



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RAUL SOUZA DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM DA BATATA INGLESA
(*Solanum tuberosum L.*) POR *REFRACTANCE WINDOW*: APLICAÇÃO DO
MODELO DIFUSIONAL E ISOTERMAS DE DESSORÇÃO**

João Pessoa – PB

2019

RAUL SOUZA DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM DA BATATA INGLESA
(*Solanumtuberosum L.*) POR *REFRACTANCE WINDOW*: APLICAÇÃO DO
MODELO DIFUSIONAL E ISOTERMAS DE DESSORÇÃO**

Trabalho Final de Curso
apresentado à Coordenação de Engenharia
Química do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal da Paraíba para
apreciação da banca examinadora como
parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Veruscka A. Silva

João Pessoa – PB

Abril/2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

N244a Nascimento, Raul Souza do.
Análise da cinética de secagem da batata inglesa
(Solanum tuberosum L.) por Refractance Window:
Aplicação do modelo difusional e isoterms de dessecção
/ Raul Souza do Nascimento. - João Pessoa, 2019.
73 f. : il.

Orientação: Veruscka Araújo Silva.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. tubérculos, conservação, modelagem matemática. I.
Silva, Veruscka Araújo. II. Título.

UFPB/

RAUL SOUZA DO NASCIMENTO

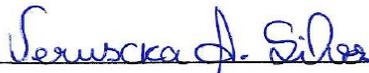
**ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM DA BATATA INGLESA
(*Solanum tuberosum L.*) POR *REFRACTANCE WINDOW*: APLICAÇÃO DO
MODELO DIFUSIONAL E ISOTERMAS DE DESSORÇÃO**

Data de defesa: 06 de maio de 2019.

Período: 2018.2

Resultado: APROVADO

Banca Examinadora:



Orientadora

UFPB



Genaro Zenaide Clericuzi

DEQ/CT/UFPB

Examinador



DEQ/CT/UFPB

Examinador

AGRADECIMENTOS

À minha querida família, Josenilda Maria de Souza e Rodrigo Souza, por me proporcionar a oportunidade de seguir este caminho, e sempre acreditar em meu potencial. Agradeço a todo esforço, amor e carinho.

À minha orientadora, Veruscka Araújo Silva, por ter aceitado o desafio de elaborar este trabalho de conclusão de curso apesar de todas as dificuldades existentes! Muito obrigado!

Meus sinceros agradecimentos a todos!

RESUMO

Os tubérculos tropicais são importantes fontes de alimentos ricos em energia para a nutrição humana, desempenhando um papel relevante no contexto socioeconômico. Além de fornecer uma fonte independente de nutrientes no país, atua como atividade geradora de empregos, ocasionando o desenvolvimento sustentável no campo. Nesta perspectiva, a secagem se apresenta como uma alternativa tecnológica eficaz na redução das perdas pós-colheitas, uma vez que um percentual considerável da safra é inutilizado devido a ineficiência de processos de transporte, armazenagem e distribuição. Esta pesquisa foi desenvolvida com o propósito de avaliar a cinética de secagem da batata inglesa (*Solanum tuberosum L.*) pelo método de *Refractance window*, onde as amostras com espessura de 5 mm foram submetidas às temperaturas 85, 90 e 95 °C, avaliando, também, a influência do pré-tratamento osmótico-ultrassônico, com concentração da solução osmótica de sacarose de 40 °Brix, 40 minutos de desidratação e frequência de banho ultrassônico fixada em 40 kHz. Para ajuste dos dados experimentais foram aplicados os modelos de Fick, para análise do coeficiente de difusão, Page, visando avaliar a cinética de secagem, além de GAB e Chung na determinação das isothermas de dessecamento. Os valores apresentados pelos respectivos coeficientes de determinação (R^2) foram utilizados para análise do grau de ajuste dos modelos. O modelo de Fick exibiu coeficientes de difusão efetiva compatíveis com os relatados na literatura, onde as amostras submetidas ao pré-tratamento demonstraram uma maior taxa de perda de água. A equação de Page se mostrou eficaz na descrição matemática da operação, com menor valor de R^2 igual a 0,9954. Em relação às isothermas de dessecamento, Chung se ajustou melhor aos dados, apresentando coeficiente de determinação superior em 4 dos 6 experimentos realizados. Para todos os modelos utilizados os ajustes foram elevados, mostrando-se adequados na representação do processo de secagem.

Palavras chaves: tubérculos, conservação, modelagem matemática.

ABSTRACT

Tropical tubers are important sources of energy-rich food for human nutrition, playing a relevant role in the socioeconomic context. In addition to providing an independent source of nutrients in the country, it acts as an employment generating activity, leading to sustainable development in the field. In this perspective, drying is an efficient technological alternative to reduce post-harvest losses, since a considerable percentage of the crop is lost due to the inefficiency of transportation, storage and distribution processes. This research was developed with the purpose of evaluating the drying kinetics of english potato (*Solanum tuberosum* L.) by the method of refractance window, where samples with a thickness of 5 mm were submitted to temperatures of 85, 90 and 95 ° C, the influence of the osmotic-ultrasonic pretreatment, with concentration of the osmotic solution of sucrose of 40 ° Brix, 40 minutes of dehydration and ultrasonic bath frequency set at 40 kHz. In order to adjust the experimental data, the Fick models were applied for diffusion coefficient analysis, Page, aiming to evaluate the drying kinetics, besides GAB and Chung in the determination of the desorption isotherms. The values presented by the respective coefficients of determination (R^2) were used to analyze the degree of fit of the models. The Fick model exhibited effective diffusion coefficients compatible with those reported in the literature, where the samples submitted to pre-treatment demonstrated a higher rate of water loss. The equation of Page was effective in the mathematical description of the operation, with a lower R^2 value equal to 0.9954. In relation to the desorption isotherms, Chung was better fitted to the data, presenting higher determination coefficient in 4 of the 6 experiments. For all the models used the adjustments were high, being suitable in the representation of the drying process.

Keywords: tubers, conservation, mathematical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre taxa de deterioração em função da atividade de água	23
Figura 2 - Representação dos 5 tipos de isotermas de sorção descritas por BET	24
Figura 3 - Esquema prático de um secador de bandeja	27
Figura 4 - Representação esquemática de um spray dryer	27
Figura 5 - Secador intensivo	28
Figura 6 - Esquema geral de um liofilizador	29
Figura 7 - Curvas típicas do processo de secagem	30
Figura 8- Modelo esquemático de secagem por <i>refractancewindow</i>	32
Figura 9 - Representação da desidratação osmótica em uma parede celular	35
Figura 10 - Ilustração da batata inglesa	43
Figura 11 - Lavadora ultrassônica Eco-sonics	44
Figura 12 - Banho ultratermostático com exaustor acoplado	44
Figura 13 - Bandejas de suporte para acondicionamento das amostras	45
Figura 14 - Exaustor auxiliar acoplado ao banho ultratermostático	45
Figura 15 - Medidor de atividade de água Novasina	46
Figura 16 - Cinética de secagem do processo sem tratamento	48
Figura 17 - Cinética de secagem do processo com tratamento.....	50
Figura 18 - Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais sem tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C	67
Figura 19 - Ajuste do modelo de Fick ajuste aos dados experimentais com tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C	67
Figura 20 - Ajuste do modelo de Page ajuste aos dados experimentais sem tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C	69

Figura 21 - Ajuste do modelo de Page ajuste aos dados experimentais com tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C	70
Figura 22 - Ajuste do modelo de GAB ajuste aos dados experimentais sem tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C	71
Figura 23 - Ajuste do modelo de GAB ajuste aos dados experimentais com tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C	72
Figura 24 - Ajuste do modelo de Chung aos dados experimentais sem tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C	73
Figura 25 - Ajuste do modelo de Chung aos dados experimentais com tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção, área e produtividade da batata da década de 1940 a 2010	19
Tabela 2 - Componentes da batata inglesa em percentagem	20
Tabela 3 - Composição nutricional da batata inglesa	21
Tabela 4 - Condições de operação durante a realização dos experimentos	44
Tabela 5 - Coeficientes de difusão efetiva (D_{ef}) e de determinação (R^2) do modelo matemático de Fick.....	51
Tabela 6 - Coeficientes de determinação (R^2) e valores das constantes K e n calculados para o modelo matemático de Page nas temperaturas de 85 °C, 90 °C e 95 °C com e sem pré-tratamento osmótico	54
Tabela 7- Coeficientes do modelo GAB e coeficiente de determinação (R^2) obtidos por regressão não linear para os processos com e sem tratamento	55
Tabela 8- Coeficientes do modelo de Chung e coeficiente de determinação (R^2) obtidos por regressão não linear para os processos com e sem tratamento	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivo Específico	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 Batata Inglesa	17
3.1.1. Aspectos Gerais	17
3.1.2. Importância Socioeconômica	18
3.1.3. Importância Nutricional	19
3.2. Teor de Água	21
3.2.1. Aspectos Gerais	21
3.2.2. Atividade de Água	22
3.2.3 Isotermas de Sorção	23
3.3. Secagem	25
3.3.1. Processo de secagem	25
3.3.2. Tipos de secagem	26
3.3.3. Cinética de secagem	29
3.4. RefractanceWindow	31
3.4.1. Condução	33
3.4.2. Convecção	33
3.4.3. Radiação	33
3.5. Pré-tratamento osmótico-ultrassônico	34
3.5.1. Ultrassom	34
3.5.2. Desidratação Osmótica	35
3.6 Modelos matemáticos	36
3.6.1. Modelo de Fick	36
3.6.2. Modelo de Page	38
3.6.3. Isotermas de dessorção	39

3.6.3.1 Modelo GAB	39
3.6.3.2. Modelo de Chung	41
4. METODOLOGIA	42
4.1. Matéria-prima	42
4.1.1. Obtenção e seleção de matéria-prima	42
4.1.2. Higienização, descascamento e fatiamento	43
4.1.3. Secagem por <i>refractancewindow</i>	44
4.1.4. Ajuste por modelos matemáticos	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1 Cinética de secagem	48
5.1.1. Cinética de secagem – Sem tratamento	48
5.1.2. Cinética de secagem – Com tratamento	49
5.2. Modelo de Fick	51
5.3. Modelo de Page	53
5.4. Isotermas de dessorção	53
5.4.1. Modelo GAB	55
5.4.2. Modelo de Chung	56
6. CONCLUSÕES	58
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
8. APÊNDICE	67

1.INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a procura por produtos naturais à base de frutas e vegetais visando seu consumo direto ou aplicação como ingredientes vem aumentando rapidamente. A demanda por estes aqueceu o consumo mundial de uma modalidade específica: frutas e vegetais desidratados. Apesar das limitações, este setor está em expansão, onde a perspectiva de crescimento é grande. Em escala artesanal, a banana passa é a mais comum, havendo também espaço para as frutas tropicais como: abacaxi, manga, melão e outras (SPERS, 2008).

Embora o Brasil seja o terceiro maior produtor mundial de frutas e vegetais, ficando somente atrás da China e Índia, responsável pela produção de 43,6 milhões de toneladas em 2013 (SEBRAE, 2015), estima-se que 40% da produção é desperdiçada entre a colheita no campo e a disponibilidade ao consumidor final. O grande problema para o produtor é a conservação dos frutos maduros. Este alto índice de desperdício é o principal responsável pelo aumento de preços nos locais de comercialização (ALVES et al, 2011).

A batata (*Solanum tuberosum L.*) é a terceira cultura alimentar mais consumida, e a primeira commodity não grão. No Brasil é uma das hortaliças que apresentam maior relevância econômica, com uma produção anual de aproximadamente 3,5 milhões de toneladas, onde a maior parte da produção é comercializada in natura, sendo apenas 10% destinados ao processamento industrial, nas formas de pré-frita congelada, chips e batata palha (EMBRAPA, 2016).

Devido ao seu elevado teor de carboidratos, cerca de 20% em massa, e quantidades irrisórias de lipídios, a batata é um alimento de extrema importância na alimentação mundial, sendo uma fonte saudável e acessível de energia (FERNANDES, 2006). De acordo com Quadros et al. (2009), a batata possui um elevado teor de umidade, apresentando, em média, 77% de água. Deste modo, a secagem enquadra-se como uma alternativa viável para elevar o tempo de prateleira desse produto.

A operação de secagem, que consiste na redução do teor de compostos voláteis dos materiais, mostra-se bastante importante em diversas áreas industriais, entre

elas o processamento de alimentos. Grande parte das frutas e vegetais contém elevado teor de umidade quando in natura, possibilitando um desenvolvimento microbiológico acentuado e o aumento da velocidade de reações químicas indesejáveis, tornando o alimento altamente perecível. Portanto, devido à redução do teor de umidade, a secagem possibilita um maior tempo de prateleira à alimentos de fácil degradação (ROSA, 2010).

Além da elevação da vida útil de produtos naturais, o processo reduz significativamente as despesas logísticas, tais como armazenamento e transporte. Os produtos já processados, por apresentarem um baixo teor de umidade, dispensam condições específicas de armazenagem, como baixas temperaturas e alta umidade relativa do ar. Também, diminuem a área ocupada e os gastos com embalagens, bem como possibilita a diminuição da carga a ser transportada (RODRIGUES, 2003).

Embora possua uma grande gama de vantagens, a secagem pode trazer algumas consequências negativas para a integridade do material, fornecendo um produto com características indesejáveis, como dureza excessiva e alteração em sua coloração tradicional. Estes efeitos podem ser atenuados com pré-tratamentos adequados, tais como a desidratação osmótica e o banho ultrassônico. Seguidos da secagem, estas operações, além de minimizar características inadequadas, pode gerar uma série de produtos personalizados (LIMA, 2012).

Um processo alternativo de desidratação é a secagem por *Refractancewindow*, uma técnica simples, econômica e com tempos reduzidos quando comparada aos métodos de liofilização e secagem em estufa. Para uma mesma quantidade de material o custo de um equipamento de *Refractancewindow* é em torno de um terço do custo de um liofilizador, apresentando, também, uma redução do consumo energético na faixa de 50% (OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012; SILVA, 2016).

O *refractancewindow* é uma tecnologia atual e de caráter promissor que visa a produção de alimentos desidratados por meio espalhamento do material sobre uma esteira plástica que flutua sobre água aquecida. Esta esteira é formada por um filme de poliéster transparente (mylar) à radiação infravermelha, senda esta emitida pela água aquecida. Portanto, neste processo estão presentes a radiação, a condução e a convecção como mecanismos de transferência de calor (ZOTARELLI, 2014).

Segundo Menezes et al. (2013), através da secagem é possível analisar o comportamento do material sólido por meio de curvas que relacionam a razão de umidade e o tempo. Os gráficos obtidos apresentam informações indispensáveis para o desenvolvimento de novos processos e o dimensionamento adequado de equipamentos. A temperatura, concentração da solução osmótica, tempo de secagem e geometria do material são considerados parâmetros de controle desta operação, uma vez que apresentam relação direta com a taxa de perda de umidade.

2.OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Verificar a influência da desidratação osmótica assistida por ultrassom na cinética de secagem por *RefractanceWindow*.

