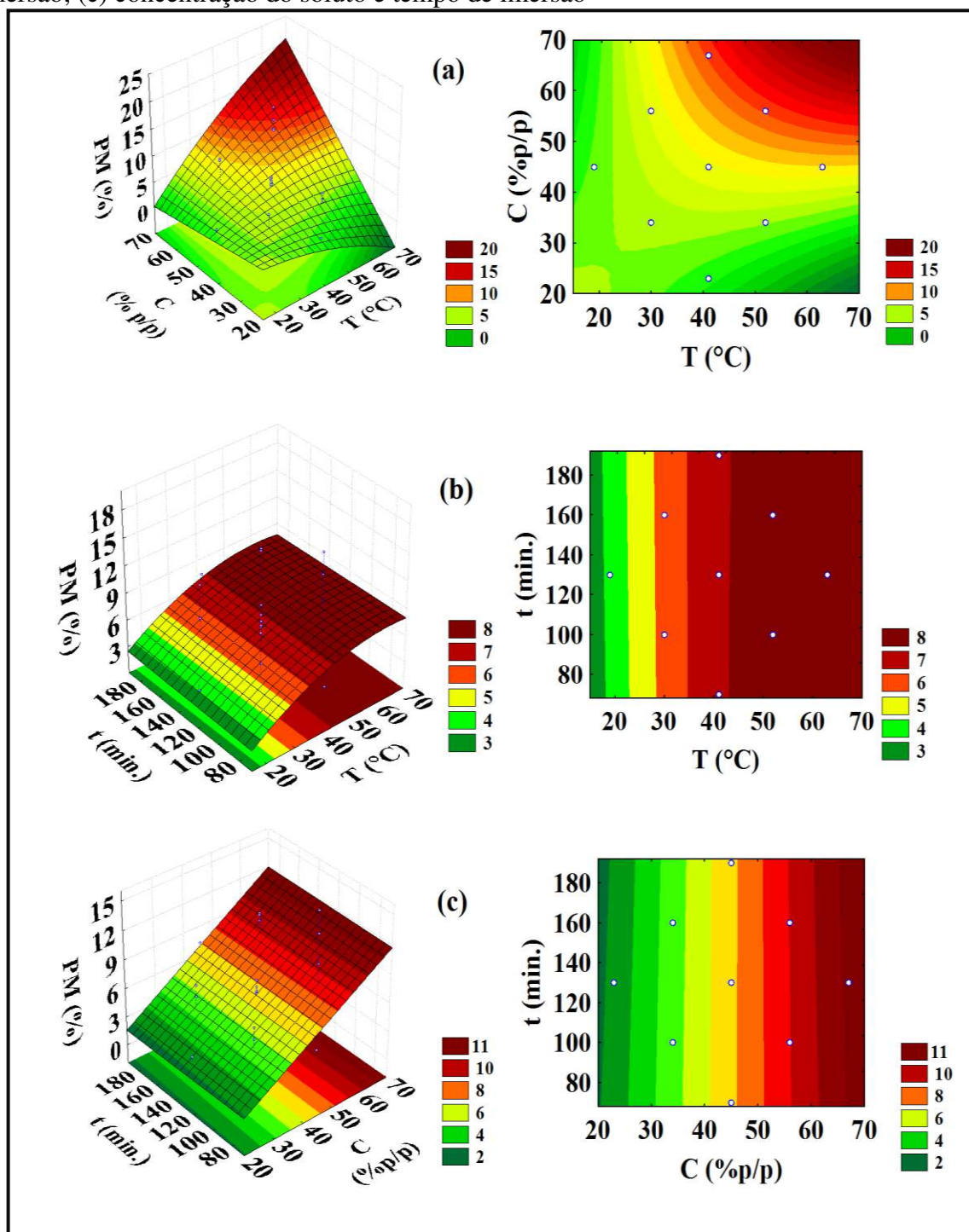
$$PM = 6,788 + 1,172T - 2,933T^2 + 2,225C + 1,125NaCl + 0,275NaCl^2 + 1,322TC - 0,455Tt - 0,849TNaCl - 0,442Ct - 0,269TNaCl \quad (1)$$

onde T é a temperatura (°C); $NaCl$ é a concentração de cloreto de sódio (%); t é o tempo de imersão (min), e C é a concentração da solução osmótica (%).

