

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

AMANDA PERUZZO DA MOTTA

**APLICAÇÃO DE MODELOS EMPÍRICOS PARA A CINÉTICA DE SECAGEM EM
CAMADA DE ESPUMA DA CAGAITA E DO MORANGO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**FRANCISCO BELTRÃO
2018**

AMANDA PERUZZO DA MOTTA

**APLICAÇÃO DE MODELOS EMPÍRICOS PARA A CINÉTICA DE SECAGEM EM
CAMADA DE ESPUMA DA CAGAITA E DO MORANGO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Química, do Departamento Acadêmico de Engenharia Química - DAENQ - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Química.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Junior Nicolin
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Bruna de Souza Nascimento

FRANCISCO BELTRÃO
2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Francisco Beltrão
Curso de Engenharia Química



TERMO DE APROVAÇÃO
Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2

APLICAÇÃO DE MODELOS EMPÍRICOS PARA A CINÉTICA DE SECAGEM EM
CAMADA DE ESPUMA DA CAGAITA E DO MORANGO

por
Amanda Peruzzo da Motta

Trabalho de Conclusão de Curso 2 apresentado às 13 horas e 00 min., do dia 23 de novembro de 2018, como requisito para aprovação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho _____ (Aprovado ou Reprovado).

Banca Avaliadora:

Prof. Dr. André Zuber
Coordenador do Curso

Prof. Dr. Douglas Junior Nicolin
Professor Orientador

Prof. Dr. Vilmar Steffen
Membro da Banca

Prof^(a). Dr^(a). Camila Nicola Boeri
Di Domenico
Membro da Banca

Prof^(a). Dr^(a). Michele Di Domenico
Professora TCC2

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus.

Agradeço aos meus pais, Ademar Guadalín da Motta e Elizete Maria Peruzzo da Motta, os quais me apoiaram e me deram suporte todos esses anos para que eu pudesse realizar meu sonho.

Ao meu irmão, Leonardo Peruzzo da Motta, o qual sempre me incentivou e me apoiou em todas as minhas decisões.

Aos meus amigos, os quais sempre foram suporte e motivadores em todos os momentos de dificuldades. Muito obrigada por estarem sempre presentes.

Ao meu namorado, Alessandro Retizlaf, o qual sempre acompanhou de perto minha rotina e me deu suporte, amor, carinho e atenção nos momentos que mais precisei.

Agradeço à minha coorientadora, Bruna de Souza Nascimento, a qual me incentivou desde o início da graduação e me inspirou como pessoa e como profissional, mesmo de longe. Muito obrigada.

Agradeço ao meu orientador, Douglas Junior Nicolín, por toda paciência, dedicação e suporte cedido a mim durante essa trajetória. Além de professor e orientador, é também um grande profissional apaixonado pelo que faz o qual me inspiro muito. Muito obrigada por tudo.

RESUMO

A cagaita é uma planta arbórea, a qual se destaca pela alta capacidade de produção de frutos. Seus frutos são amarelos, globosos e achatados, podendo conter um sabor ácido. Seu aproveitamento na culinária se dá por ela conter uma composição nutricional peculiar. Ela possui uma determinada quantidade de vitaminas A, C e B₆, cálcio, magnésio, ferro, proteínas, lipídios, carboidratos, fibra dietética e compostos fenólicos. Já o morango, é um fruto de tamanho pequeno, agrupado à planta por uma haste carnosa, apresentando cor vermelha quando maduro. O morango é uma fruta com alto valor nutritivo, onde é possível encontrar compostos fenólicos, como a vitamina C e flavonoides, especialmente da classe das antocianinas. Sabe-se que ambas as frutas possuem um alto teor de umidade, o que as tornam altamente perecíveis e susceptíveis a deterioração, impossibilitando seu consumo no período entressafras. Para minimizar os processos de deterioração desses frutos e tornar possível seu consumo em qualquer período do ano recomenda-se a aplicação de uma técnica de secagem, dentre elas destaca-se aqui a secagem via camada de espuma. Este método consiste basicamente na transformação da matéria-prima em uma espuma estável por adição de agentes espumantes e incorporação de ar ou outro gás, via agitação mecânica, em seguida a espuma é submetida à secagem com ar aquecido obtendo-se um pó. Com o intuito de descrever os fenômenos que acontecem durante a secagem, a modelagem matemática da cinética de secagem tem despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais variados produtos. A modelagem da cinética de secagem cumpre papel importante na condução deste processo uma vez que estabelece, de forma precisa, a relação da variação da umidade em função do tempo. Isto permite que o processo possa ser representado por uma equação matemática e, também, que sejam ajustados parâmetros que caracterizem a cinética em função de suas principais variáveis. Neste contexto, o objetivo do trabalho é modelar matematicamente a cinética de secagem em camada de espuma de cagaita e do morango para diferentes condições operacionais de temperatura de secagem, usando diferentes modelos empíricos, sendo eles: modelo de Dois Períodos, modelo de Page e o modelo de Midilli-Kucuk. Os ajustes dos modelos para os dados experimentais foram obtidos por regressão não linear, utilizando rotinas de programação desenvolvidas no *software* Scilab[®] versão 6.0.1. Após modelado, validou-se os parâmetros e os modelos estudados estatisticamente