2.2. Objetivos Específicos

- I. Avaliar o efeito do tratamento osmótico com ultrassom e sem tratamento na secagem por *Refractancewindows*;
- II. Verificar o ajuste do modelo de Fick e os respectivos coeficientes difusivos;
- III. Avaliar a aplicação do modelo de cinética de secagem de Page;
- IV. Aplicar as isotermas de dessorção de GAB e Chung, objetivando a obtenção dos valores de seus respectivos parâmetros e ajustes.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Batata inglesa

3.1.1. Aspectos Gerais

A batata inglesa (*Solanum tuberosum L.*) é uma dicotiledônea da família Solanaceae pertencente ao gênero Solanum, contando com mais de 2000 espécies, onde ao menos 160 produzem tubérculos. Originária da América do Sul, especificamente da Cordilheira dos Andes, foi utilizada como principal alimento por populações nativas há mais de 8.000 anos, estando plenamente adaptada a região. Seu desenvolvimento na Europa, por volta do século XVI, fez com que a espécie fosse selecionada como base da agricultura europeia. No século XVII, foi levada à América do Norte, tornando-se um alimento extremamente popular em escala mundial (EMBRAPA, 2016). No Brasil, a cultura foi introduzida no final do século XIX no sul do país, onde as características climáticas favoráveis à sua produção possibilitaram a base da alimentação colonial daquele século. No estado de São Paulo, apenas em 1920 a produção atingiu valores significativos capazes de suprir a demanda regional (PEREIRA, 2011).

O transporte da batata, em geral, é realizado por meio de caminhões em embalagens variadas, sempre com o cuidado para não ocasionar injúrias mecânicas. Além disso, a exposição ao sol durante o processo logístico de pós-colheita deve ser evitada, uma vez que possibilita o esverdeamento do produto. Em relação à armazenagem, temperaturas abaixo de 10°C devem ser evitadas, pois favorecem o acúmulo de açúcares redutores, causando escurecimento do produto após o processo de fritura. Portanto, devem ser oferecidas situações que proporcionem ambientes frescos e arejados para um melhor aproveitamento da colheita (EMBRAPA, 2016).

Segundo Pereira (2011), a comercialização pode ser realizada in natura, com a batata lavada ou escovada, ou até mesmo em sua forma processada. A batata lavada é a de maior consumo no país devido ao seu alto valor nutritivo, características visuais agradáveis e sua relativa disponibilidade. No entanto, ultimamente, com a

mudança no estilo de vida de grande parte da população, é alta a busca por alimentos previamente modificados industrialmente e que possuam qualidade nutritiva intrínseca.

Devido a isto, aumenta a utilização da batata inglesa como matéria-prima na indústria de alimentos para o desenvolvimento de uma série de produtos, tais como chips, pães, biscoitos, sopas e patês. Este processamento é uma atividade bastante recente, mas de grande evolução nos últimos anos, onde o percentual da colheita direcionada à modificação oscila em torno de 10%. Para sua aplicação industrial, a batata deve ser previamente tratada, onde a secagem é uma das operações mais utilizadas (EMBRAPA, 2016).

3.1.2.Importância Socioeconômica

A produção de batata em sistema convencional é considerada como uma cultura de alto custo, contanto com elevada aplicação de uma série de fungicidas e herbicidas. Porém, devido ao seu elevado consumo, este ramo do agronegócio possui grande retorno, sendo fonte de geração de empregos diretos e indiretos na cadeia produtiva e de comercialização (DAROLT et al., 2004).

De acordo com Faostat (2014), a China encontra-se em primeiro lugar no consumo mundial de batata inglesa, seguida por Índia, EUA e Rússia. Já o Brasil, em decorrência de sua diversificada agricultura, encontra-se em 19º lugar. Os países de maior consumo e com as maiores áreas de plantio, em geral, possuem um contraste com as maiores populações de baixa renda. Portanto, nestas circunstâncias, a batata serve como alternativa de alimento, uma vez que populações de maior poder aquisitivo dispõem de outros tipos de alimentos de maior valor, desfrutando de uma alimentação diversificada e consumindo menos fontes de carboidratos como a batata.

Seguindo uma tendência mundial de otimização das áreas de plantio, o Brasil passou por um processo crescente de elevação de produtividade. Técnicas como recuperação de solos, desenvolvimento de novas tecnologias de plantio e colheita, e formulação de agrotóxicos mais eficientes e baratos contribuíram significativamente para o atual cenário neste ramo (JADOSKI e SILVA, 2015). A Tabela 1, adaptada de Pereira (2011), apresenta a evolução da área de plantio, produção e produtividade na

cultura da batata inglesa no país entre os anos 1940 e 2010, evidenciando um aumento em torno de 300% na variável produtividade no intervalo considerado.

Tabela 1 – Produção, área e produtividade da batata da década de 1940 a 2010.

ITEM QUANTIFICADO	DÉCADA						
	40	50	60	70	80	90	10
PRODUÇÃO (t)	566.393	880.094	1.291.252	1.773.687	2.059.785	2.466.354	3.142.939
ÁREA (ha)	114.408	171.992	206.145	199.646	170.196	166.865	147.039
PRODUTIVIDADE (t/ha)	4,95	5,12	6,96	8,88	12,10	14,78	21,37

Fonte: Adaptado de Pereira, 2011.

A partir da Tabela 1, é perceptível a elevação da produtividade média de batata no país de 4,95 t.ha⁻¹, na década de 40 para 21,37 t.ha⁻¹, na última década, superando, desta forma, a média mundial de 16,93 t.ha⁻¹. Entretanto, para fins de competitividade, ainda permanece em números inferiores aos principais produtores europeus, que conforme evidenciado em Reichert et al. (2012) ultrapassam a média de 30 t.ha⁻¹.

3.1.3.Importância Nutricional

De acordo com Abba (2005), a batata é um dos alimentos mais nutritivos para o homem, apresentando proteínas de boa qualidade e baixo percentual de lipídios. Também, em função de sua composição nutricional e produtividade elevada, é uma das culturas que apresentam maior produção de energia por hectare por dia. Neste segmento, o teor proteico é duas vezes superior ao da mandioca, conseguindo suprir até 7% da quantidade diária de proteína recomendada para um adulto de estatura média.

Além disso, de acordo com a composição química da batata, descrita na Tabela 2, a batata possui um balanço energético adequado, uma vez que ao consumidor é fornecida também uma quantidade significativa de proteínas. Portanto, a batata necessita de menor complementação proteica do que outras raízes e tubérculos, e grande parte dos cereais (FERNANDES, 2006).

Tabela 2 – Componentes da batata inglesa em percentagem

COMPONENTES	MÉDIA (%)	VARIAÇÃO (%)
Umidade	77,5	63,2 - 83,9
Sólidos Totais	22,5	13,1 - 36,8
Carboidratos	19,4	13,3 - 30,5
Proteínas	2,0	0,70 - 4,60
Cinzas	1,0	0,44 - 1,90
Fibras	0,6	0,17 - 3,48
Lipídios	0,1	0,02 - 1,00

Fonte: Adaptado de Fernandes, 2006.

Como listado na Tabela 2, a batata inglesa apresenta elevada umidade, com média de 77,5 % além de quantidades consideráveis de componentes importantes para o fornecimento de energia e apoio digestivo, como 19,4 % de carboidratos e 0,6% de fibras, respectivamente. Gonçalves (2011) relata a importância do amido de batata, expresso quase integralmente no teor de hidratos de carbono. Para ele, o amido presente é de amplo interesse ao setor industrial, uma vez que possui propriedades físico-químicas que possibilitam a adesão entre materiais viabilizando seu uso em diversas finalidades, como na produção de papel e indústria alimentícia.

Em relação às vitaminas e minerais, apresentados na Tabela 3, a batata é considerada uma boa fonte de vitamina C apresentando até 36mg em uma porção de 100g de tubérculo fresco. Ainda, conta com um teor razoável de ferro, bem como de fósforo e magnésio, além de ser uma ótima fonte de potássio. O seu baixo conteúdo de sódio torna-a ideal para dietas que necessitam de baixo teor de sal (EMBRAPA, 2016).

Tabela 3 – Composição nutricional da batata inglesa

CONSTITUINTES	QUANTIDADES (mg)
Vitamina A	6,0
Vitamina C	17,4
Magnésio	30,0
Potássio	394,4
Sódio	47,4
Ferro	1,0
Fósforo	69,0

Fonte: Adaptado de Fernandes, 2006

3.2 Teor de água

3.2.1. Aspectos Gerais

Á água presente nos alimentos se apresenta em duas formas diferentes: água ligada e água livre. O somatório dos valores destas duas quantidades constitui o teor total de umidade de um produto alimentício. De acordo com Luiz (2012), no estudo teórico e experimental da secagem de tomate, a seguinte classificação pode ser utilizada:

Água livre: É semelhante a água pura, uma vez que possui propriedades iguais. Devido a este fato, a água livre, ou seja, aquela disponível para reações, é a principal responsável pela degradação microbológica e enzimática nos alimentos. Segundo Kotovicz (2011), esta água é de fácil remoção, pois encontra-se fracamente ligada a matriz sólida do material.

Água ligada: Encontra-se interagindo quimicamente com os componentes não aquosos do produto, não estando disponível, portanto, para dissolução de solutos ou desenvolvimento microbológico. Desta forma, sua remoção torna-se bastante difícil por processos de secagem convencionais. Dependendo da natureza da amostra, necessita de altas temperaturas para a sua remoção, onde até mesmo para aqueles processos que carbonizam o produto a retirada mostra-se parcial (GARCIA, 2004).

De modo geral, é possível afirmar que o teor de água dos alimentos, sejam eles frescos ou processados, é um dos fatores que determinam sua classificação em perecível ou estável (BEZERRA, 2007).

3.2.2. Atividade de água

A água livre dos alimentos é aquela disponível para o desenvolvimento microbiológico, germinação de esporos e para a participação reacional enzimática. O grau de disponibilidade da água na amostra pode ser expresso como o valor de atividade de água (a_w), sendo definida como a razão entre a pressão do vapor da água no alimento e a pressão de vapor da água pura à mesma temperatura, como apresentado na Equação 1 (CASTOLDI, 2012).

$$a_w = \frac{P}{P_o} \quad (\text{Eq.1})$$

Sendo:

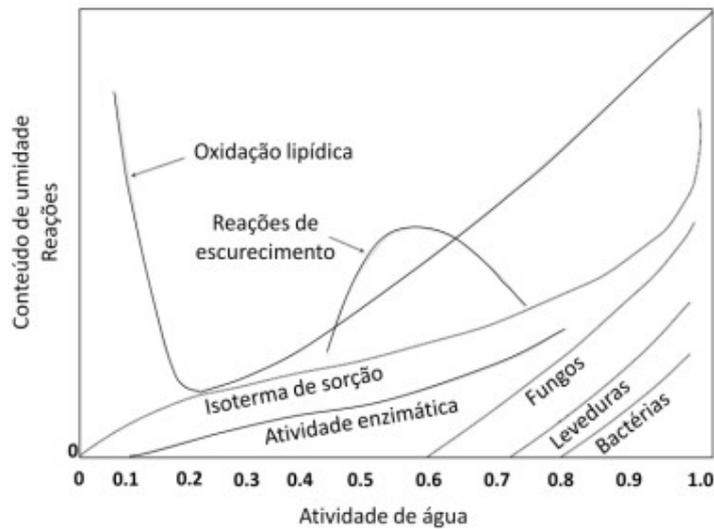
a_w -Atividade de água;

P é a pressão de vapor da água no alimento;

P_o é a pressão de vapor da água pura.

De acordo com Jangam e Mujumdar (2010), a atividade de água é um dos pontos críticos para definição da qualidade e segurança alimentar, uma vez que pode afetar sua vida de prateleira e características organolépticas. A Figura 1 apresenta a relação da taxa de deterioração de alimentos em função da atividade de água.

Figura 1 – Relação entre taxa de deterioração em função da atividade de água



Fonte: Bezerra, 2007.

A partir da Figura 1, é perceptível que o crescimento microbiano é afetado em atividades de água inferiores a 0,90, onde microrganismos de origem fúngica tem seu crescimento impactado abaixo de 0,80. De acordo com Bezerra (2007), o limite inferior para o pleno desenvolvimento de todos os microrganismos é 0,60. Valores próximos a 0,40 não só permitem a inibição microbiológica como garante, também, uma drástica redução do metabolismo enzimático.

3.2.3. Isotermas de sorção

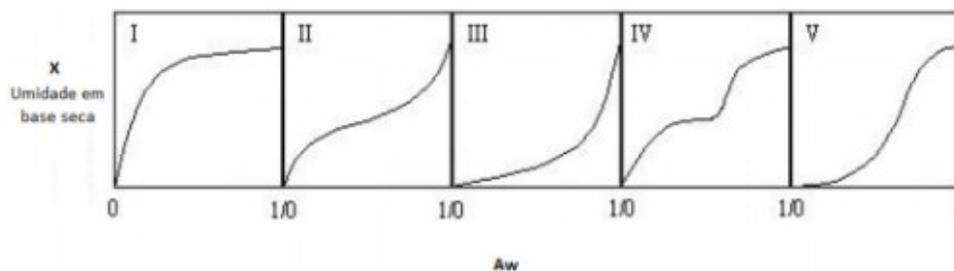
A isoterma é uma propriedade importante para os materiais biológicos para todo o tipo de processamento e armazenamento. As isotermas de sorção são funções da atividade de água, podendo também ser dependente da umidade relativa de equilíbrio em base seca à temperatura constante (PARK et al., 2007). De acordo com Luiz (2012), o fenômeno de sorção está diretamente relacionado à diversos fatores, como composição química, estado físico-químico e temperatura. Estas curvas podem ser obtidas de duas formas:

Isotermas de adsorção: Obtidas quando um material completamente desidratado é exposto a uma atmosfera úmida, ganhando peso à medida que o tempo de realização do experimento avança. A partir da obtenção dos valores de atividade de água e suas respectivas umidades no tempo, é possível obter as curvas correspondentes ao processo (PARK et al. 2008).

Isotermas de desadsorção: São obtidas quando a amostra está completamente úmida e, ao passar o tempo, cede água para a atmosfera circundante. Como no caso anterior, determina-se dados de atividade de água e correspondentes umidades, possibilitando a representação matemática do processo (CORRÊA, 2011).

Cinco tipos de isotermas foram descritas por Braunauer, Emmet e Teller (1938) dependendo da natureza do alimento utilizado na determinação, conforme a Figura 2:

Figura 2 – Representação dos 5 tipos de isotermas de sorção descritas por BET



Fonte: adaptado de Kurozawa, 2005

Isoterma tipo I – Conhecida como isoterma de Langmuir, é determinada a partir da adsorção de um gás em um sólido poroso.

Isoterma tipo II – Obtida, geralmente, em produtos de alta solubilidade.

Isoterma tipo III – Conhecida como isoterma de Flory- Huggins, ocorre em alimentos com grande concentração de sais, açúcares e moléculas hidrofílicas.

Isoterma tipo IV – Determinada através da hidratação máxima dos sítios de adsorção de um sólido hidrofílico.

Isoterma tipo V – Isoterma gerada a partir da adsorção do vapor de água.

3.3. Secagem

3.3.1. Processo de secagem

De acordo com Luiz (2012), o Brasil, por possuir uma imensa área territorial agriculturável e condições climáticas favoráveis, possibilita a colheita de grandes quantidades dos mais diversos produtos. Embora o país possua um elevado consumo de produtos agrícolas, tanto na forma in natura quanto em processados, um percentual considerável da safra é desperdiçado devido ao excedente de produção. Nesta perspectiva, estudos que visem a redução destas perdas no pós-colheita são de extrema importância, sendo possível atingir a meta por meio do desenvolvimento de equipamentos e técnicas que possibilitem o aumento do tempo de prateleira de produtos perecíveis.

O processo de secagem é uma das operações unitárias registrada mais antiga. Esta visa a conservação de alimentos pela preservação contra deterioração microbiológica e enzimática, conservando suas propriedades organolépticas e físico-químicas, além de otimizar as operações de embalagem, estocagem e de transporte. O princípio físico envolvido neste método consiste na remoção de umidade do alimento por evaporação, ocorrendo a transferência de calor e massa entre a interface do material e o meio (ALONSO, 1998; MANINMANI et al., 2016).