As Figuras A.2 e A.3 mostram as superfícies de resposta e as curvas de nível obtidas através do modelo preditivo da perda de massa para as variáveis de estudo (temperatura, concentração da solução osmótica, tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio). Os pontos presentes nesses diagramas representam os diferentes ensaios experimentais do planejamento experimental. A região circunscrita por esses pontos corresponde a faixa de valores dos fatores de estudo temperatura, concentração de soluto, tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio neles utilizados (19 a 63 °C, 23 a 67% p/p de soluto, 70 a 190 min e 0 a 20% p/p de NaCl). Extrapolações externas a essa região não são confiáveis e consideradas inválidas. Essa região de estudo foi utilizada para identificar as faixas otimizadas de todas as variáveis respostas, parâmetros de avaliação da operação de desidratação osmótica dos cubos de mandioca.

A Figura A.2 apresenta esses diagramas para a relação da concentração de soluto com a temperatura e o tempo de operação.

Figura A.2 – Superfícies de respostas e curvas de níveis para perda de massa do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração da solução osmótica; (b) temperatura e tempo de imersão; (c) concentração do soluto e tempo de imersão

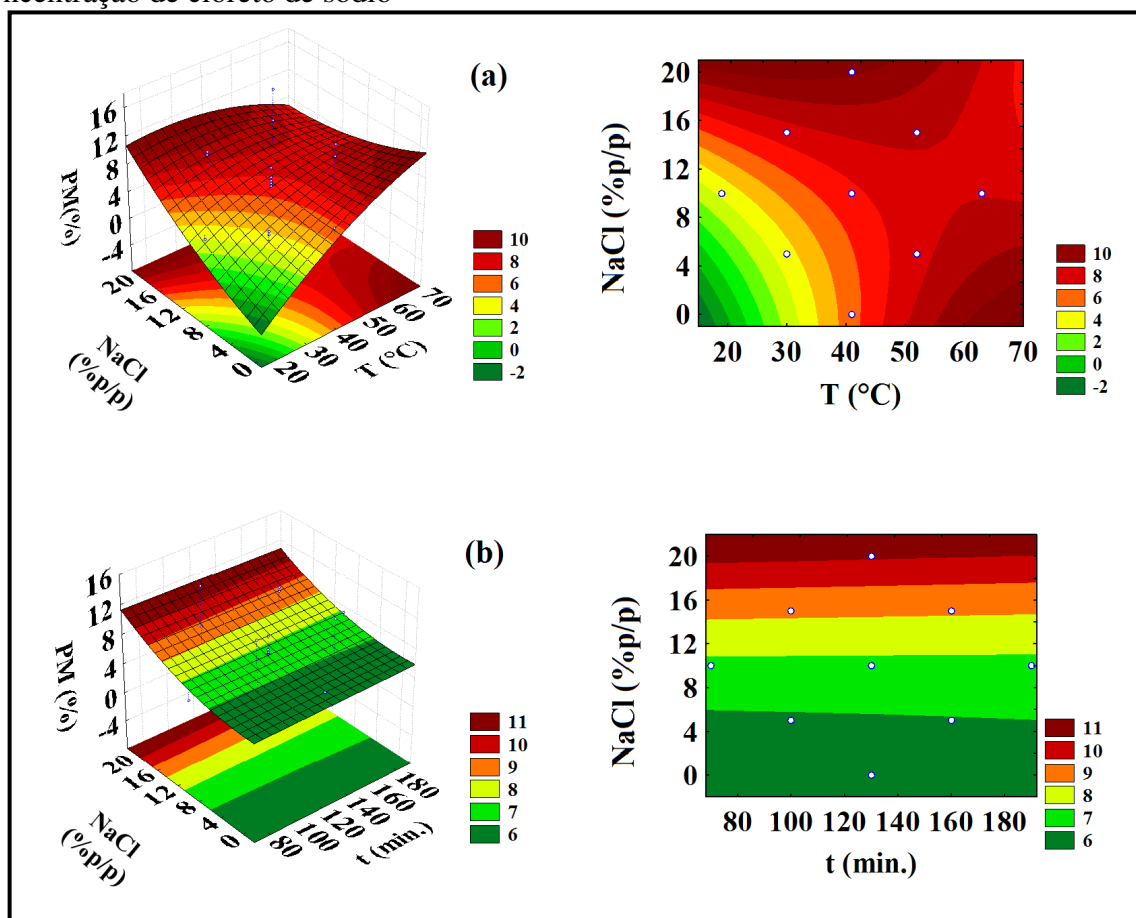


Fonte: o próprio autor (2017).

Na Figura A.2 (a) observa-se a influência acentuada da temperatura e da concentração sobre a perda de massa, mostrando que altos níveis desta resposta foram alcançados quando utilizadas concentrações na faixa de 56 a 67% p/p, e temperaturas de 41 a 52°C. A variável independente tempo de imersão, não mostrou nenhuma influência sobre a resposta perda de

massa. O emprego de tempos longos ou curtos não alterou a perda de massa, conforme mostrado nas Figuras A.2 (b) e (c). As superfícies de resposta e as curvas de nível para a perda de massa das relações entre concentração de sal e a temperatura e o tempo de operação estão na Figura A.3.