por meio do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk e pelo Critério de Informação de Akaike. Com os resultados obtidos, o modelo de Dois Períodos mostrou-se mais representativo quando comparado aos outros modelos testados.

Palavras-chave: Cagaita. Morango. Secagem via camada de espuma. Modelagem empírica.

ABSTRACT

The cagaita is a tree plant, one qualifies for the high capacity of fruit production. Its fruits are yellow, globose and flat, and may contain an acid taste. Its consumption is a peculiar nutritional characteristic. The amount of vitamins A, C and BC, calcium, magnesium, iron, proteins, lipids, carbohydrates, dietary fiber and phenolic compound. The strawberry, is a small fruit, grouped to the plant by a fleshy hurry, presenting the red color when mature. Strawberry is a fruit with high nutritional value, where are the phenolic compounds, such as vitamin C and flavonoids, especially of the anthocyanin class. It is known that both fruits may have a moisture content, which may be more highly appreciable and susceptible to deterioration, making it impossible to consume them in the off-season. In order to minimize the fruit deterioration processes and to be useful at any time of the year, it is recommended to apply a drying technique, as is done by means of a foam layer. The method of the present invention relates to a method for the preparation of a foam in the presence of a foam. In order to describe the contexts that occur during drying, a mathematical modeling of the preparation of the dryer of interest to several researchers for the most varied products. The modeling of training kinetics plays an important role in the conduct of the process since it accurately establishes a relation of variation of function as a function of time. This allows the process to be represented by a mathematical equation and also to be fitted. In this context, the objective of the work is to mathematically model the drying kinetics of cagaite foam and strawberry for different operating conditions of drying temperature, using different empirical models, being: Two-period model, Page and model model of Midilli-Kucuk. The model adjustments for the experimental data were obtained by non-linear regression, using programming routines developed in Scilab® software version 6.0.1. After modeling, the parameters and models studied were statistically validated using the Shapiro-Wilk Normality Test and the Akaike Information Criterion. With the results obtained, the Two-period model was more representative when compared to the other models tested.