A conservação pela secagem é efetiva por levar em consideração o conhecimento de que os microrganismos, as enzimas e os demais processos metabólicos naturais necessitam de uma atividade de água mínima para ocorrerem. Com a redução da umidade disponível, conseqüentemente, a velocidade das reações bioquímicas degradantes será drasticamente reduzida, inibindo assim a ocorrência de fenômenos microbiológicos e enzimáticos (BEZERRA, 2007).

Diversas variáveis devem ser levadas em consideração durante a secagem, tais como temperatura do ar de secagem, umidade final do produto, área de troca térmica e tempo. Paralelamente, a composição e a estrutura do alimento também influenciam no movimento da umidade no material. Durante o processo, a transferência de calor possui três mecanismos: difusão, convecção e radiação. Comumente, a

convecção é o processo mais aplicado comercialmente, consistindo apenas na passagem de um fluxo de ar aquecido (ROSA, 2010).

De acordo com Rodrigues (2003), apesar de possuir uma natureza operacional simples, abrangendo equipamentos e metodologias empregadas, a operação de secagem ocasiona uma série de benefícios aos alimentos, além de ocasionar uma série de economias na cadeia produtivo-comercial, tais como:

- Aumento da vida de prateleira;
- Elevação do valor agregado;
- Facilidade de conservação;
- Otimização dos processos logísticos;
- Inibição de reações enzimáticas e microbiológicas;
- Economia energética na conversação.

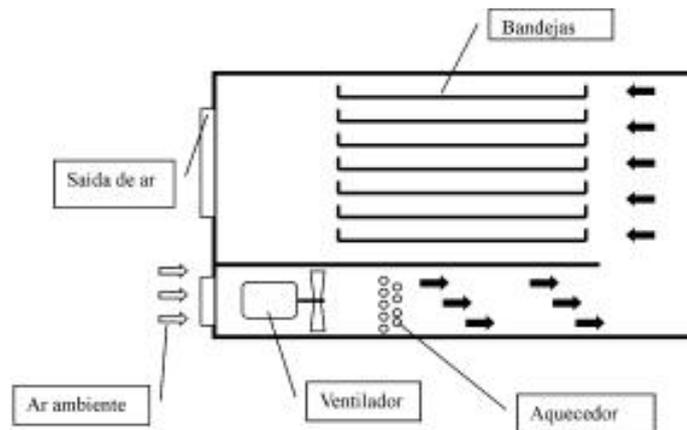
3.3.2. Tipos de secagem

A tecnologia da conservação de alimentos consiste na aplicação de princípios e técnicas para retirada de água (CASTOLDI 2012; BEZERRA, 2007), dentre elas:

- Secagem com ar quente: Ocorre por meio do aquecimento do ar de contato, onde o produto é exposto a uma corrente que flui continuamente. O fluido cede energia térmica ao produto, acarretando na vaporização da água, garantindo, desta forma, a retirada de umidade do material. Embora garanta uma maior estabilidade, características não desejadas, como dureza excessiva, degradação organoléptica e alteração nutricional são evidenciadas nesse processo.

- Secador em bandeja: O alimento é espalhado uniformemente sobre uma bandeja com fundo tipo tela, onde a circulação de ar é realizada por meio de um ventilador posicionado atrás das resistências elétricas, sendo representada esquematicamente na Figura 3.

Figura 3 – Esquema prático de um secador de bandeja

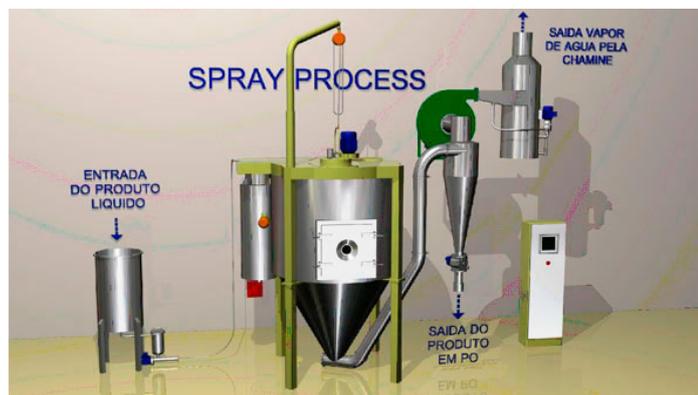


Fonte: Meloni, 2003

- Secagem por atomização: O processo de secagem por atomização consiste em pulverizar o produto dentro da câmara submetendo-o a uma corrente controlada de ar quente, gerando a evaporação dos solventes e obtendo a separação dos sólidos contidos com a mínima degradação do produto.

- *Spray Dryer*: A solução é adicionada a câmara de secagem a uma determinada vazão, sendo pulverizada por meio de um atomizador, aumentando, desta forma, sua área de troca térmica. Ao entrar em contato com o ar quente, há a retirada instantânea do solvente, onde a parte sólida é direcionada para um recipiente por meio de um ciclone, sendo obtida em forma de pó seco, como exibido na Figura 4.

Figura 4 – Representação esquemática de um spray dryer

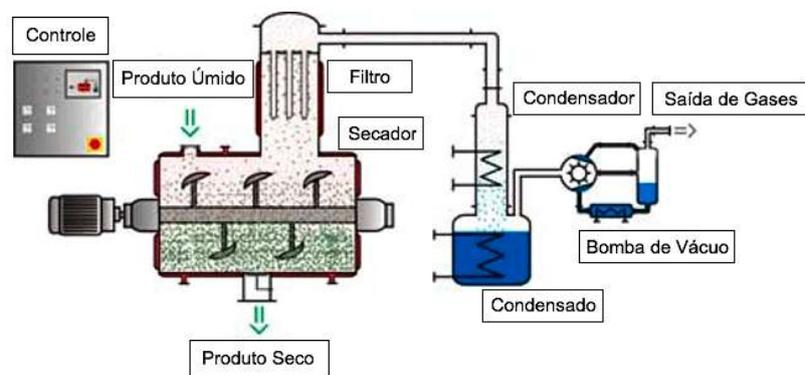


Fonte: Spray Process, 2002.

- Secagem a vácuo: A evaporação ocorre com o auxílio de um gradiente de pressão, uma vez que a temperatura de ebulição da água é menor a baixos valores de pressão, garantindo uma menor descaracterização do produto final. Embora bastante efetivo, esta metodologia mostra-se excessivamente cara, pois além da necessidade de aquisição de bombas de vácuo há uma exigência na aplicação de materiais mais resistentes.

- Secador intensivo: Ao abaixar a pressão do sistema se reduz a temperatura de secagem de produtos com elevada umidade, levando a superfície da partícula à temperatura de evaporação do líquido. A baixa temperatura necessária ocasiona um grande gradiente térmico entre a camisa de aquecimento e o produto, sendo então aumentada a transferência de calor e capacidade de secagem. Também, torna-se um processo muito suave para materiais sensíveis à temperatura. O processo simplificado é representado pela Figura 5.

Figura 5 – Secador intensivo

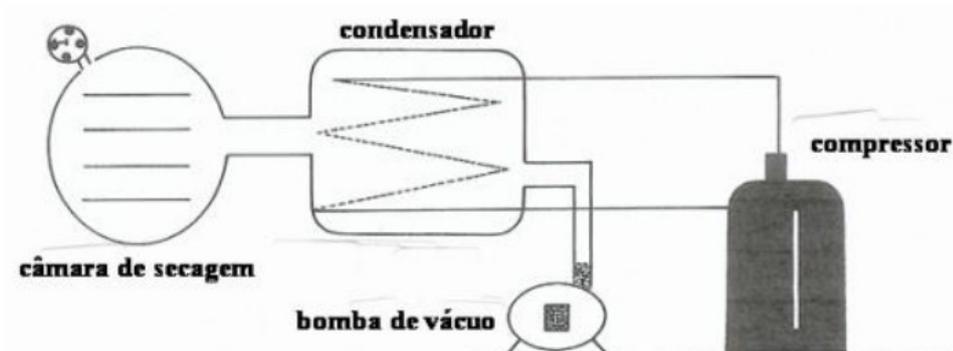


Fonte: Protea, 2014.

- Secagem a frio: Ocorre quando o interior do produto é congelado e posteriormente há a redução da pressão externa, ocasionando o processo de sublimação, evaporando a água instantaneamente. Devido a necessidade de aplicação de trocadores de calor e bombas de vácuo, este método é aplicado apenas a produtos de natureza nobre.

- Liofilização: Apresentado na Figura 6, é um processo de desidratação de produtos em condições de pressão e temperatura onde a água, previamente congelada, sofre o processo de sublimação, passando do estado sólido ao de vapor em um intervalo bastante reduzido de tempo.

Figura 6 – Esquema geral de um liofilizador



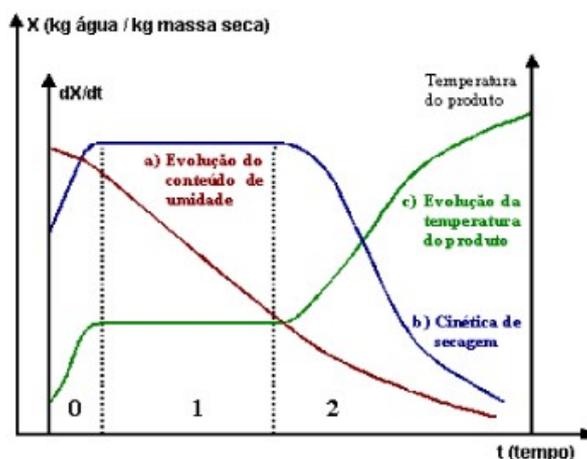
Fonte: Silva et al., 2015.

3.3.3. Cinética de secagem

A cinética de secagem possui como principal objetivo descrever o avanço da retirada de água de uma amostra ao longo do processo de desidratação (MARCINKOWSKI, 2006). De acordo com Nicoletti e Alves (2016), os dados experimentais coletados são apresentados por meio de curvas que relacionam o teor de umidade, em base úmida ou em base seca, e o tempo.

As curvas de secagem originadas possuem aspectos gerais comuns, além de subdivisões características. Park et al. (2001), no estudo da secagem da pêrabartillet em fatias, descreve as diferentes etapas da secagem, exibidas na Figura7, e suas respectivas especificidades.

Figura 7 – Curvas típicas do processo de secagem



Fonte: Park, 2001.

A curva (a), evolução do conteúdo de umidade, apresenta a redução do teor de umidade em base seca (X) durante o processo em relação à evolução do tempo de secagem (t). Esta curva é obtida pesando a amostra durante todo o processo nas condições determinadas do experimento.

A curva (b), cinética de secagem, exibe a variação do conteúdo de umidade do alimento em relação ao tempo (dX/dt), em relação ao tempo (t). Pode ser facilmente obtida a partir da diferenciação da curva (a) em relação ao tempo. Do comportamento do gráfico é facilmente perceptível que quanto maior o tempo de secagem mais devagar se dará a perda de umidade, uma vez que a força motriz se encontra cada vez mais reduzida.

A curva (c), evolução da temperatura (T) em relação ao tempo (t), é obtida a partir da mensuração da temperatura da amostra ao longo do desenvolvimento do experimento. Como exibido na Figura 7 a temperatura do produto, após um breve período de estabilidade, apresenta um aumento linear.

De acordo com Brod (1999), o processo de secagem pode ser dividido em três períodos com características bem definidas, respeitando as seguintes peculiaridades:

O período 0 caracteriza o início da secagem. Há uma elevação gradual da temperatura e da pressão de vapor da água. Este fenômeno prossegue até que a transferência de calor atinja uma equivalência em relação ao transporte de água.

No segundo período, 1, a taxa de secagem encontra-se constante. Nesta etapa, as transferências de massa e energia mostram-se equivalentes, ou seja, enquanto houver água livre na superfície da amostra a velocidade de retirada de água será constante.

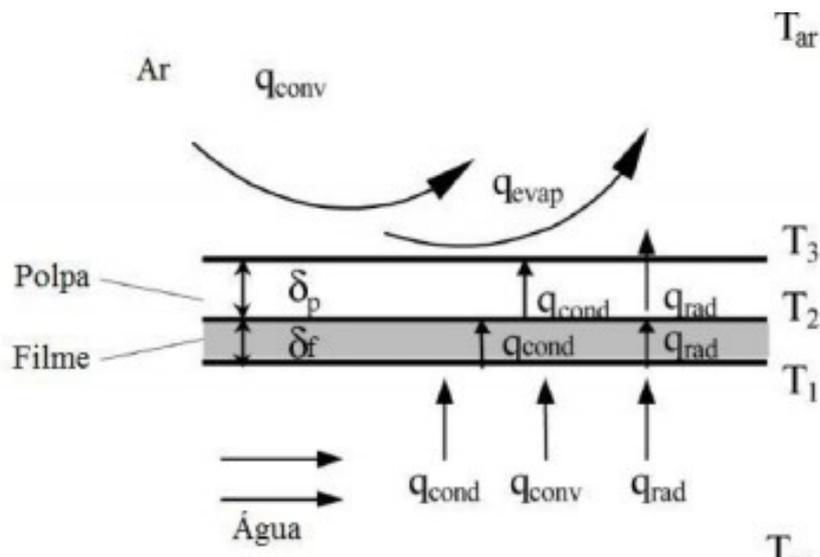
No terceiro período, 2, apresenta taxa de secagem decrescente. O gradiente de umidade entre a superfície e o interior é mínimo, reduzindo, desta forma, a transferência de massa. Embora a transferência de massa seja prejudicada, o transporte de calor prossegue por uma rota alternativa. É observado que a temperatura do produto se eleva até atingir a temperatura do ar de secagem, onde o gradiente de energia é nulo, encerrando o processo.

3.4.RefractanceWindow

Consiste em um processo de secagem atual que utiliza energia térmica a partir da água quente a temperaturas muito próximas da ebulição para secar uma fina camada de material através da condução, convecção e radiação infravermelha. A secagem por *refractancewindow* é caracterizada por manter a integridade de alimentos e ingredientes no que diz respeito à cor, sabor e nutrientes.

O produto a ser seco é espalhado em uma superfície que se estende por todo o equipamento, como exibido na Figura 8, sendo esta feita de um poliéster transparente (Mylar) que permanece flutuando na superfície da água. A energia térmica para a secagem é proveniente da água quente e é transferida para o material úmido por condução e radiação através da interface do filme, o qual é relativamente transparente à radiação infravermelha (NINDO et al., 2011). O equipamento conta com um sistema de exaustão para a remoção do vapor d'água, evitando a condensação e reidratação do material.

Figura 8 – Modelo esquemático de secagem por *Refractancewindow*



Fonte: Nindoet al., 2011.

À medida que o teor de umidade do produto diminua a transferência de calor por condução torna-se predominante. Esta tecnologia possui um amplo potencial, uma vez que a aparelhagem é relativamente simples e barata quando comparada com outros secadores. Para a secagem de uma quantidade semelhante de produto, o custo operacional é cerca de um terço do custo de um liofilizador, e o consumo energético em torno de 50% (OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012).

Segundo Nindoet al. (2011), na secagem por *refractancewindow* a contaminação cruzada não ocorre devido ao não contato do produto com o meio de transferência de calor, o oposto do que ocorre com os secadores diretos. No estudo da redução de microbiana na secagem por *refractancewindow*, Nindo et al. (2003) inocularam em purê de abóbora um coquetel de cultura microbiana composto por coliformes *Escherichia coli* e *Listeria innocua* e realizaram a secagem. O purê, contendo inicialmente 10^6 UFC/ml, obteve uma redução microbiana para o limite mínimo de detecção (< 5 UFC/ml) para todas as culturas. Este resultado sugere que esta metodologia contribui eficientemente para a preservação biológica do alimento.

3.4.1. Condução

A condução é um fenômeno que ocorre em escala molecular, no qual a energia das partículas mais energéticas é transferida para as de menor energia em um meio devido às interações entre elas (Incropera et al., 2007). No processo de *refractance window*, a condução ocorre através do aquecimento dos filmes de Mylar, onde os mesmos transferem energia as amostras por meio de contato direto.