Figura A.3 – Superfícies de respostas e curvas de níveis para perda de massa do DCCR relacionando: (a) temperatura e concentração de cloreto de sódio; (b) tempo de imersão e concentração de cloreto de sódio



Fonte: o próprio autor (2017).

Observa-se na Figura A.3 (a) que altos valores de perda de massa foram alcançados em temperaturas na faixa de 30 a 63°C com concentrações de cloreto de sódio na faixa de 5 a 20%p/p. O tempo não influenciou no processo segundo a Figura A.3 (b). As informações das Figuras A.2 e A.3 reafirmam os relatos da literatura sobre a importância da concentração de soluto e da temperatura para promover a perda de massa do material. Nesse caso, o aumento da perda de massa ficou restrito a um pequeno intervalo de valores de temperatura e concentração de soluto. No entanto a perda de massa aumentou com o aumento da temperatura e da concentração de cloreto de sódio. Isso presume a maior dependência da sacarose com a temperatura para o incremento da transferência mássica de umidade do

material para o meio. É necessário que as membranas celulares do material aumentem sua permeabilidade para que ocorra a migração de sacarose para ele, cujo efeito pode ser obtido através do aumento da temperatura do meio. Caso contrário, o acúmulo de moléculas de açúcar na superfície da célula forma uma barreira à transferência de massa e a perda de umidade do material. Porém isso não acontece com a molécula de sal, pois o mesmo rompe a célula, sem precisar muito da influência de fatores externos, tal como a temperatura. O sal rompe as membranas celulares do material promovendo um acentuado gradiente de concentração mássico e a maior remoção de água do material para o meio concentrado. (UDDIN et al., 2004; TSAMO et al., 2005).

Perda de umidade

Na Tabela A.4 encontram-se os resultados obtidos da análise estatística para variável perda de umidade dos ensaios experimentais de desidratação osmótica de cubos de mandioca em soluções ternárias.