Keywords: Cagaita. Strawberry. Foam-mat drying. Empirical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cagaita (<i>Eugenia dysenterica</i> DC)	16
Figura 2 – Imagem ilustrativa do Morango	17
Figura 3 – Curvas típicas de secagem	19
Figura 4 – Mecanismo envolvido na secagem <i>foam-mat</i>	21
Figura 5 – Parâmetro N_0 do modelo de Dois Períodos em função da temperatura	30
Figura 6 – Parâmetro t_f do modelo de Dois Períodos em função da temperatura	30
Figura 7 – Constante cinética do modelo de Page em função da temperatura	31
Figura 8 – Parâmetro n_p do modelo de Page em função da temperatura	32
Figura 9 – Parâmetro a do modelo de Midilli-Kucuk em função da temperatura	32
Figura 10 – Parâmetro b do modelo de Midilli-Kucuk em função da temperatura	33
Figura 11 – Constante cinética do modelo de Midilli-Kucuk em função da temperatura	34
Figura 12 – Parâmetro n_M do modelo de Midilli-Kucuk em função da temperatura	34
Figura 13 – Comparação do desempenho dos três modelos para os dados experimentais da cagaita	35
Figura 14 – Modelo de Dois Períodos e dados experimentais da cagaita em função do tempo	38
Figura 15 – Parâmetro N_0 do modelo de Dois Períodos em função da temperatura	39
Figura 16 – Parâmetro t_f do modelo de Dois Períodos em função da temperatura	40
Figura 17 – Modelo de Dois Períodos e dados experimentais do morango em função do tempo	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos Empíricos clássicos de secagem	23
Tabela 2 – Condições operacionais para a secagem da cagaita via camada de espuma	29
Tabela 3 – Parâmetros obtidos para os modelos de Dois Períodos, Page e Midilli-Kucuk	35
Tabela 4 – Valores-p e MSE para os ajustes aos dados da cagaita seca em camada de espuma	36
Tabela 5 – Teste para o Critério de Informação de Akaike	37
Tabela 6 – Condições operacionais para a secagem do morango via camada de espuma	39
Tabela 7 – Parâmetros obtidos para o modelo de Dois Períodos	40
Tabela 8 – Valores-p e MSE para os ajustes aos dados do morango seco em camada de espuma	42

LISTA DE SÍMBOLOS

X	Teor de umidade do produto em base seca ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$) ou em base úmida ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{total}}$)
t	Tempo de secagem (h)
T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
X_e	Teor de umidade de equilíbrio do produto em base seca ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$) ou em base úmida ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{total}}$)
X_i	Teor de umidade inicial do produto em base seca ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$) ou base úmida ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{total}}$)
k	Constante cinética de secagem (min^{-1})
k_0	Constante cinética de secagem (min^{-1})
k_1	Constante cinética de secagem (min^{-1})
a	Coeficiente do modelo
b	Coeficiente do modelo
c	Coeficiente do modelo
n	Coeficiente do modelo
t_f	Tempo final de secagem para o modelo de Dois Períodos (h)
N_0	Taxa de secagem inicial para o modelo de Dois Períodos (h^{-1})
k_P	Constante cinética de secagem do modelo de Page (h^{-1})
n_P	Parâmetro do modelo de Page
k_M	Constante cinética de secagem do modelo de Midilli-Kucuk (h^{-1})
n_M	Parâmetro do modelo de Midilli-Kucuk
N_e	Número de dados experimentais
N_{P1}	Número de parâmetros do modelo 1
N_{P2}	Número de parâmetros do modelo 2
$\bar{\phi}_i$	Valor da função objetivo ao fim do ajuste dos parâmetros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	16
3.1	CAGAITA (<i>Eugenia dysenterica DC</i>)	16
3.2	MORANGO	17
3.3	SECAGEM	18
3.3.1	Comportamento da Cinética de Secagem	19
3.3.2	Secagem em Camada de Espuma (<i>foam-mat drying</i>)	20
3.4	MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM	22
3.4.1	Modelos de Secagem	22
4	MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1	PROCECIMENTOS EXPERIMENTAIS	25
4.2	MODELAGEM MATEMÁTICA	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	RESULTADOS OBTIDOS PARA A SECAGEM DA CAGAITA EM CAMADA DE ESPUMA	29
5.1.1	Ajuste dos Parâmetros	29
5.1.2	Desempenho dos Modelos	35
5.2	RESULTADOS OBTIDOS PARA A SECAGEM DO MORANGO EM CAMADA DE ESPUMA	38
5.2.1	Ajuste dos Parâmetros	38
5.2.2	Desempenho do Modelo	40
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
	APÊNDICE A – Rotina para os dados experimentais da secagem da cagaita em camada de espuma para o Modelo de Dois Períodos	50
	APÊNDICE B – Rotina para os dados experimentais da secagem da cagaita em camada de espuma para o Modelo de Page	52
	APÊNDICE C – Rotina para os dados experimentais da secagem da cagaita em camada de espuma para o Modelo de Midilli-Kucuk	53

APÊNDICE D – Rotina para os dados experimentais da secagem do morango em camada de espuma para o Modelo de Dois Períodos

55

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios do mundo é produzir alimentos para uma população, a qual não para de crescer. Nesse sentido, o Brasil surge como uma das maiores forças produtoras mundiais, com mais de 150 milhões de hectares cultivados (MELONI, 2003).