3.4.2. Convecção

Ocorre entre um fluido em movimento e uma interface com diferentes temperaturas. A convecção pode ser classificada quanto à natureza do escoamento do fluido, podendo ser natural ou forçada. Na convecção natural o fluido escoar devido a diferenças de densidade, causadas por variações de temperatura no fluido. Já na convecção forçada o deslocamento é causado por agentes externos, como um ventilador (Incropera et al., 2007).

3.4.3. Radiação

A transferência de calor por radiação, ao contrário da condução e da convecção, não necessita de um meio material para ocorrer, sendo mais eficiente no vácuo. A energia térmica que é emitida tem sua origem na matéria limitada pela superfície, e a taxa na qual essa energia é liberada por unidade de área é chamada de poder emissivo (Incropera et al., 2007). No processo de *refractance window*, um material molhado está em contato com o poliéster, onde a radiação térmica, corresponde a uma janela aberta, possibilita a passagem do calor irradiado da água para o produto úmido.

3.5. Pré-tratamento osmótico-ultrassônico

3.5.1. Ultrassom

O ultrassom é definido por Butz e Tauscher (2002) como sendo ondas de pressão com frequências acima de 20 kHz. De acordo com Silva (2012), o ultrassom vem sendo empregado como uma tecnologia moderna, capaz de melhorar as condições de processamento de muitos produtos. Por ser uma técnica ainda recente, há a necessidade de estudos detalhados sobre seu emprego, visando a otimização e melhoria deste processo.

Segundo Oliveira (2014), atualmente a indústria alimentícia faz uso do ultrassom de duas formas:

- Ultrassom de alta frequência (acima de 100 kHz): Utilizada na mensuração de propriedades do meio de propagação, parâmetros de composição, mudança de fase e dimensões de partículas, uma vez que não produz nenhuma alteração significativa.

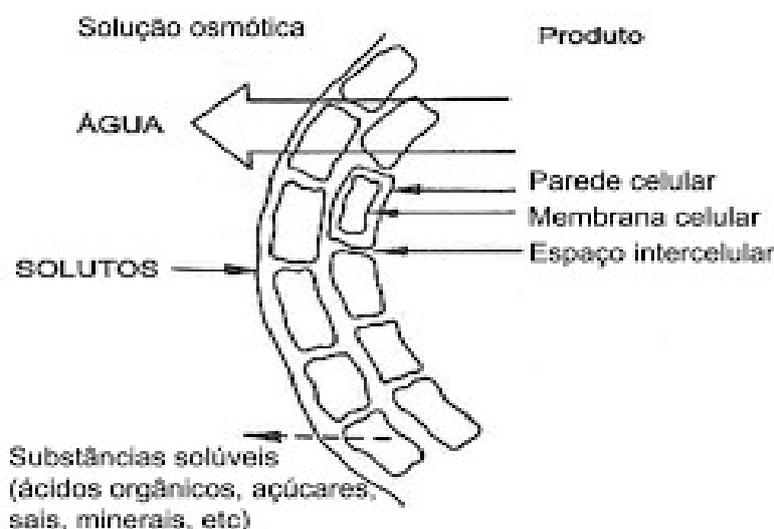
- Ultrassom de baixa frequência (entre 20 e 100 kHz): Podem causar modificações físicas, químicas ou mecânicas no material analisado. Sua aplicação é bastante comum em combinação com outras tecnologias de processamento, como a desidratação osmótica.

De acordo com Flunte-Blanco et al. (2006), a energia fornecida pelo ultrassom ocasiona na amostra o surgimento de microcanais, aumentando a transferência convectiva de massa. Desta forma, a desidratação ocorrida permite a utilização de baixas temperaturas e menores tempos de tratamento, evitando, também, a alteração das características organolépticas do produto. O aumento da difusividade efetiva de água para o ar, na etapa de secagem, faz com que o uso do ultrassom como um pré-tratamento se torne uma metodologia interessante e complementar ao processo convencional de secagem (FERNANDES, GALLÃO e RODRIGUES, 2007).

3.5.2. Desidratação osmótica

A desidratação osmótica, representada esquematicamente na Figura 9, consiste na difusão da água do alimento para a solução e, a difusão do soluto da solução osmótica para o alimento. Esta operação é utilizada como tratamento preliminar para outras técnicas de desidratação visando a melhoria de qualidade do produto final, como redução na alteração da cor e textura características, maior retenção de vitaminas e redução do consumo energético, além da formulação de novos produtos com elevado valor agregado. Submergindo a amostra em uma solução concentrada, ou até mesmo saturada, o teor de água inicial pode ser reduzido. Desse modo, diminui-se significativamente a carga no secador, tornando o produto obtido bastante diferente daquele produzido unicamente pelo processo de secagem. (BLUME e GONÇALVES, 2008).

Figura 9 – Representação da desidratação osmótica em uma parede celular



Fonte: Egeae Lobato, 2014.

A desidratação osmótica de alimentos proporciona produtos compactos, de fácil logística e com valor nutricional concentrado, já que neste processo a água é removida parcialmente, sendo aplicado em conjunto com etapas posteriores de secagem, tais como a secagem convectiva e *refractance window*. A retirada de água é um método eficaz de controle do desenvolvimento microbiano, que gera, conseqüentemente, um material de elevada estabilidade na armazenagem. Desta forma, a desidratação osmótica

pode fazer parte da planta de produção de alimentos, atuando como pré-tratamento (EGEA e LOBATO, 2014).

3.6. Modelos matemáticos

O perfil distributivo da água no interior de uma amostra pode ser representado por modelos matemáticos de natureza teórica, uma vez que estes utilizam os princípios de transferência de massa e energia para a construção de equações descritivas (MOREIRA et al., 2013).

A grande dificuldade de aplicação destes modelos são o número elevado de considerações utilizadas, tais como efeito do encolhimento e capilaridade desprezíveis, equilíbrio térmico com o ar ambiente instantâneo, fluxo de massa unidirecional, entre outros (SOUZA et al., 2008).

Em contrapartida, por possuírem uma origem empírica, os modelos experimentais apresentam uma maior adaptabilidade aos dados coletados em laboratório, uma vez que não utiliza considerações e simplificações na obtenção da equação.

3.6.1. Modelo de Fick

Crank (1975) analisa a teoria da difusão da umidade e sua importância, uma vez que é considerada a principal equação capaz de descrever a cinética de secagem de alimentos em geral. Esta teoria é baseada na segunda Lei de Fick, apresentada na Equação 2:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla U) \quad (\text{Eq.2})$$

Sendo:

X : Teor de água em base seca (kg.kg^{-1});

t : Tempo de secagem (s);

D_{ef} : Coeficiente de difusão (m^2/s).

Diversas soluções analíticas foram propostas por Crack (1975) na forma de séries, levando em consideração diferentes condições iniciais e de contorno para sólidos com formas geométricas simples, como exibido na Equação 3:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{C}{r} \cdot \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (\text{Eq.3})$$

Sendo:

X : Teor de água do produto em base seca ($kg \cdot kg^{-1}$);

C : 0, para corpos planos, 1 para corpos cilíndricos e 2 para corpos esféricos;

r : Raio ou espessura (m);

t : Tempo (s).

Ainda, foi proposta uma solução analítica levando em consideração apenas a distribuição de umidade inicial uniforme, além da ausência de resistência térmica em uma placa plana, sendo representada por meio Equação 4:

$$\frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = y = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \cdot \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{4 \cdot L^2} \right] \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo:

X_t : teor de água médio no tempo em base seca ($kg \cdot kg^{-1}$);

X_e : teor de água de equilíbrio em base seca (kg/kg);

X_0 : teor de água inicial em base seca (kg/kg);

D_{ef} : difusidade efetiva (m^2/s);

t : tempo (s);

n : número de termos;

L : meia espessura da placa (m).

3.6.2. Modelo de Page

Nos anos 1940 foi produzido por Page um modelo funcional de verificação da taxa de secagem ao longo do processo de conservação de alimentos. Desde então vem sendo amplamente utilizado por diversos autores da área, uma vez que possui um baixo número de constantes e explica com grande precisão a secagem de frutas e legumes, sendo expressa pela Equação 5 (DOYMAZ, 2007).

$$\frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = y = \exp(-K \cdot t^n) \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo:

X_t : teor de água médio no tempo em base seca ($kg.kg^{-1}$);

X_e : teor de água de equilíbrio em base seca ($kg.kg^{-1}$);

X_0 : teor de água inicial em base seca ($kg.kg^{-1}$);

t : tempo (s);

K : Constante de secagem (s^{-1});

n : parâmetro de ajuste.

A constante K é tida como uma constante de secagem do modelo, possuindo unidade de tempo. A introdução do parâmetro n no modelo de Page reduz os

erros resultantes da resistência interna a transferência de massa, elevando a precisão do modelo.

Azoubel et al. (2008) e Ceylan et al. (2007), no estudo da modelagem matemática de cinética de secagem de manga, relatam que na realização do processos de secagem em frutas empregando modelos puramente empíricos, a equação de Page foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais, apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,99.

3.6.3. Isotermas de dessorção

Pela fácil obtenção das isotermas, há uma série de equações empíricas e teóricas que correlacionam os dados experimentais das isotermas de sorção de materiais biológicos, onde os polinômios de segundo grau e modelos exponenciais têm demonstrado bons resultados.

3.6.3.1 Modelo GAB (Guggenheim, Anderson e de Bôer) (1946)

Langmuir (1918), ao trabalhar com a adsorção de gases propôs a ideia de relacionar frações molares dos componentes em condensação e em evaporação, obtendo, desta forma, quantidade total de moles possíveis de adsorção na superfície da amostra. Este valor seria expresso em função dos espaços livres, capaz de acomodar uma camada infinitesimal. Esta, por sua vez, seria calculada levando em consideração que a camada adsorvida não excederia a espessura de uma molécula, nomeando-a monocamada molecular (PARK et al., 2008).

Brunauer, Emmett e Teller (1938), utilizam a teoria desenvolvida por Langmuir, porém, considerando que as mesmas forças que produzem a condensação são responsáveis pela energia das ligações de adsorção multimolecular, sendo apresentada pela Equação 6.

$$\frac{aw}{(1-aw).Xm} = \frac{1}{Xm.C} + \frac{aw.(C-1)}{Xm.C} \quad (\text{Eq.6})$$

Sendo:

a_w – Atividade de água;

X_m – Teor de água na monocamada molecular (kg.kg^{-1});

C – Calor de sorção da camada molecular;

Guggenheim, Anderson e de Bôer(1946), estenderam as teorias de adsorção física de BET, resultando numa equação triparamétrica que permite um melhor ajuste dos dados de sorção dos alimentos até a atividade de água de 0,95, exibida pela Equação 7.

$$X_e = \frac{X_m.C.K.a_w}{(1-K.a_w).(1-K.a_w+C.K.a_w)} \quad (\text{Eq.7})$$

Sendo:

a_w – Atividade de água;

X_m – Teor de água na monocamada molecular (kg.kg^{-1});

X_e – Teor de água em base seca (kg.kg^{-1});

C e K – Constantes de adsorção relacionados com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes.

Schmidt e Silva (2016), na comparação dos modelos matemáticos GAB e BET nas isotermas de sorção de umidade para filmes de amido e filmes de acetato de amido, constataram que para atividades de água próximas a 0,90 o erro percentual relativo médio para o modelo de GAB foi 7,72%, enquanto o modelo BET apresentou 21,00%.

3.6.3.2. Modelo de Chung

Segundo Park (2008), este modelo empírico é fundamentado na consideração de que a variação na energia livre para a adsorção está relacionada com o conteúdo de umidade, sendo descrito por meio da Equação 8:

$$\ln aw = -\frac{A}{R*T} \cdot \exp(-B \cdot Xe) \quad (\text{Eq.8})$$

Sendo:

aw - Atividade de água;

Xe - Teor de água de equilíbrio em base seca (kg.kg^{-1});

R - Constante universal dos gases ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$);

T - Temperatura do experimento (K);

A e B - Parâmetros de ajuste de modelo.

Corrêa et al. (2014), no estudo das isotermas de sorção de frutos de *coffeacanaphora*, relataram que o modelo de Chung mostrou-se adequado na representação das isotermas de dessorção entre as temperaturas de 10 e 50 °C, apresentando coeficiente de determinação de 0,9702.

Também, Campos et al. (2013), no estudo das isotermas e calor isostérico das sementes de algodão com linter e sem linter, observaram que o modelo de Chung-Pfof apresentou adequadamente a higroscopicidade do processo de secagem, apresentando coeficiente de determinação de 0,9850 e 0,9220, bem como erro relativo de 3,43% e 3,83% para os processos sem linter e com linter, respectivamente.

4. METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida nos laboratórios pertencentes ao Departamento de Engenharia Química (DEQ) e ao Departamento de Engenharia de Materiais (DEMat), localizados no Centro de Tecnologia (CT) do Campus I da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) entre os meses de dezembro de 2018 a fevereiro de 2019.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Termodinâmica e no Laboratório de Purificação e Aspensão de Minerais Argilosos, pertencentes aos Departamentos de Engenharia Química e de Engenharia de Materiais, respectivamente.

Para obtenção do ajuste aos dados experimentais, tanto das isotermas de dessorção como dos modelos referentes a cinéticas de secagem, foi utilizado o software OriginPro 8.0, realizando por meio deste a confecção dos gráficos de ajustes e comparativos.

4.1. Matéria –prima

4.1.1. Obtenção e seleção da matéria-prima

A matéria-prima utilizada foi a batata inglesa (*Solanum tuberosum* L.) proveniente do comércio local do município de João Pessoa – PB. As batatas foram selecionadas levando-se em consideração a ausência de manchas e inexistência de indícios de degradação, onde a Figura 10 representa um vegetal ideal para a retirada das amostras.

Figura 10 – Ilustração da batata inglesa



Fonte: Semagro (2016).

4.1.2. Higienização, descascamento e fatiamento

Nesta etapa, as batatas foram lavadas em água corrente, objetivando a remoção das sujidades grosseiras existentes na superfície. Em seguida, as mesmas foram descascadas manualmente com o auxílio de um fatiador de aço inoxidável. Posteriormente, seguiram para o corte das amostras em fatias circulares com diâmetro em torno de 19 mm e 5 mm de espessura, sendo empregado um paquímetro analógico na aferição das medidas.

Para as amostras submetidas ao tratamento osmótico-ultrassônico, foi utilizada a condição de 40 kHz em uma solução de sacarose com concentração de 40°Brix durante o tempo de 40 minutos. O pré-tratamento foi realizado em uma lavadora ultrassônica Eco-sonics, exibida na Figura 11, e logo depois seguia para o processo de secagem.

Figura 11 – Lavadora ultrassônica Eco-sonics



Fonte: Autoria própria.

4.1.3. Secagem por *Refractancewindow*

A secagem por *refractancewindow* foi realizada em um equipamento adaptado de acordo com Zotarelli (2014), com algumas modificações, sendo utilizado um banho ultratermostático da marca SP Labor, representado na Figura 11. A Tabela 4 representa as condições operacionais utilizadas na realização dos experimentos.

Tabela 4 – Condições de operação durante a realização dos experimentos

Condição	Temperatura de secagem <i>RW</i> (°C)
Sem tratamento	80, 90 e 95
Com tratamento osmótico-ultrassônico	80, 90 e 95

Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 12 – Banho ultratermostático com exaustor acoplado



Fonte: Autoria própria, 2019.

Além disto, as amostras foram acondicionadas em bandejas de suporte (20x12x4,5 cm) confeccionadas com um filme de poliéster cristal (Mylar), exibidas na Figura 13. As amostras foram colocadas dentro do banho termostático, isolado nas laterais e apoiado em um suporte, com a finalidade de promover o contato direto das bandejas com a água aquecida do banho, nas temperaturas estudadas.