Tabela A.4 – Efeito estimado, erro, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para perda de umidade, calculado pelo Erro puro

Variável	Efeito	Erro puro	t(4)	P
(1)T L	1,176398	0,276875	4,248841	0,013170
T (Q)	2,519137	0,266290	9,460132	0,000696
(2)C (L)	10,103386	0,276875	36,490787	0,000003
C (Q)	2,610450	0,266290	9,803040	0,000607
(3)t (L)	2,858171	0,276875	10,322967	0,000497
t (Q)	1,613844	0,266290	6,060480	0,003742
(4)NaCl (L)	2,900634	0,276875	10,476330	0,000469
NaCl (Q)	0,441764	0,266290	1,658959	0,172463
1L x 2L	0,458525	0,339101	1,352179	0,247713
1L x 3L	-0,631989	0,339101	-1,863717	0,135815
1L x 4L	-0,946707	0,339101	-2,791813	0,049221
2L x 3L	-1,143966	0,339101	-3,373524	0,027952
2L x 4L	0,427635	0,339101	1,261083	0,275817
3L x 4L	0,851248	0,339101	2,510308	0,066036

Fonte: o próprio autor (2017).

Observando os resultados obtidos na Tabela A.4, percebe-se que o efeito quadrático de concentração de cloreto de sódio e as interações entre temperatura e concentração de soluto, temperatura e tempo, concentração de soluto e concentração de cloreto de sódio e tempo e

concentração de cloreto de sódio, não foram significativos e desconsiderados no modelo preditivo estatístico para a perda de umidade ($p > 0,05$).

Para a zona de estudo das variáveis do planejamento experimental aplicado, sugeriu-se o seguinte modelo que demonstra a perda de umidade (PU) na desidratação osmótica de cubos de mandioca:

$$PU = 1,566 + 0,588T - 1,218T^2 + 5,052C + 1,263C^2 + 1,429t + 0,765t^2 + 1,450NaCl - 0,473TNaCl - 0,572C \quad (2)$$

onde T = temperatura ($^{\circ}C$), $NaCl$ = concentração de cloreto de sódio (%), t = tempo de imersão (min), e C = concentração da solução osmótica (%).

Ganho de sólidos totais

Os resultados dos efeitos das variáveis de estudo para o ganho de sólidos do material obtido nos ensaios de desidratação osmótica de cubos de mandioca em soluções ternárias encontram-se na Tabela A.5.

Tabela A.5 – Efeito estimado, erro, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para ganho de sólidos totais, calculado pelo Erro puro

Variável	Efeito	Erro puro	t(4)	P
(1)T L	-1,168494	0,155227	-7,527653	0,001668
T (Q)	3,050389	0,149292	20,432314	0,000034
(2)C (L)	5,652415	0,155227	36,413902	0,000003
C (Q)	2,507999	0,149292	16,799243	0,000074
(3)t (L)	2,712917	0,155227	17,477108	0,000063
t (Q)	1,368471	0,149292	9,166380	0,000786
(4)NaCl (L)	0,650734	0,155227	4,192149	0,013783
NaCl (Q)	-0,163781	0,149292	-1,097048	0,334229
1L x 2L	-2,185725	0,190113	-11,496961	0,000327
1L x 3L	0,278921	0,190113	1,467129	0,216239
1L x 4L	0,751746	0,190113	3,954198	0,016759
2L x 3L	-0,258513	0,190113	-1,359784	0,245497
2L x 4L	0,069259	0,190113	0,364301	0,734074
3L x 4L	1,390094	0,190113	7,311927	0,001861

Fonte: o próprio autor (2017).

Conforme os resultados mostrados na Tabela A.5, a maioria das variáveis de estudo e suas interações apresentaram significância estatística ao nível do teste ($p < 0,05$). Apenas a

concentração de cloreto de sódio (Q) e os efeitos de interação entre temperatura e tempo de imersão, concentração de soluto e tempo de imersão, e concentração de soluto e concentração de cloreto de sódio, não foram significativos.