O Brasil possui diversos biomas espalhados por seu território e, destaca-se aqui, a região do Cerrado brasileiro, sendo um dos mais importantes polos de produção de alimentos do país, contribuindo com mais de 25% da produção nacional de grãos alimentícios (AVIDOS; FERREIRA, 2000).

O Cerrado abrange cerca de dois milhões de quilômetros quadrados e se estende por treze estados no interior brasileiro. Entretanto, sua forma de expansão agrícola no país tem negligenciado o potencial do uso de suas espécies nativas (SANO; FONSECA, 2003).

Dentre as várias espécies de frutos que existem no Cerrado, a cagaita é uma das que ganham destaque. A cagaita (*Eugenia dysenterica* DC.) é uma fruta exótica pertencente à família *Myrtaceae*. Ela é considerada uma espécie de interesse econômico, principalmente devido ao uso de sua polpa. Em sua composição, estão presentes proteínas, lipídios, carboidratos e fibra dietética, além de vitaminas A e C e compostos fenólicos (ROESLER et al., 2007).

Além do seu consumo fresco, há inúmeras preparações típicas que utilizam o sabor da sua polpa. Esse uso é difundido entre os moradores do Cerrado, onde várias preparações são feitas a partir da polpa, especialmente na produção de sorvetes, geleias, doces, licores e também na medicina popular como antidiarreica (ALMEIDA; SILVA; RIBEIRO, 1987).

Em alguns alimentos, como a cagaita, sabe-se que o conteúdo de água é o principal fator causador da deterioração por micro-organismos e alterações por reações químicas e enzimáticas. A diminuição desse conteúdo é um modo de conservação do produto (CELESTINO, 2010).

Mesmo não sendo do cerrado, outra fruta que se destaca é o morango. O morango pertence à família *Rosaceae*, a qual é do tipo herbácea, rasteira e perene. Sua parte comestível é considerado um pseudofruto, o qual é vermelho, suculento e carnoso (FERLA et al., 2007). Seu cultivo se dá em grande parte de Minas Gerais, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul. Além do seu consumo *in natura*, sua polpa

pode ser utilizada em vários processos industriais, tais como a fabricação de iogurtes, sucos, geleias, bolos e entre outras aplicações.

O morango possui um alto valor agregado, devido ao fato dele possuir valores nutricionais peculiares, pois ele contém compostos bioativos, polifenóis, vitaminas e minerais. Entre as substâncias que ele possui, os flavonoides, em especial as antocianinas, possuem uma característica especial para a regulação do metabolismo, sobretudo na prevenção de tumores e demais doenças (VENENCIO, 2010). Apesar de possuir esses valores nutricionais, o morango tem uma alta degradabilidade, pois possui, em média, 90-95% de água em seu interior, fazendo assim com que diminua seu tempo de prateleira, assim como ocorre com a cagaita.

A fim de aumentar a vida de prateleira desses frutos, bem como facilitar seu transporte e tornar possível o consumo em qualquer época do ano, recomenda-se a aplicação de um processo de secagem.

A secagem é uma operação unitária na qual observa-se os fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa. Durante o processo calor é transferido para o produto e um fluxo de massa é gerado devido a diferença de concentração existente entre o interior do alimento e o ambiente externo (WELT et al., 2007). Nesse sentido, o estudo do processo de secagem fornece informações relativas ao comportamento do fenômeno de transferência de calor e massa entre o material biológico e o elemento de secagem (CORRÊA et al., 2003).

A secagem de produtos agroindustriais consiste na remoção da umidade excessiva contida no interior do seu produto por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido, de modo a permitir a manutenção de sua qualidade durante o armazenamento por longos períodos de tempo, aumentando o tempo de vida útil do alimento (AFONSO; CORRÊA, 1999). Além disso, a secagem resulta em uma redução no tamanho do produto final, o que acarreta uma diminuição nos custos de embalagem, bem como no seu transporte e armazenamento.