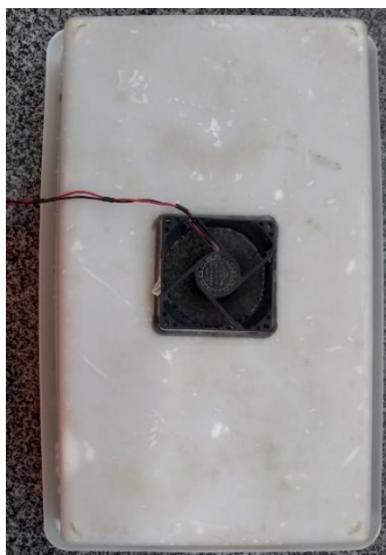
Figura 13 – Bandejas de suporte para acondicionamento das amostras



Fonte: Aatoria própria, 2019.

Com a finalidade de prevenir a condensação de vapor nas amostras ou em seus arredores, o que ocasionaria alterações no teor de água durante o processo de secagem, foi acoplado ao banho um exaustor montado em laboratório, exibido na Figura 14.

Figura 14 – Exaustor auxiliar acoplado ao banho ultratermostático



Fonte: Aatoria própria, 2019.

As amostras, com massa total variando entre 38 e 41 gramas, permaneciam no *refractancewindow* durante intervalos de 15 minutos até a primeira hora do processo. Ao atingir o determinado tempo, duas amostras eram retiradas e acondicionadas em um dessecador de vidro para resfriar até temperatura ambiente. Em seguida, encaminhava-se as mesmas para o medidor de atividade de água NovasinaLabMaster na temperatura de 25°C, apresentado na Figura 15. As leituras eram realizadas em duplicata, onde a câmara 1 realiza a leitura e a câmara 2 auxilia como estabilizadora.

Figura 15 – Medidor de atividade de água Novasina



Fonte: A autoria própria 2019.

Após 60 minutos de experimento, os dados foram coletados em intervalos regulares de 30 minutos, uma vez que tempos menores ocasionavam variações de massa e de atividade de água inexistentes ou infinitesimais. A metodologia da secagem por *refractancewindow* e determinação da atividade de água prosseguiram até obter uma massa constante no processo de secagem, indicando o fim do experimento.

4.1.4. Ajuste por modelos matemáticos

Para a determinação da modelagem matemática dos dados experimentais foi aplicado inicialmente o modelo difusional de Fick (Equação 4), sendo desconsiderado o efeito do encolhimento. Neste modelo foram utilizados três termos da série objetivando atingir valores para o parâmetro A próximos a $(8/\pi^2) = 0,810$, onde, por meio de regressão não-linear no programa OriginPro 8.0 foi possível obter os valores da difusão efetiva durante a desidratação em *refractance window*.

Além disto, foram determinados, também, os parâmetros matemáticos do modelo cinético de Page (Equação 5), bem como as constantes presentes nas equações de GAB (Equação 7) e Chung (Equação 8). Os critérios de escolha dos melhores ajustes foram baseados na análise do coeficiente de determinação (R^2) gerados pelo *software* estatístico empregado.

5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

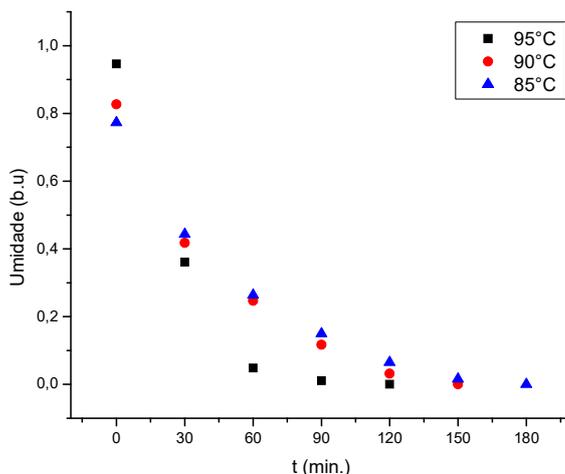
5.1. Cinética de secagem

5.1.1. Cinética de secagem – Sem tratamento

De acordo com a Figura 16, a condição de 95°C do processo sem tratamento se mostrou mais eficiente na retirada de umidade da amostra, uma vez que a quantidade de energia fornecida para a secagem é superior às demais. Inicialmente, o teor de umidade das amostras apresenta valores aleatórios, visto que este depende apenas da composição físico-química do vegetal onde foi realizada a coleta da amostra.

Após o início da secagem, a exposição à diferentes condições tornam evidente o comportamento cinético, onde, quanto maior a temperatura do meio mais elevada é a taxa de perda de água. Desta forma, a amostra submetida a temperatura de 95°C forneceu menores teores de umidade durante o processo.

Figura 16 – Cinética de secagem do processo sem tratamento



Fonte: Autoria própria, 2019.

Entretanto, em tempos superiores a 150 minutos o fluxo de água originário do interior do vegetal torna-se muito pequeno, exibindo uma variação infinitesimal de massa e refletindo em um valor de umidade em base úmida praticamente igual em quaisquer das temperaturas aplicadas, atingindo o estado de equilíbrio do processo.

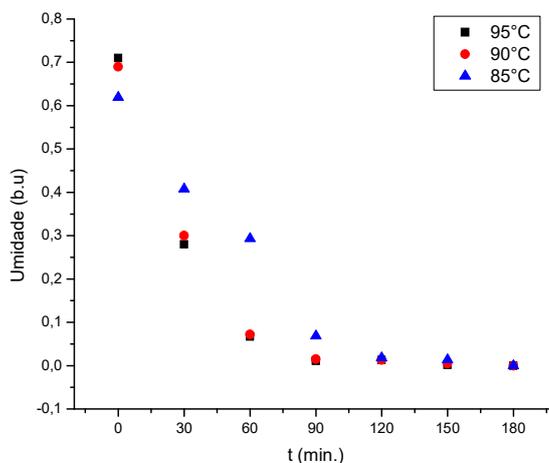
Zotarelli (2014), na produção e caracterização de manga desidratada em pó por diferentes processos de secagem, relatou que para a secagem em *refractance window* com espessura da amostra de 5 mm o aumento da temperatura reduziu significativamente o tempo necessário para obtenção do estado de equilíbrio. Para a temperatura de 75 °C o tempo necessário para atingir a massa constante foi de 100 minutos, enquanto para as temperaturas de 85 °C e 95 °C foram de 80 e 70 minutos, respectivamente.

Também, Oliveira et al. (2015) constatou que na modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos, a elevação da temperatura modificou o tempo de secagem. Os autores relatam que para uma modificação de 10°C na temperatura de secagem, passando de 50 para 60 °C, o tempo de secagem foi reduzido em até 50%.

5.1.2. Cinética de secagem – Com tratamento

A partir da Figura 17 é possível perceber que o experimento submetido a 95°C do processo com tratamento demonstrou uma retirada mais acentuada de umidade do material, como esperado. Porém, em um comparativo com o experimento submetido à 90°C a superioridade foi bastante reduzida, onde após 60 minutos de secagem o equilíbrio mássico parcial é obtido.

Figura 17 – Cinética de secagem do processo com tratamento



Fonte: Autoria própria, 2019.

Devido ao pré-tratamento osmótico-ultrassônico, as amostras iniciam o processo com um teor inicial de umidade já reduzido. Este fato fica evidente ao compararmos as umidades iniciais dos experimentos com e sem pré-tratamento: Neste, as umidades em base úmida no tempo $t = 0$ minutos estavam em torno de 0,76; 0,82 e 0,94, enquanto no processo submetido ao pré-tratamento as umidades iniciais foram próximas a 0,71; 0,69 e 0,61 ambos nas temperaturas de 95, 90 e 85°C, respectivamente. Desta forma, o estado de equilíbrio entre os três experimentos é atingido em um menor tempo, 120 minutos, devido ao menor teor de água a ser retirado, como exibido na Figura 17.

Justus (2012), no estudo da influência da aplicação de ondas de ultrassom na desidratação osmótica de tomates,relata que a utilização do ultrassom maximizou a retirada de água quando comparado ao processo convencional de desidratação osmótica, ocasionando um acréscimo em torno de 4,0% na perda de água nos 40 minutos iniciais do processo de secagem. Também, Arias (2017), na análise do efeito do ultrassom e do pulso de vácuo sobre a cinética de secagem da banana verde, descreve que a elevação da temperatura de 50 para 60 °C na secagem das amostras pré-tratadas com ultrassom ocasionou uma maior velocidade na retirada de água durante o experimento, revelando a influência do ultrassom na taxa desidratação de materiais biológicos.

5.2. Modelo de Fick

Na análise do comportamento matemático descrito por um modelo, é utilizado um parâmetro estatístico denominado coeficiente de determinação, R^2 . Na Tabela 5 são apresentados os valores referentes aos coeficientes de determinação obtidos para este modelo, bem como os coeficientes de difusão encontrados por regressão não linear e utilização de três termos para os respectivos níveis de temperatura e pré-tratamento. A visualização gráfica dos ajustes pode ser observada nas Figura 18 e 19, presentes no Apêndice I.

Tabela 5 - Coeficientes de difusão efetiva (D_{ef}) e de determinação (R^2) do modelo matemático de Fick

FICK						
EXPERIMENTO	SEM TRATAMENTO			COM TRATAMENTO		
	D_{ef} (m ² /s)	A	R^2	D_{ef} (m ² /s)	A	R^2
85 °C - 5 mm	$2,83 \times 10^{-9}$	0,8872	0,9687	$3,80 \times 10^{-9}$	0,8761	0,9967
90 °C - 5 mm	$3,05 \times 10^{-9}$	0,9189	0,9373	$3,87 \times 10^{-9}$	0,8611	0,9683
95 °C - 5 mm	$7,01 \times 10^{-9}$	0,8738	0,9874	$9,00 \times 10^{-9}$	0,8686	0,9819

Fonte: Autoria própria, 2019.

Conforme observado na Tabela 5, verifica-se que o modelo difusional, tanto para as amostras submetidas ao pré-tratamento quanto para aquelas que não foram submetidas ao mesmo, apresentou elevado ajuste aos dados experimentais, com coeficiente de determinação oscilando entre 0,9373 e 0,9967.

Na aplicação do modelo de Fick foram utilizados três termos na obtenção do coeficiente de difusão. O parâmetro de parada da equação é expresso pela variável A: quanto mais próxima do valor teórico ideal, 0,810, mais confiável o resultado obtido

para o coeficiente D_{ef} . A partir da Tabela 5 é possível observar que o parâmetro A variou entre 0,8686 e 0,8872, exibindo menores valores para o processo com tratamento.

Fica evidente, também, a proporcionalidade entre as variáveis temperatura e difusão. Em ambos os processos, quanto maior a temperatura aplicada ao experimento mais elevado o coeficiente difusivo obtido. Para as amostras sem tratamento, o maior valor de difusão efetiva foi para a amostra submetida a 95°C, atingindo uma taxa de perda de água de $7,01 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Também para o experimento a 95°C e condição de secagem com tratamento, o coeficiente difusivo foi o mais elevado, chegando a $9,00 \times 10^{-9}$.

De acordo com Fluyente-Blanco et al. (2006), a energia fornecida pelo ultrassom ocasiona na amostra o surgimento de microcanais, aumentando a transferência convectiva de massa. Desta forma, a desidratação ocorrida permite a utilização de baixas temperaturas e menores tempos de tratamento, evitando, também, a alteração das características organolépticas do produto.

É importante observar que em todos os experimentos realizados, as amostras que foram submetidas ao pré-tratamento osmótico-ultrassônico exibiram coeficientes de difusão efetiva superiores ao processo sem tratamento, evidenciando a eficácia desta etapa na elevação da taxa de retirada de água durante a secagem em *refractance window*. O aumento da difusividade efetiva de água para o ar, na etapa de secagem, faz com que o uso do ultrassom como um pré-tratamento se torne uma metodologia interessante e complementar ao processo convencional de secagem (FERNANDES, GALLÃO e RODRIGUES, 2007).

Segundo Martinazzo (2007), os valores de R^2 mais próximos de 1 demonstram a excelência do modelo para representação da cinética de secagem. Oliveira et al. (2015), na modelagem matemática de secagem convectiva com radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera*, observou que para o modelo de Fick os coeficientes de determinação foram, em todos os experimentos realizados, superiores a 0,9798. Também, Silva et al. (2014), no estudo de modelos de predição da cinética de secagem de grãos de guandu também pode constatar este fato, onde, para os modelos de Fick com apenas dois termos o ajuste aos dados experimentais foram superiores a

0,9800 para as temperaturas utilizadas (40, 50, 60 70 °C), revelando a adequação do modelo na representação de curvas de secagem.

Em relação ao parâmetro de ajuste A, Ramalho (2018), na análise da cinética de secagem da batata doce por diferentes técnicas de secagem, constatou que para a equação de Fick com três termos e secagem realizada em *refractancewindow*, esta variável apresentou valores em torno de 0,8600 para as temperaturas de 60, 65 e 70 °C. Os valores obtidos são condizentes com os apresentados na Tabela 5, e apresentam afastamento semelhante do valor teórico ideal de 0,810.

Segundo Madamba (2003), bem como Zogzas et al. (1996), os produtos alimentícios encontram-se na faixa de difusividade de 10^{-11} a 10^{-9} m²/s. Estes valores são compatíveis com diversos resultados da literatura, tais como Ramalho (2018) e Doymaz et al. (2006).

Nascimento e Silva (2016), no estudo da desidratação osmótica do umbu- cajá: aplicação do modelo difusional, constataram resultados semelhantes na aplicação da lei de Fickem geometria esférica com quatro termos da série. Os mesmos relatam que para tempos de 240, 360 e 480 minutos, e concentração da solução osmótica de 40, 55 e 70 °Brix, os coeficientes de difusão efetivo permaneceram entre $2,34 \times 10^{-9}$ e $4,73 \times 10^{-9}$ m²/s.

5.3. Modelo de Page

Para modelagem matemática do modelo de Page, foi utilizada a Equação 8 para obtenção do ajuste aos dados experimentais. A Tabela 6 apresenta os valores obtidos para as constantes do modelo, K e n, bem como os coeficientes de determinação, R², para cada experimento. O Apêndice I traz o ajuste gráfico do modelo Page aos dados experimentais, exibidos nas Figuras 20 e 21.

É possível observar que ambos tratamentos exibiram ajustes elevados, variando entre 0,9954 e 0,9999. Já a constante K, apresentou valores oscilando entre 0,0008 e 0,0127 na etapa sem tratamento, enquanto no processo com tratamento exibiu variação entre 0,0888 e 0,0003. Para o parâmetro n, os valores variaram entre 1,0959 e 2,1657 para o processo sem tratamento e 0,8716 e 1,023 para o processo com

tratamento. Para esta constante, em um comparativo entre as condições aplicadas, é perceptível a obtenção de menores valores para a condição com pré-tratamento osmótico-ultrassônico.

Tabela 6 – Coeficientes determinação (R^2) e valores das constantes K e n calculados para o modelo matemático de Page nas temperaturas de 85 °C, 90 °C e 95 °C com e sem pré-tratamento osmótico.

PAGE						
EXPERIMENTO	SEM TRATAMENTO			COM TRATAMENTO		
	K	n	R^2	K	n	R^2
85 °C - 5 mm	0,0008	2,1657	0,9999	0,0888	0,8716	0,9999
90 °C - 5 mm	0,0006	1,6206	0,9954	0,0654	0,8623	0,9996
95 °C - 5 mm	0,0127	1,0959	0,9999	0,0003	1,023	0,9984

Fonte: Autoria Própria, 2019.