O modelo gerado na desidratação osmótica de cubos de mandioca simbolizando o ganho de sólidos totais (GST) para faixa de estudo das variáveis do planejamento experimental aplicado foi:

$$GST=8,681-0,584T-1,541T^2+2,826C+1,269C^2+1,356t+0,700t^2+0,325NaCl-1,093TC+0,376TNaCl+0,695tNaCl \quad (3)$$

onde T = temperatura ($^{\circ}C$), $NaCl$ = concentração de cloreto de sódio (%), t = tempo de imersão (min), e C = concentração da solução osmótica (%).

Redução de atividade de água

A Tabela A.6 apresenta os resultados da análise estatística para redução de atividade de água dos ensaios experimentais de desidratação osmótica de cubos de mandioca em soluções ternárias.

Tabela A.6 – Efeito estimado, erro, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para redução de atividade de água, calculado pelo Erro puro

Variável	Efeito	Erro puro	t(4)	P
(1)T L	4,120110	0,372421	11,063030	0,000380
T (Q)	-0,507979	0,358183	-1,418208	0,229115
(2)C (L)	6,759520	0,372421	18,150190	0,000054
C (Q)	0,285956	0,358183	0,798350	0,469382
(3)t (L)	2,277537	0,372421	6,115483	0,003620
t (Q)	0,453271	0,358183	1,265473	0,274395
(4)NaCl (L)	6,212666	0,372421	16,681814	0,000076
NaCl (Q)	0,985489	0,358183	2,751353	0,051303
1L x 2L	2,014809	0,456121	4,417266	0,011535
1L x 3L	-0,917812	0,456121	-2,012211	0,114510
1L x 4L	-1,182591	0,456121	-2,592712	0,060511
2L x 3L	-0,551709	0,456121	-1,209565	0,293043
2L x 4L	1,095450	0,456121	2,401664	0,074222
3L x 4L	0,119196	0,456121	0,261326	0,806745

Fonte: o próprio autor (2017).

Todos os efeitos principais lineares e a interação da temperatura com a concentração de soluto são significativos a $p < 0,05$, conforme os resultados apresentados na Tabela A.6.

Relação de desempenho

Os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para a relação desempenho da operação estão na Tabela A.7.

Tabela A.7 – Efeito estimado, erro, coeficiente t e grau de significância estatística, para cada fator no modelo codificado para relação de desempenho, calculado pelo Erro puro

Variável	Efeito	Erro puro	t(4)	P
(1)T L	0,571580	0,003547	161,165593	0,000000
T (Q)	-0,079005	0,003238	-24,402853	0,000017
(2)C (L)	0,086463	0,003114	27,768087	0,000010
C (Q)	-0,043311	0,003238	-13,377758	0,000181
(3)t (L)	0,064234	0,003114	20,629219	0,000033
t (Q)	0,041877	0,003238	12,934720	0,000206
(4)NaCl (L)	0,030234	0,003114	9,709722	0,000630
NaCl (Q)	-0,062770	0,003238	-19,388347	0,000042
1L x 2L	-0,033747	0,003114	-10,837953	0,000411
1L x 3L	-0,110705	0,003965	-27,919592	0,000010
1L x 4L	0,013601	0,003965	3,430043	0,026535
2L x 3L	0,081594	0,003965	20,577760	0,000033
2L x 4L	-0,001652	0,003965	-0,416629	0,698336
3L x 4L	0,033204	0,003965	8,373956	0,001112

Fonte: o próprio autor (2017).

Todos os efeitos foram significativos, com exceção da interação entre concentração do soluto e concentração de cloreto de sódio, segundo os resultados mostrados na Tabela A.7.

APÊNDICE B

A Tabela B.1 apresenta os resultados experimentais das dimensões dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente em solução de sacarose e cloreto de sódio de acordo com o DCCR estudado.