Dentre os diversos métodos de secagem, destaca-se aqui o realizado em camada de espuma. Neste processo, alimentos líquidos são transformados em espumas estáveis, através de agitação e incorporação de agentes espumantes, e posteriormente submetidos à secagem (SEGURA et al., 1990; BERISTAIN et al., 1991). Uma das vantagens desse processo encontram-se aplicações de menores temperaturas durante o processo de secagem, quando comparada à convencional, diminuindo, assim, o seu tempo de operação.

Com o intuito de descrever os fenômenos que acontecem durante a secagem, a modelagem matemática da cinética de secagem tem despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais variados produtos. A modelagem da cinética de secagem cumpre papel importante na condução deste processo uma vez que estabelece, de forma precisa, a relação da variação da umidade em função do tempo. Isto permite que o processo possa ser representado por uma equação matemática e, também, que sejam ajustados parâmetros que caracterizem a cinética em função de suas principais variáveis. Isto evita, por exemplo, o levantamento de dados experimentais de secagem sempre que se deseja analisar este processo para um determinado material (DEFENDI et al., 2016; PINTO; LAGE, 2001).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é modelar matematicamente via modelos empíricos a cinética de secagem em camada de espuma de cagaita e do morango para diferentes condições operacionais de temperatura de secagem.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é modelar matematicamente a cinética de secagem em camada de espuma de cagaita e do morango para diferentes condições operacionais de temperatura de secagem.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Utilizar os modelos empíricos de Dois Períodos, Page e Midilli-Kucuk para descrever o processo de secagem da cagaita e do morango via camada de espuma, cedidos pela Universidade Federal de Lavras – UFLA;
- Ajustar os modelos propostos aos dados experimentais, obtendo seus parâmetros ótimos por meio de rotinas de programação desenvolvidas no *software* Scilab® versão 6.0.1;
- Comparar o desempenho dos modelos propostos;
- Validar os modelos estatisticamente.

3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

3.1 CAGAITA (*Eugenia dysenterica* DC)

O Cerrado é um dos biomas existentes no Brasil. Ele situa-se no Centro-Oeste do país, constituindo uma área de 2 milhões de quilômetros quadrados, além de uma vasta vegetação, recursos naturais e uma diversificação de frutas características dessa região. Dentre essas frutas características, encontra-se a cagaita (SANO; FONSECA, 2003).

A cagaita (*Eugenia dysenterica* DC) pertence à família *Myrtaceae*. Ela é uma planta arbórea, a qual se destaca pela alta capacidade de produção de frutos. Seus frutos são amarelos, globosos e achatados, podendo conter um sabor ácido, como mostra a Figura 1. Suas dimensões variam de 3 a 4 cm de comprimento e 3 a 5 cm de diâmetro (SILVA et al., 1994, SILVA; TASSARA, 2003).

Figura 1 – Cagaita (*Eugenia dysenterica* DC)



Fonte: Viveiro Ciprest (2017).

Sua polpa é muito utilizada na culinária da região, podendo ser aproveitada para o preparo de sucos, refrescos, sorvetes, doces, geleias e licores. Os frutos maduros, se consumidos em excesso, podem provocar reações intestinais desagradáveis como diarreias (AVIDOS; FERREIRA, 2000).

O aproveitamento dessa fruta na culinária se dá por ela conter uma composição nutricional peculiar. Ela possui uma determinada quantidade de vitaminas A, C e BC, cálcio, magnésio, ferro, proteínas, lipídios, carboidratos, fibra dietética e compostos fenólicos (ROESLER et al., 2007).

Sabe-se também que a cagaita é altamente perecível e não está disponível em períodos entressafra. Devido a essa perecibilidade e a sua indisponibilidade durante todo ano, estudos como a secagem podem permitir uma vida útil maior, como também conservação de suas características nutricionais.

3.2 MORANGO

Sabe-se que o morango originou-se do cruzamento natural de espécies oriundas da América do Norte, *Fragaria virginiana*, e do Chile, *Fragaria chiloenses*. O morango é cultivado em todos os continentes, com intensidade nos Estados Unidos, Espanha, Japão, Itália, Coréia do Sul e Polônia (REISSER JUNIOR et al., 2010). Já no Brasil, os principais estados produtores de morango são Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul.