Bonomo et al. (2010), na cinética e modelagem da secagem de carambola em secador de bandeja, ao aplicar o modelo de Page obteve um resultado semelhante em relação aos valores de R^2 , onde os coeficientes de determinação para as temperaturas de 50, 60 e 70°C foram superiores a 0,9990. Também, Nicoletti e Alves (2016), no estudo da influência das variáveis de processo sobre a secagem osmo-convectiva de pimentão verde, relatam que para este modelo os coeficientes de determinação mostraram-se superiores a 0,9996 para as temperaturas empregadas de 40, 55 e 70 °C.

Analisando a Tabela 6, fica evidenciado que o processo com pré-tratamento osmótico ultrassônico apresentou menores valores para esta constante. Portanto, ao aplicarmos um processo de natureza osmótica e vibracional anterior a secagem em *refractantewindow* mais eficiente se torna a retirada de água do material. Martinazzo et al. (2007) relata que, para o modelo Page, o parâmetro n representa a

resistência interna do material analisado. Desta forma, quanto menor os valores apresentados menor a resistência a transferência de massa no interior a amostra.

5.4. Isotermas de dessorção

5.4.1. Modelo GAB

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos para as constantes do modelo, K, X_m e C do modelo GAB, bem como os coeficientes de determinação, R^2 , para cada experimento. Os ajustes do modelo aos dados experimentais foram elevados, com coeficientes de determinação superiores a 0,9682, com exceção do experimento a 85°C com tratamento, que apresentou R^2 igual a 0,8134. É possível observar graficamente os ajustes obtidos pelo modelo GAB nas Figuras 22 e 23, presentes no Apêndice I.

Tabela 7 – Coeficientes do modelo GAB e coeficiente de determinação (R^2) obtidos por regressão não linear para os processos com e sem tratamento.

GAB								
	SEM TRATAMENTO				COM TRATAMENTO			
EXPERIMENTO	K	X_m	C	R^2	K	X_m	C	R^2
85 °C - 5 mm	0,9265	0,8569	0,0305	0,9682	0,7449	6,9062	0,0159	0,8134
90 °C - 5 mm	0,8034	2,9445	0,0902	0,9687	0,9967	0,0343	0,0010	0,9996
95 °C - 5 mm	0,9617	0,5854	0,019	0,9998	0,8246	1,8705	0,059	0,9758

Fonte: Autoria própria, 2019.

Moreira et al. (2013) no estudo do comportamento das isotermas de adsorção do pó da polpa de manga liofilizada obtiveram resultados semelhantes para os

valores do coeficiente de determinação, onde, para as temperaturas utilizadas, 25, 30 e 35 °C, o respectivo R^2 mostrou-se superior a 0,9000. Também, Jesus (2002), no desenvolvimento e análise do processo de secagem de a-amilase por micro-ondas a vácuo obteve ajustes em torno de 0,9800, demonstrando a aplicabilidade do modelo GAB na representação de isotermas de dessorção.

Os parâmetros X_m , K e C do modelo demonstraram um comportamento semelhante, como exibido na Tabela 7, onde na temperatura média empregada, tanto no processo com tratamento como no processo sem tratamento, ocorre ponto de máximo ou de mínimo. Para a temperatura de 85° C e 95°C, para as amostras sem e com tratamento, os valores de umidade da monocamada (X_m) variam entre 0,8569 e 0,5854; 6,9062 e 1,8705, ocorrendo uma diminuição do X_m com o aumento da temperatura, com exceção das amostras a temperatura de 90° C, onde se nota um aumento para amostras sem tratamento e uma diminuição para amostras com tratamento.

Park et al. (2007), no estudo das isotermas de dessorção de *Calendula officinalis L.*: determinação experimental e modelagem matemática, obteve comportamento semelhantes com valores de X_m iguais a 0,038; 0,062 e 0,033, onde pode-se notar um aumento e depois uma diminuição com a elevação da temperatura Já para o parâmetro C, os valores descritos foram $7,110 \times 10^{-5}$; 6,914 e 41,06, enquanto o K exibiu 1,175; 0,889 e 1,072, nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C, respectivamente.

Além disto, Gouveia et al. (2004), na análise do ajuste das isotermas de dessorção da polpa de banana da variedade prata, relata a obtenção de valores de X_m , C e K nas temperaturas de 20, 30 e 40 °C iguais a 0,142, 2,869, e 1,673; 1,251, 0,012 e 0,014; 1,052, 1,004 e 1,005, respectivamente. Este comportamento oscilatório com ponto de máximo ou de mínimo na temperatura média ocorre com frequência na literatura, porém não consta referências acerca da explicação do comportamento variável destas constantes na equação de GAB.

5.4.2. Modelo de Chung

A partir da Tabela 8 é possível observar que os valores do coeficiente de determinação foram superiores a 0,9704. A constante A variou globalmente entre

826,19 e 2241,20, enquanto o parâmetro B entre 0,92 e 49,52. Os ajustes ao modelo Chung são exibidos nas Figuras 24 e 25, presente no Apêndice I.

Tabela 8 – Coeficientes do modelo de Chung coeficiente de determinação (R^2) obtidos por regressão não linear para os processos com e sem tratamento.

CHUNG						
EXPERIMENTO	SEM TRATAMENTO			COM TRATAMENTO		
	A	B	R^2	A	B	R^2
85 °C - 5 mm	826,19	1,23	0,9911	2241,20	3,38	0,9740
90 °C - 5 mm	1142,27	0,92	0,9792	2206,70	10,95	0,9806
95 °C - 5 mm	2104,79	49,52	0,9951	1684,00	2,03	0,9951

Fonte: Autoria Própria, 2019.

Marcinkowski (2006), no estudo da cinética de secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja, obteve coeficientes de determinação entre 0,8820 e 0,9261 ao aplicar este modelo. Também, Siqueira et al. (2016), no estudo das isotermas de sorção e propriedades termodinâmicas de sementes de maracujá doce, relata que os coeficientes de determinação do modelo de Chung foram elevados, permanecendo em torno de 0,9908. Além disto, em comparação aos demais modelos utilizados, Sabba, Copace e Sigma, este apresentou melhor resultado, sendo indicado pelos autores na representação da isoterma de dessorção.

Em termos gerais, o modelo Chung apresentou uma leve superioridade na representação das isotermas de dessorção em relação ao modelo GAB, apresentando melhores ajustes aos dados coletados em 4 dos 6 experimentos realizados

6. CONCLUSÕES

A partir dos objetivos propostos, os dados experimentais coletados e a discussão dos resultados desenvolvida, algumas conclusões podem ser formuladas:

- O pré-tratamento osmótico-ultrassônico se mostrou bastante influente no processo de secagem, uma vez que ocasiona uma redução do teor inicial de água do material, além de aumentar a velocidade de perda de umidade do mesmo;
- O modelo difusional de Fick exibiu valores de R^2 compatíveis satisfatórios, exibindo coeficientes de difusão efetiva coerentes com aqueles presentes na literatura;
- Para representação matemática de dados experimentais referentes à cinética de secagem, o modelo de Page se mostrou adequado, apresentando elevado coeficiente de determinação;
- Em relação ao ajuste de isotermas aos dados experimentais, o modelo de Chung demonstrou uma leve superioridade ao modelo teórico de GAB, embora ambos tenham apresentado elevados coeficientes de determinação e possam ser utilizados adequadamente na representação do processo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBA - Associação brasileira da batata. Batata Show, n.1, v.1. Disponível em: <http://www.abbabatatabrasileira.com.br/images/pdf/rbs_1.pdf>. Acesso em: janeiro 2019.

ALONSO, J.R. Tratado de fitomedicina: bases clínicas y farmacológicas. Buenos Aires: Isis Ediciones S.R.L., 1998.

ALVES, F. M. S.; MACHADO, A. V.; QUEIROGA, K.H. Alimentos produzidos a partir de farinhas de caju obtida por secagem. Revista Verde de Agroecologia e desenvolvimento Sustentável. Mossoró-RN, v.6, n.3, p.131-138, jul./set., 2011.

ARIAS, C. I. F. Efeito combinado do ultrassom e do pulso de vácuo sobre a cinética de secagem da banana verde (*Musa cavendishii*). 2017, 141 p. Tese – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

AZOUBEL, P. M.; CABRAL, A. C. P. L. F.; SILVA M. D. B.; OLIVEIRA, S. B. Modelagem matemática de cinética de secagem de manga. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Recife – PE, Brasil, 2008.

BEZERRA, T. S. Desidratação de hortaliças: aspectos teóricos. 2007, 54 p. Dissertação - Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2007. Disponível em: <http://www.bdm.unb.br/bitstream/10483/318/1/2007_TanyaSulamythaBezerra.pdf> Acesso em: janeiro, 2019.

BLUME, A.R.; GONÇALVES, A.A. Efeito da desidratação osmótica como tratamento preliminar na secagem do abacaxi. Estudos Tecnológicos, v. 4, n. 2, p.124-134, mai./ago. 2008.

BONOMO, P.; FONTAN, R. C.; CHAVES, M. A.; SANTOS, C. T. cinética e modelagem da secagem de carambola em secador de bandeja. Technology Acta Scientiarum, v. 32, n. 3, p. 309-313, ago. 2010.

BROD, F.P.R.; ALONSO, L.F.T.; PARK, K.J. Secagem de produtos agrícolas. In: XI SEMEAGRI – Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp, Campinas – SP, Brasil, 1999.

BUTZ, P.; TAUSCHER, B. Emerging technologies: chemical aspects. Food Research International, v. 35, n. 2-3, p. 279-284, abr., 2002.

CAMPOS, R. C.; OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T. A. S. Isotermas e calor isostérico das sementes de algodão comlinter e sem linter. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande - PB, v.15, n.3, p.283-292, 2013.

CASTOLDI, M. Estudo do processo de secagem de polpa de tomate por *refractance window*, 2012, 116 p. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

CEYLAN, I; AKTAS, M.; DOGAN, H. Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits. In: Applied Thermal Engineering 27. p. 1931-1936. ELSEVIER, 2007.

CORRÊA, I. C. M. Propriedades termodinâmicas de dessecção de água em farelo de soja. 2011, 52 p. Monografia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio grande do Sul, 2011.

CORREA, P. C.; BOTELHO, F. M. Isotermas de sorção de água de frutos de Coffeacanáfora. Rev. bras. eng. agríc. ambient. vol.18 no.10 Campina Grande – PB, out. 2014.

CRANK, J.A. The mathematics of diffusion: 2. ed. Oxford. University Press.:1975.

DOYMAZ, I. Air-drying characteristics of tomatoes. Journal of Food Engineering 78. ELSEVIER. 1291-1297, 2007.

EGEA, M.B.; LOBATO, L.P. Fruits and vegetables with osmotic dehydration pretreatment. v.21, n. 6, p. 1101-1114, fev., 2014.

EMBRAPA. Sistema de produção da batata. Embrapa hortaliças, 2ª ed., 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/hortalicas/batata>> Acesso em: dezembro, 2018.

FAOSTAT. Top production – Potatoes, countries by Commodity: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014. Disponível em: < <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> >. Acesso em: dezembro, 2018.

FERNANDES, A. L. Utilização de farinha de casca de batata inglesa na elaboração de pão integral. 2006, 144 p. Dissertação - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006. Disponível em: < <http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/2668/1/DISSERTAÇÃO>> Acesso em: dezembro, 2018.

FERNANDES, F.A.N., GALLÃO, M.I. & RODRIGUES, S. (2008). Effect of osmotic dehydration and ultrasound as pre-treatment on cell structure: melon dehydration. *LWT - Food Science and Technology*, 41, 604-610.

FUENTE-BLANCO, S.; SARABIA, E. R. F.; ACOSTA-APARICIO, V. M., BLANCOBLANCO, A.; GALLEGUO-JUAREZ, J. A. Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*. v. 44, p. 523–527, dez., 2006.

GARCIA, D. M. Otimização da desidratação osmótica e secagem do yacon (*Polymniasonchifolia*). 2004, 50 p. Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

GONÇALVES, A.C. Aptidões de genótipos de batata-doce para consumo humano, produção de etanol e alimentação animal. *Pesq. agropec. bras.* v.46, n.11, p.1513-1520, nov., 2011. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X2011001100013&script=sci_abstract&tlng=pt> Acesso em: dezembro, 2018.

GOUVEIA, J. P. G.; NASCIMENTO, J.; ALMEIDA, F.A.C.; SILVA, M.M.; FARIAS, E.S. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas de dessorção da banana prata. *Engenharia Agrícola*, v.24, n.3, p.799-806, 2004.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. Fundamentos de transferência de calor e de massa. Tradução e revisão técnica Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 2007, 643p.

JADOSKI, S. O.; SILVA, E.S. Caracterização histórica da cultura e prognóstico de evolução da produção de batata no Brasil. *Brazilian Journal of Applied Technology for*

Agricultural Science. v.8, n.1, p.99-106, jan./abr., 2015. Disponível em: < <https://revistas.unicentro.br/index.php/repaa/article/viewFile/4057/2899>> Acesso em: dezembro, 2018.

JANGAM, S. V.; MUJUMDAR, A. S. Drying of Foods, Vegetables and Fruits, v. 1, 2010.

JESUS, S. S. Desenvolvimento e análise do processo de secagem de a - amilase por micro-ondas a vácuo. 2002, 173 p. Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

JUSTUS, A. Influência da aplicação de ondas de ultrassom na desidratação osmótica de tomates. 2012, 118 p. Dissertação - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

KOTOVICZ, V. Otimização da desidratação osmótica e secagem do yacon (Polymniasonchifolia). 2011, 90 p. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, 2011.

LIMA JÚNIOR, A. F. et al. Cinética de secagem de folhas de Solanumlycocarpum A. St.-Hil. (fruta-de-lobo). Rev. Bras. Pl. Med., Botucatu, v.14, n.3, p.514-521, 2012. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbpm/v14n3/14.pdf>> Acesso em: dezembro, 2018.

LUIZ, M. R. Estudo teórico e experimental da secagem de tomate. 2012, 160 p. Tese - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - PB, 2012. Disponível em: < <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5324/1/arquivototal.pdf>> Acesso em dezembro, 2018.

MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried young coconut. Drying technology, v.21, n.9, p.1759-1780, 2003.

MANINMANI, A.; THYAGARAJAN, T.; SHUTA, S. Evolutionary algorithm-based multi garlie slices. Journalof Food Engineering. v.29, n.1, p. 75-97, 1996.

MARCINKOWSKI, E. A. Estudo da cinética de secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja. 2006, 128 p. Dissertação -Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2006.

Disponível em: < <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13433/000638112.pdf>>

Acesso em: janeiro, 2019.

MARTINAZZO A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; GONELI, A. L. G.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. Engenharia Agrícola, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 501- 510, 2007.

MENEZES, M. L; STROHER, A. P; PEREIRA, N.C; BARROS, S.T. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. Engevista. v.15, n.2, p. 176-186, 2013. Disponível em: <<http://periodicos.uff.br/engevista/article/viewFile/8938/6408>> Acesso em: dezembro, 2018.

MOREIRA, T. B.; ROCHA, E. M. F.; AFONSO, M. R.; COSTA, J. M. Ver. Bras. Eng. Agr. e Amb. Comportamento das isotermas de sorção do pó da polpa de manga desidratada. v.17, n.10, p.1093–1098, 2013.

NASCIMENTO, R. S.; SILVA., V. A. Desidratação Omótica do umbu-cajá: aplicação do modelo difusional. In: Congresso de Engenharia Química, Fortaleza - CE, Brasil, 2016.

NICOLETI, J. F.; ALVES, T. P. Influência das variáveis de processo sobre a secagem osmo-convectiva de pimentão verde. R. bras. Tecnol. Agroindustr., Ponta Grossa, v. 10, n. 1, p. 2022-2037, jan./jun. 2016.

NINDO, C. I.; FENG, H.; SHEN, G. Q.; TANG, J.; KANG, D. H. Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. Journal of Food Processing Preservation, 27, p. 117-136, 2003.