Tabela B.1 – Valores experimentais das dimensões, volume e área dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente em soluções de sacarose e cloreto de sódio

Ensaio	Cubo <i>in natura</i>					Cubo desidratado osmoticamente				
	L ₁ (cm) ¹	L ₂ (cm) ¹	L ₃ (cm) ¹	V(cm ³) ²	S(cm ²) ³	L ₁ (cm) ¹	L ₂ (cm) ¹	L ₃ (cm) ¹	V(cm ³) ²	S(cm ²) ³
1	2,61	2,69	2,58	18,05	41,29	2,51	2,57	2,51	16,12	38,30
2	2,54	2,58	2,52	16,49	38,86	2,38	2,32	2,41	13,25	33,60
3	2,65	2,64	2,55	17,74	40,82	2,56	2,52	2,49	15,98	38,06
4	2,52	2,54	2,51	16,06	38,20	2,35	2,28	2,40	12,83	32,89
5	2,60	2,58	2,54	16,97	39,62	2,44	2,42	2,46	14,46	35,62
6	2,54	2,61	2,65	17,56	40,52	2,41	2,41	2,59	14,95	36,43
7	2,58	2,56	2,56	16,84	39,42	2,48	2,45	2,49	15,07	36,60
8	2,63	2,62	2,56	17,58	40,56	2,38	2,41	2,50	14,34	35,42
9	2,49	2,53	2,57	16,16	38,35	2,32	2,28	2,42	12,72	32,70
10	2,59	2,55	2,55	16,76	39,31	2,37	2,30	2,52	13,68	34,37
11	2,52	2,54	2,62	16,67	39,16	2,30	2,33	2,43	13,00	33,17
12	2,48	2,55	2,59	16,35	38,65	1,88	1,98	2,57	9,52	27,20
13	2,59	2,68	2,57	17,79	40,88	2,41	2,43	2,41	14,13	35,06
14	2,60	2,46	2,58	16,47	38,85	2,37	2,22	2,56	13,41	33,93
15	2,59	2,54	2,64	17,33	40,19	2,32	2,31	2,46	13,12	33,40
16	2,56	2,57	2,59	17,01	39,68	1,72	1,79	2,51	7,69	23,69
17	2,56	2,45	2,62	16,38	38,70	2,50	2,40	2,45	14,65	35,92
18	2,62	2,56	2,62	17,50	40,45	2,42	2,36	2,41	13,76	34,46
19	2,65	2,59	2,53	17,30	40,14	2,46	2,38	2,42	14,10	35,03
20	2,63	2,65	2,50	17,35	40,23	2,43	2,47	2,34	14,02	34,89
21	2,50	2,40	2,59	15,55	37,37	2,36	2,29	2,51	13,51	34,06
22	2,56	2,45	2,49	15,53	37,38	2,34	2,27	2,33	12,34	32,06
23	2,62	2,65	2,63	18,25	41,57	2,49	2,52	2,52	15,80	37,76
24	2,66	2,70	2,59	18,56	42,05	2,45	2,42	2,53	14,94	36,41
25	2,44	2,44	2,56	15,18	36,80	2,29	2,23	2,48	12,67	32,61
26	2,55	2,47	2,59	16,26	38,53	2,38	2,26	2,55	13,70	34,41
27	2,49	2,49	2,55	15,79	37,74	2,32	2,34	2,46	13,38	33,78
28	2,49	2,53	2,65	16,66	39,15	2,37	2,35	2,59	14,41	35,58
29	2,65	2,58	2,63	17,94	41,13	2,47	2,38	2,57	15,11	36,69

Notações: ¹L₁, L₂, L₃ = dimensões dos eixos do cubo nas direções x, y e z, ²V = volume do cubo, ³S = área do cubo
 Fonte: o próprio autor (2017).

APÊNDICE C

A Tabela C.1 mostra os resultados experimentais dos valores de perdas de massa e de umidade, ganho de sólidos totais, redução de atividade de água e incorporações de sólidos solúveis, sacarose e cloreto de sódio na cinética de desidratação osmótica dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente na melhor condição de operação.