O morango pertence à família das *Rosáceas*. A planta é rasteira e de porte pequeno, contendo três folíolos e flores brancas ou róseas. O fruto é de tamanho pequeno, agrupado à planta por uma haste carnosa, apresentando cor vermelha quando maduro, como mostra a Figura 2. Trata-se de um pseudofruto, visto que seus frutos, na verdade, são os pequenos pontos pretos e duros chamados de sementes (SILVA; TASSARA, 2001).

Figura 2 – Imagem ilustrativa do Morango



Fonte: Biosom (2018).

Sua polpa é consumida principalmente *in natura*, mas também pode ser aplicado em vários processos industriais, tais como a fabricação de iogurtes, sucos, geleias, bolos, etc.

O morango é uma fruta com alto valor nutritivo, onde é possível encontrar compostos fenólicos, como a vitamina C e flavonoides, especialmente da classe das antocianinas. Estas substâncias que estão presentes no morango contêm funções que permitem uma alta capacidade antioxidante, anticarcinogênica e antitrombótica, responsáveis por promover mais saúde aos consumidores do fruto (MUDNIC et al., 2009).

O morango é composto, em sua maior parte, por água. O fruto possui alto teor de umidade, que pode atingir 90-95% da parte comestível, tornando-o dessa forma altamente susceptível a deterioração e à desidratação (GEBHARDT et al., 2002). Por conta disso, estudos como a secagem, podem garantir a conservação de suas características nutricionais.

3.3 SECAGEM

A secagem é uma operação unitária que pode ser definida como sendo a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, a água) agregada a um sólido para uma fase gasosa insaturada através da vaporização térmica (FOUST et al., 1982). O processo tem como objetivo principal remover o excesso de água dos produtos, até que se atinja um nível de umidade ideal, contribuindo para o aumento do tempo de conservação e a vida útil do produto e, conseqüentemente, facilitando seu transporte, manuseio e armazenamento. Pode-se citar mais algumas vantagens em se utilizar a secagem como: promover a estabilidade dos componentes químicos à temperatura ambiente por longos períodos de tempo, oferecer proteção contra degradação enzimática e oxidativa, obter uma economia de energia por não necessitar de refrigeração e também ter a disponibilidade do produto durante qualquer época do ano quando se tem um período de safra pequeno (PARK et al., 2001).

Os sólidos a serem secos podem estar em diferentes formas e conter propriedades diferentes. O líquido a ser vaporizado pode estar na superfície do sólido, inteiramente dentro do sólido ou pode estar parte fora e parte de dentro do sólido. O teor de umidade do produto final seco varia, uma vez que depende do tipo de produto (MC CABE et al., 1993).

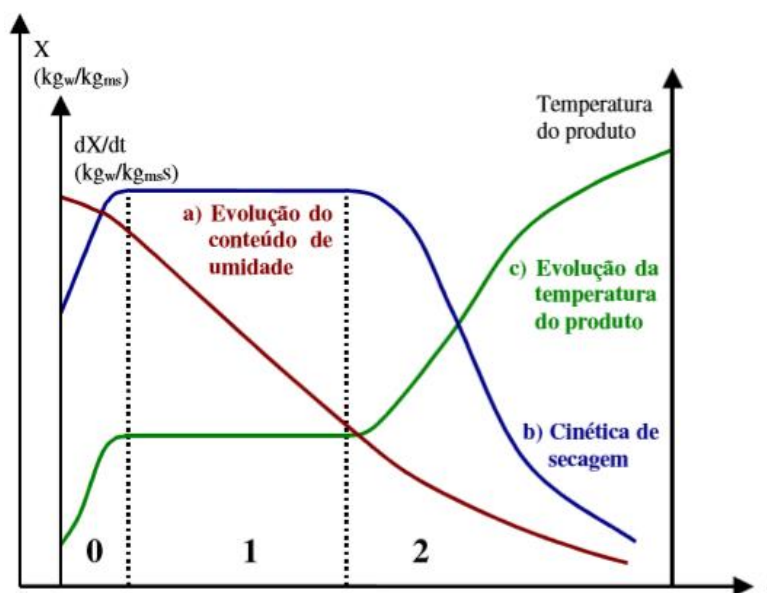
Os métodos de secagem podem ser classificados de várias maneiras. Eles podem ser divididos em processos em batelada, contínuo ou semi-contínuo. Esses