NINDO, C.; MWITHIGA, G. Infrared Drying. Em Infrared Heating For Food And Agricultural Processing. Ed. Pan, Z.; Atungulu, G. G. CRC Press, p. 89-100, 2011.

OCHOA-MARTÍNEZ, C. I.; QUINTERO, P. T.; AYALA, A.A.; ORTIZ, M. J. Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. Journal of Food Engineering, 109, 69–75, 2012.

OLIVEIRA, F. I. P. Influência do pré-tratamento ultrassom e desidratação osmótica na secagem, cor, textura e enzimas do mamão formosa. 2014, 120 p. Tese – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

OLIVEIRA, G. H.; ARAGÃO, D. M.; OLIVEIRA, A. P. L. Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. *Brazilian Journal of food technology*. Campinas, v. 18, n. 4, p. 314-321, out./dez. 2015

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. Campinas, fev., 2007.

PARK, K. J.; CORNEJO, F.E.P.; FABBRO, I.M.D. Considerações termodinâmicas das isotermas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.10, n.1, p.83-94, 2008.

PARK, K. J.; YADO, M.K.M.; BROD, F.P.R. Estudo de secagem de pêrabartlett (*pyrus* sp.) em fatias. *Ciênc. Tecnol. Aliment.* v.21 n.3. Campinas set./dez. 2001. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612001000300007> Acesso em: janeiro, 2019.

PEREIRA A. S. A evolução da batata no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Olericultura, 5, 2011. Horticultura Brasileira 29. Viçosa - MG, Brasil. ABH.S5701-S5710.

QUADROS, D. A.; IUNG, M.C.; FERREIRA, S.M.; FREITAS R. J. Composição química de tubérculos de batata para processamento, cultivados sob diferentes doses e fontes de potássio. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, 29(2): 316-323, abr.-jun. 2009 Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/cta/v29n2/13.pdf>> Acesso em: dezembro, 2018.

RAMALHO, W. J. C. R. Análise da cinética de secagem da batata doce por diferentes técnicas de secagem. 2018, 82 p. Monografia – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB.

REICHERT, L. J.; PADILLA, M. C.; GOMES, M. C.; CACERES, R. S. Análise socioeconômica da produção de batata nos municípios de Sanlúcar de Barrameda /

Espanha e São Lourenço do Sul / Brasil. Revista de Ciências Agrárias. v.35, n.1, p. 143-156, 2012.

RODRIGUES, A.E. Desidratação osmótica e secagem de maçãs, i. Comportamento do tecido em soluções osmóticas, ii. Modelagem matemática da difusão. 2003, 122 p. Dissertação – Universidade do Estado de São Paulo, São José do Rio Preto – SP, 2003.

ROSA, J. G. Secagem de cenoura (*Daucus carota* L.) em microondas. 2010, 96 p. Dissertação - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2010.

SEBRAE, 2015. Mercado de fruticultura. Boletim de Inteligência Outubro, p.1, 2015. Disponível em: <[http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/64ab878c176e5103877bfd3f92a2a68f/\\$File/5791.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/64ab878c176e5103877bfd3f92a2a68f/$File/5791.pdf)>. Acesso em: dezembro, 2018.

SCHMIDT, V. C. R.; SILVA, D. O. Comparação dos modelos matemáticos GAB e BET das isotermas de sorção de umidade para filmes de amido e filmes de acetato de amido. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 7 p., 2016.

SILVA, L. M.; SOUSA, F. C.; SOUSA, E. P.; MOREIRA, M. E. R.; MATA, C.; DUARTE, M. E. M. Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu. Campinas, v. 17, n. 4, p. 310-318, out./dez. 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/bjft/v17n4/1981-6723-bjft-17-4-310.pdf>> Acesso em abril, 2019.

SILVA, L.C.A. Efeito da desidratação osmótica assistida por ultrassom no processo de secagem convectiva de abacaxi pérola. 2012, 98 p. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2012.

SILVA, M. V. C. Secagem do cefalotórax de camarão rosa por refractance window e extração assistida por ultrassom de astaxantina utilizando oleína de palma. 2016, 79 p. Dissertação – Universidade Federal do Pará, Belém – PA, 2016.

SIQUEIRA, V. C.; ISQUIERDO, E. P.; QUEQUETO W. D., LUZ, P. B. Isotermas de sorção e propriedades termodinâmicas de sementes de maracujá doce. Revista Convibra, 2016.

SOUZA, A. S.; BORGES, S. V.; LEÃO, M. H. M.; CIRILLO, M. A. Isotermas de adsorção de cápsulas de ácidos graxos de cadeia curta (agcc): avaliação de modelos matemáticos. Curitiba v. 26, n. 2, p. 163-170, jul./dez. 2008.

SPERS, E. E.; BEGIATO, G. F.; CASTRO, L. T.; NEVES, M. F. Mercado de frutas secas. AGROANALYSES A revista de agronegócios da Fundação Getúlio Vargas. Dez. 2008. Disponível em: < [http://www.agroanalysis.com.br/12/2008 /mercado-negocios/novos-produtos-mercado-de-frutas-secas](http://www.agroanalysis.com.br/12/2008/mercado-negocios/novos-produtos-mercado-de-frutas-secas). Acesso em: dezembro, 2018.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOSKOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. Drying Technology, New York, v.14, n.10, p. 2225-2253, 1996.

ZOTARELLI, M. F. Produção e caracterização de manga desidratada em pó por diferentes processos de secagem. 2014, 165 p. Tese – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2014.

8. APÊNDICE I

Figura 18 – Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais sem tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C.

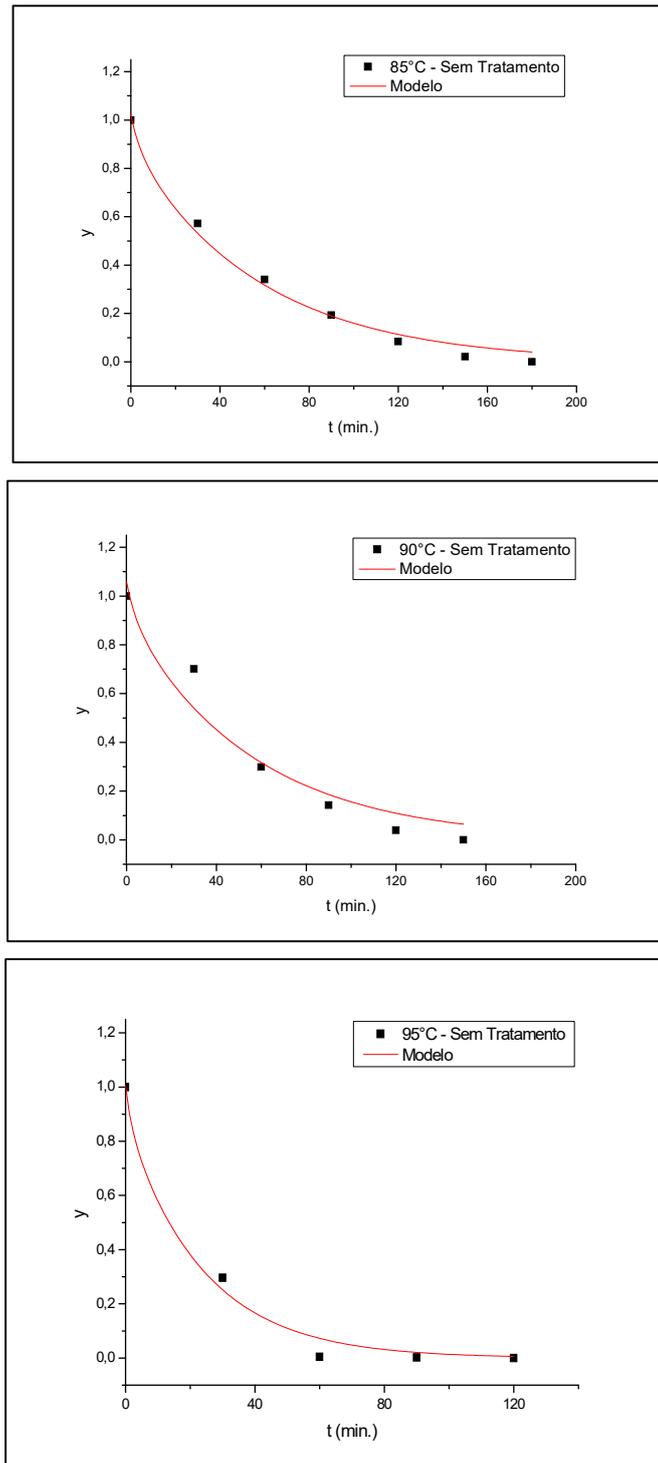


Figura 19 – Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais com tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C.

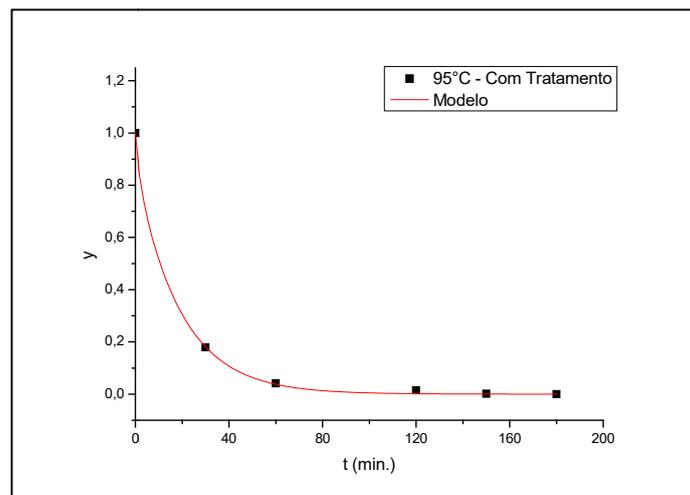
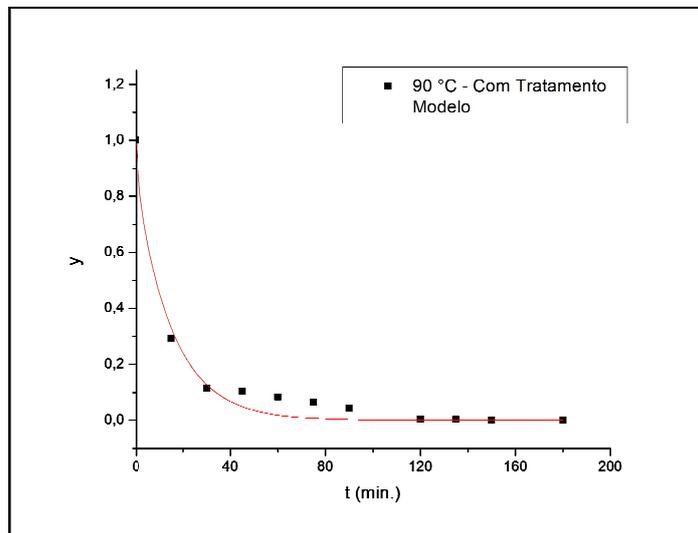
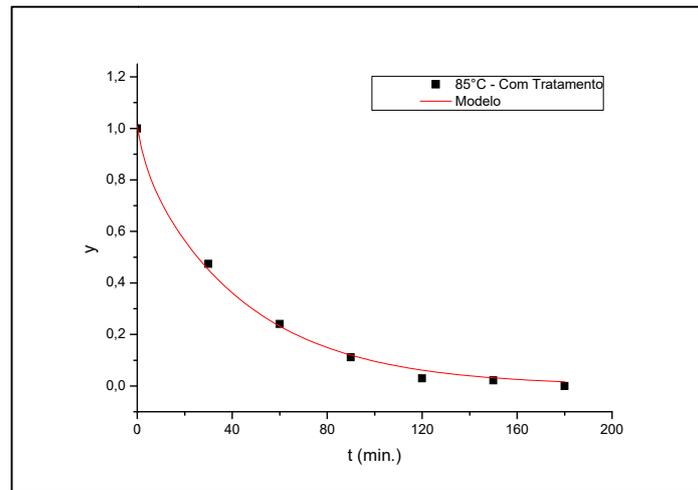


Figura 20 – Ajuste do modelo de Page ajuste aos dados experimentais sem tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C.

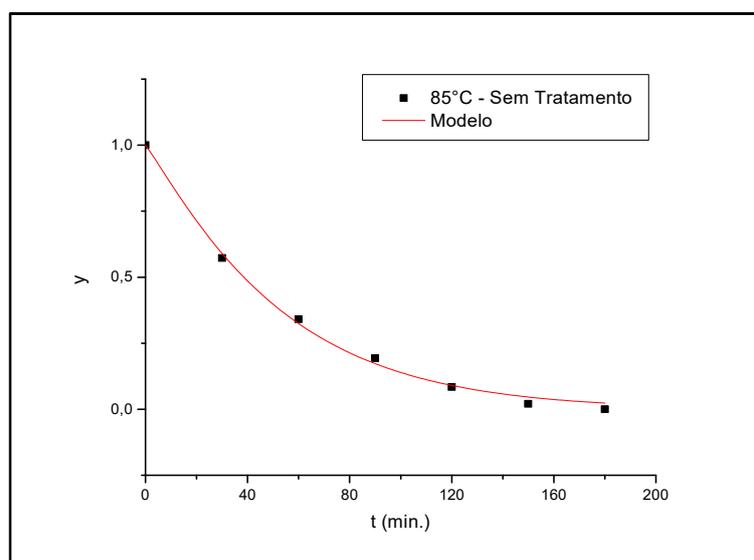
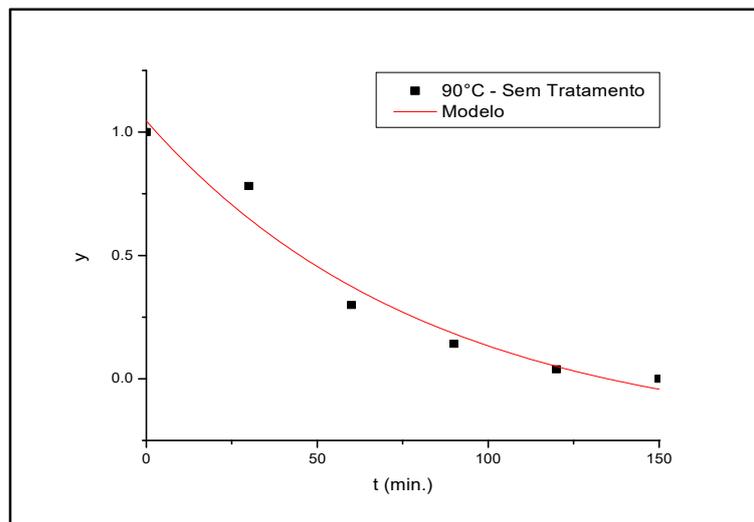
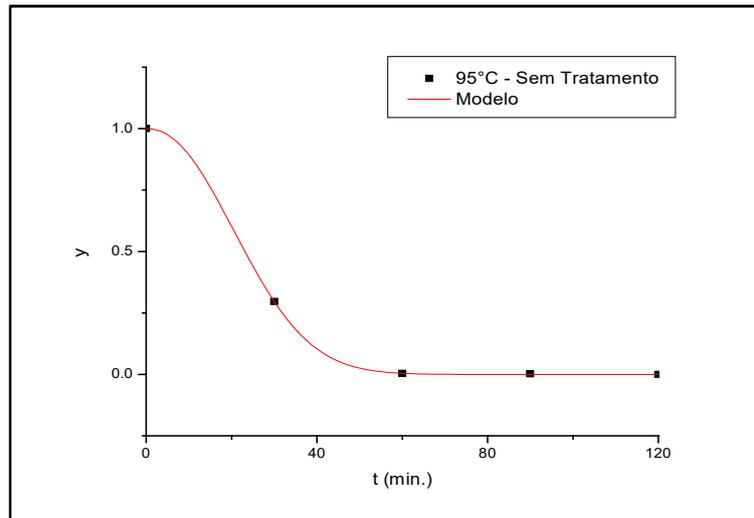


Figura 21 – Ajuste do modelo de Page ajuste aos dados experimentais com tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C.