Tabela C.1 – Valores experimentais de perda de massa, perda de umidade, ganho de sólidos totais, redução de atividade de água e incorporações de sólidos solúveis, sacarose e cloreto de sódio, obtidos na cinética de desidratação osmótica dos cubos de mandioca na condição de 52°C, 56% em peso de soluto, 10% em peso de cloreto de sódio, 190 minutos e 180 rpm de agitação

Tempo (min.)	PM¹ (%)	PU² (%)	GST³ (%)	RAw⁴ (%)	ISS⁵ (%)	ISac⁶ (%)	INaCl⁷ (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	2,94	10,13	7,23	4,66	7,06	2,96	1,21
30	3,31	14,43	10,61	5,47	9,27	3,10	1,25
45	3,54	15,16	11,23	6,85	10,13	3,25	1,37
60	4,68	15,96	11,30	7,95	11,31	3,50	1,76
75	5,13	16,56	11,40	8,75	10,77	3,51	1,82
90	6,92	17,81	11,71	9,88	11,37	3,55	1,84
110	7,35	18,81	11,74	11,11	11,28	4,33	2,24
130	7,71	19,98	12,33	12,64	12,79	4,70	2,27
150	9,65	23,11	13,37	13,70	13,93	4,95	2,47
180	11,81	24,79	12,63	15,94	15,02	5,24	2,52
240	12,26	24,90	12,67	17,28	17,24	6,06	2,79
300	12,15	24,87	12,51	18,08	20,02	7,90	3,73
360	12,54	24,90	12,51	18,40	20,72	8,10	3,88
420	6,64	22,72	16,11	18,64	20,84	8,35	3,90
480	6,45	22,70	16,46	18,68	20,85	8,87	4,07

Notações: ¹PM = perda de massa, ²PU= perda de umidade, ³GST = ganho de sólidos totais, ⁴RAw = redução de atividade de água, ⁵ISS= incorporação de sólidos solúveis, ⁶ISac= incorporação de sacarose, ⁷INaCl= incorporação de cloreto de sódio.

Fonte: o próprio autor (2018).

APÊNDICE D

As Tabelas D.1 e D.2 apresentam os valores médios da umidade de equilíbrio de desorção dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente respectivamente, obtidas nas temperaturas de 50, 60 e 70°C com diferentes concentrações de umidade relativa do ar.

Tabela D.1 – Valores médios das umidades de equilíbrio de desorção (Xe) dos cubos de mandioca *in natura* obtidos experimentalmente para todas as temperaturas analisadas nas diversas condições de umidade relativa do meio (UR) contendo ácido sulfúrico

Conc. H ₂ SO ₄ (% p.p-1)	Temperatura (°C)					
	50		60		70	
	Xe ¹ (g _{água} /g _{massa seca})	UR ²	Xe ¹ (g _{água} /g _{massa seca})	UR ²	Xe ¹ (g _{água} /g _{massa seca})	UR ²
20	0,323	0,888	0,201	0,890	0,251	0,892
25	0,300	0,829	0,174	0,830	0,221	0,831
30	0,278	0,770	0,168	0,776	0,196	0,782
35	0,261	0,681	0,148	0,682	0,179	0,683
40	0,255	0,582	0,133	0,584	0,157	0,586
45	0,239	0,483	0,125	0,488	0,151	0,493
50	0,186	0,380	0,114	0,388	0,143	0,396
55	0,175	0,280	0,108	0,287	0,141	0,294
60	0,159	0,189	0,099	0,199	0,123	0,209
65	0,136	0,110	0,085	0,124	0,120	0,138
70	0,118	0,055	0,068	0,061	0,099	0,067

Notações: ¹Xe= umidade de equilíbrio, ²UR= umidade relativa do ar (adimensional).

Fonte: o próprio autor (2018).

Tabela D.2 – Valores médios das umidades de equilíbrio de desorção (Xe) dos cubos de mandioca desidratados osmoticamente obtidos experimentalmente para todas as temperaturas analisadas nas diversas condições de umidade relativa do meio (UR) contendo ácido sulfúrico

Conc. H ₂ SO ₄ (% p.p-1)	Temperatura (°C)					
	50		60		70	
	Xe (g _{água} /g _{massa seca})	UR	Xe (g _{água} /g _{massa seca})	UR	Xe (g _{água} /g _{massa seca})	UR
20	0,423	0,888	0,375	0,890	0,358	0,892
25	0,377	0,829	0,327	0,830	0,323	0,831
30	0,363	0,770	0,290	0,776	0,299	0,782
35	0,317	0,681	0,237	0,682	0,253	0,683
40	0,275	0,582	0,202	0,584	0,240	0,586
45	0,248	0,483	0,170	0,488	0,192	0,493
50	0,190	0,380	0,123	0,388	0,146	0,396
55	0,145	0,280	0,094	0,287	0,111	0,294
60	0,131	0,189	0,063	0,199	0,100	0,209
65	0,110	0,110	0,054	0,124	0,073	0,138
70	0,090	0,055	0,024	0,061	0,059	0,067

Notações: ¹Xe= umidade de equilíbrio, ²UR= umidade relativa do ar (adimensional).

Fonte: o próprio autor (2018).

APÊNDICE E

As Tabela E.1 e E.2 apresentam os valores de umidade de equilíbrio em base seca dos cubos de mandioca *in natura* e desidratados osmoticamente respectivamente, obtidos experimentalmente nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Tabela E.1 – Valores experimentais médios de umidade em base seca das amostras de cubo de mandioca *in natura* secas a várias temperaturas do ar de secagem

Tempo (horas)	Temperatura (°C)		
	50	60	70
	X ¹ (g _{água} /g _{m. s.})	X ¹ (g _{água} /g _{m. s.})	X ¹ (g _{água} /g _{m. s.})
0	1,385	1,627	1,884
0,5	1,227	1,349	1,461
1	1,116	1,235	1,274
2	0,964	1,054	0,995
3	0,767	0,840	0,782
4	0,701	0,779	0,615
5	0,614	0,687	0,515
6	0,552	0,586	0,359
7	0,491	0,506	0,255
8	0,451	0,444	0,186
9	0,381	0,398	0,123
10	0,343	0,345	0,082
11	0,289	0,289	0,062
12	0,242	0,246	0,054
13	0,204	0,205	-
14	0,171	0,168	-
15	0,145	0,133	-
16	0,117	0,121	-
17	0,102	0,104	-
18	0,091	0,078	-
19	0,083	0,072	-
20	0,076	0,063	-
21	0,069	-	-

Notação: ¹X= umidade.

Fonte: o próprio autor (2018).

Tabela E.2 – Valores experimentais médios de umidade em base seca das amostras de cubo de mandioca desidratados osmoticamente secas a várias temperaturas do ar de secagem

Tempo (horas)	Temperatura (°C)		
	50	60	70
	X ¹ (g _{água} /g _{m. s.})	X ¹ (g _{água} /g _{m. s.})	X ¹ (g _{água} /g _{m. s.})
0	0,744	0,759	0,98
0,5	0,653	0,618	0,784
1	0,569	0,570	0,707
2	0,509	0,503	0,601
3	0,471	0,424	0,518
4	0,414	0,399	0,455
5	0,380	0,368	0,413
6	0,369	0,334	0,361
7	0,355	0,307	0,323
8	0,333	0,288	0,298
9	0,305	0,272	0,269
10	0,294	0,256	0,243
11	0,275	0,239	0,223
12	0,262	0,227	0,213
13	0,249	0,215	0,192
14	0,237	0,204	0,177
15	0,225	0,192	0,162
16	0,216	0,183	0,149
17	0,205	0,172	0,140
18	0,194	0,162	0,131
19	0,185	0,153	0,121
20	0,177	0,144	0,115
21	0,168	0,133	0,108
22	0,161	0,128	0,100
23	0,154	0,120	0,094
24	0,15	0,11	0,09

Notação: ¹X= umidade.

Fonte: o próprio autor (2018).