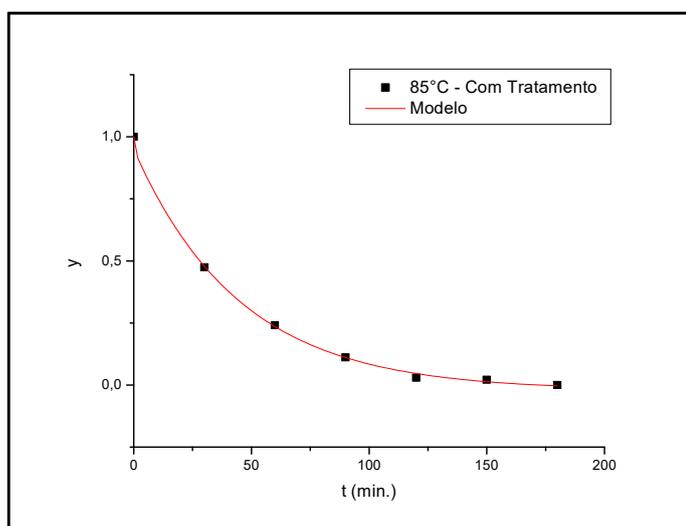
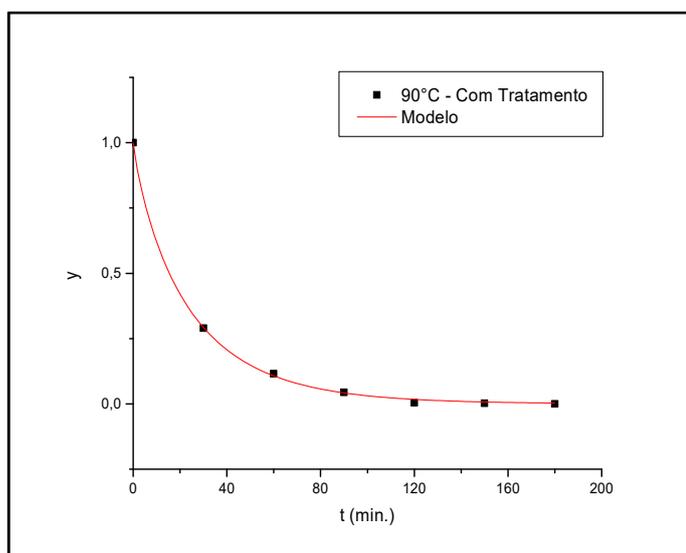
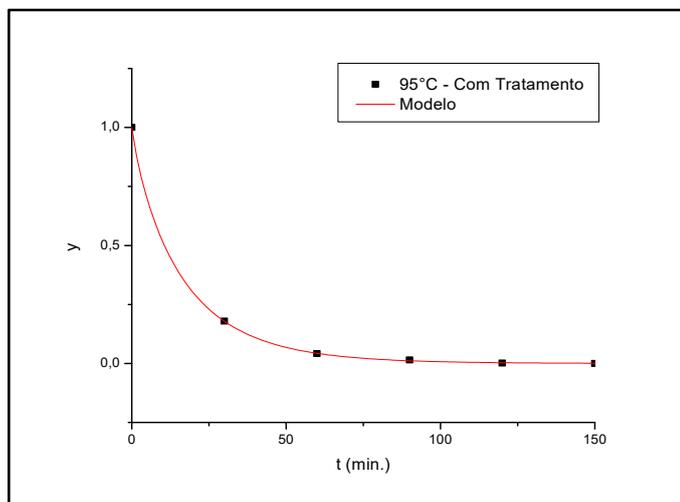


Figura 22 – Ajuste do modelo de GAB ajuste aos dados experimentais sem tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C.

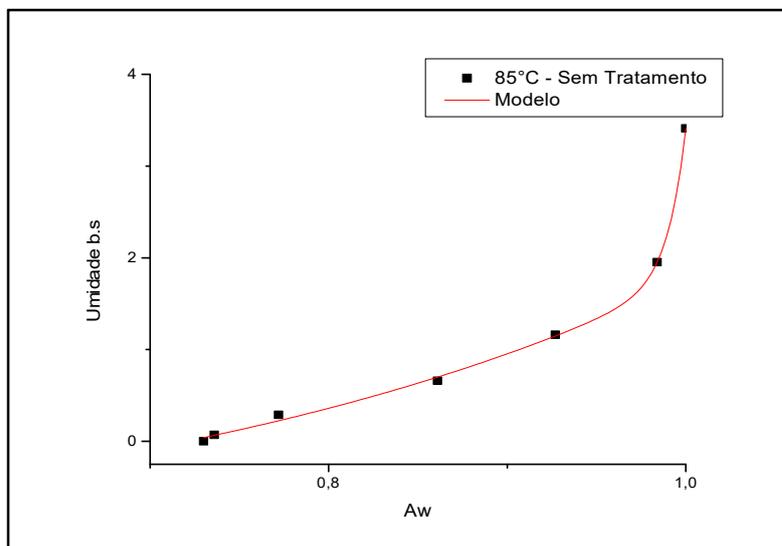
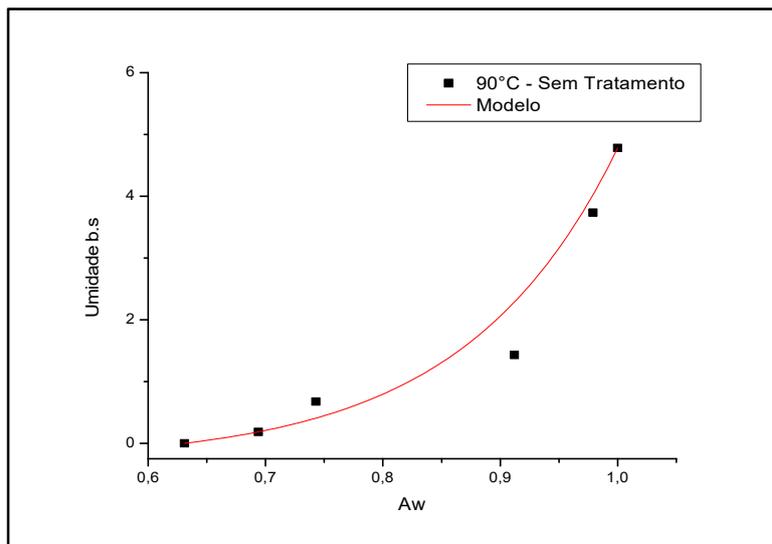
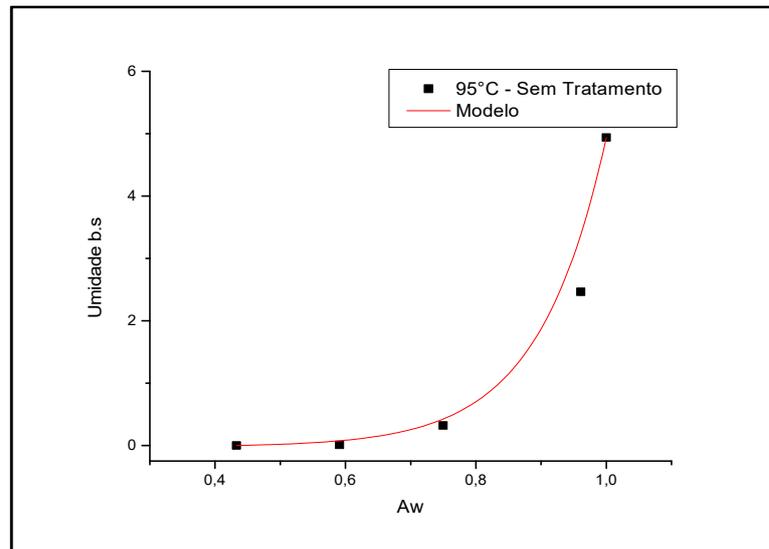


Figura 23 – Ajuste do modelo de GAB ajuste aos dados experimentais com tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C.

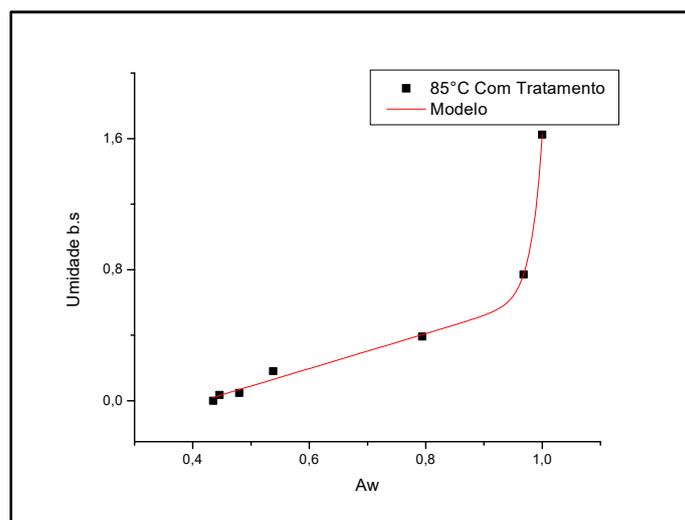
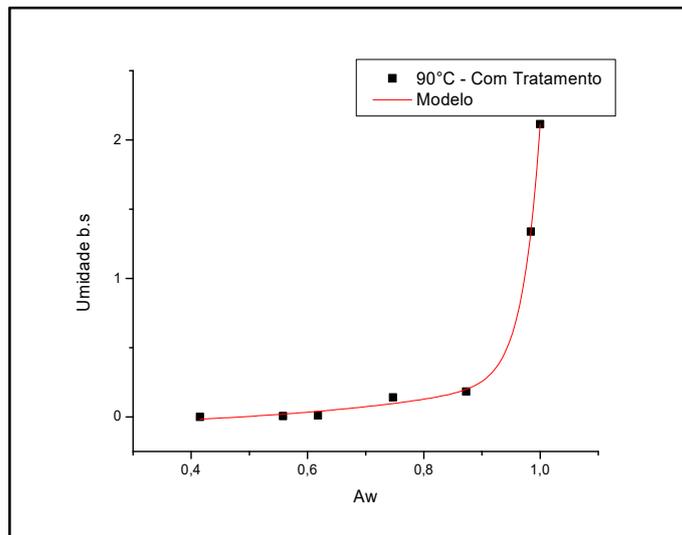
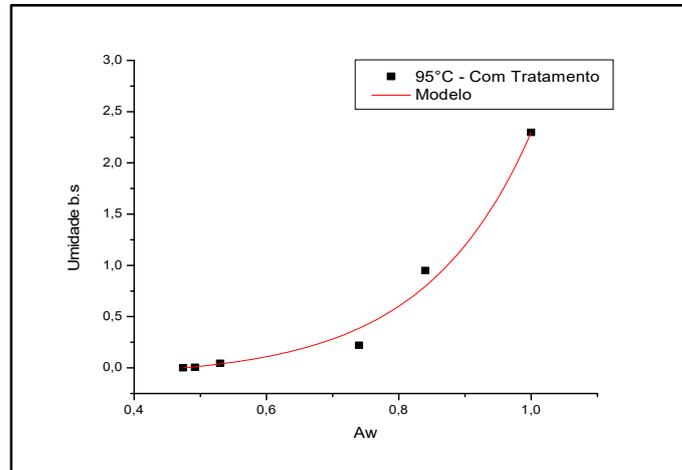


Figura 24 – Ajuste do modelo de Chung aos dados experimentais sem tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C.

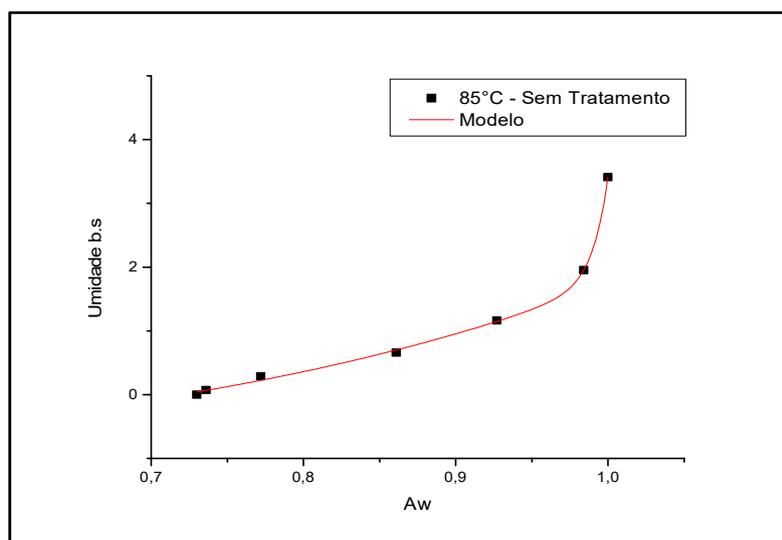
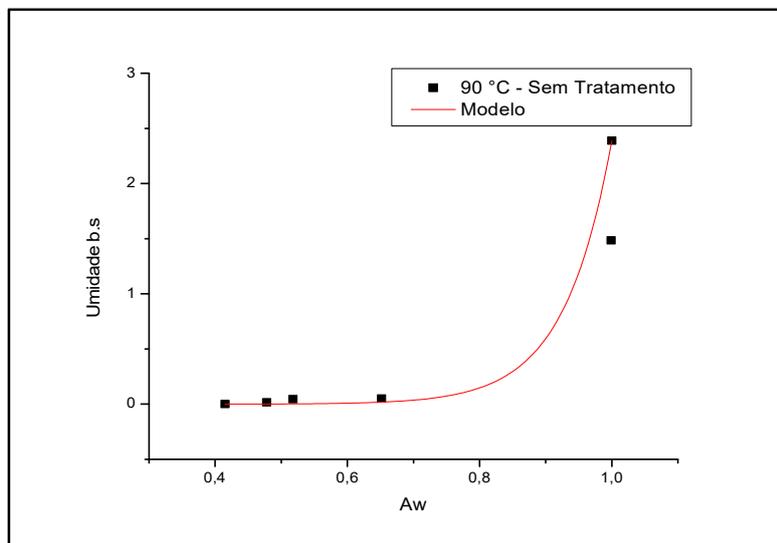
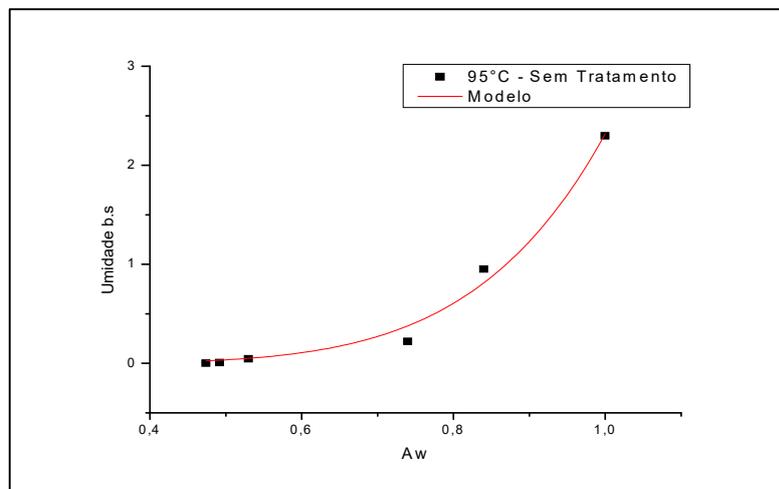


Figura 25 – Ajuste do modelo de Chung aos dados experimentais com tratamento nas temperaturas de 85, 90 e 95°C.