processos se distinguem, respectivamente, quando o material é introduzido no equipamento de secagem e o processo é realizado por um determinado período; quando o material é adicionado continuamente e, por último, quando a alimentação é feita de forma contínua (GEANKOPOLIS, 1998).

3.3.1 Comportamento da Cinética de Secagem

As propriedades de como está sendo feita a secagem junto com as características que cada produto a ser seco possui, determinam o comportamento e as condições que a secagem irá ocorrer. Entretanto, a transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é um fenômeno comum a qualquer condição de secagem. Para obtenção da curva, amostras de alimento são retiradas de tempos em tempos e a massa é anotada, assim, a umidade é determinada. Nesse sentido, o processo de secagem ocorre pela transferência de calor e massa, e pode ser dividido em três períodos, como mostra a Figura 3 (BROD et al., 1999).

Figura 3 – Curvas típicas de secagem



Fonte: Brod et al., (1999).

Segundo Brod et al (1999), a Figura 3 descreve as curvas típicas de secagem. A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto (conteúdo de umidade do produto em base seca (X)) durante a secagem, em relação à evolução do tempo de secagem (t).

A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto, variação do conteúdo de umidade do produto por tempo, (dX/dt) em relação à evolução do tempo (t), isto é, é a curva obtida diferenciando a curva (a).

A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto (T) em relação à evolução do tempo t), isto é, é a curva obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem. Os períodos 0, 1 e 2 representam os períodos de secagem.

O primeiro período (0) representa o início da secagem. Nele ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água).

O segundo período (1) caracteriza-se pela taxa constante de secagem. A água evaporada é a água livre. A transferência de massa e de calor é equivalente e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Enquanto houver quantidade de água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante.

No terceiro período (2), a taxa de secagem é decrescente. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa; o fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado.

O terceiro período (2) é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios. A complexidade dos fenômenos durante a secagem conduz os pesquisadores a proporem numerosas teorias e múltiplas fórmulas empíricas para prever a taxa de secagem.

3.3.2 Secagem em Camada de Espuma (*foam-mat drying*)

Entre os vários métodos de secagem, está a secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*). Este método consiste basicamente em um processo de conservação no qual o material é transformado em uma espuma estável por meio de batidura e incorporação de ar ou outro gás, que é submetida à secagem com ar

aquecido (KARIM; CHEEWAI, 1999). Essa técnica é geralmente usada para alimentos líquidos, como suco de frutas, ou semilíquidos, como polpas de frutas, os quais são difíceis de secar.

A Figura 4 aborda o mecanismo envolvido durante a técnica de secagem em camada de espuma.



Fonte: Dantas (2010).

Primeiramente, há a formação de espuma, a qual se caracteriza por sua grande superfície podendo ser estendida em camada delgada. Quando exposta a corrente de ar quente seca facilmente, devido ao movimento da umidade pelas forças capilares, através da película líquida que separa as bolhas da espuma (DANTAS, 2010).

Segundo Silva et al. (2005) e Travaglini (2001), a secagem em camada de espuma pode ser dividida em três etapas:

- 1) Transformação do suco ou da polpa em espuma estável, com aditivos;
- 2) Desidratação do material em camada fina até massa constante;
- 3) Desintegração da massa seca em escamas, formando o pó.

Esse processo pode ser executado em temperaturas relativamente baixas, em torno de 70°C ou menos, e mantém alta qualidade e boa estabilidade dos produtos.

As principais vantagens da técnica de secagem em espuma, quando comparadas a outros métodos de secagem são: o processo ser relativamente simples, barato, temperaturas de secagem mais baixas e tempos de secagem mais curtos. Essas vantagens estão relacionadas a sua maior área superficial exposta ao ar de secagem, que acelera o processo (BRYGIDYR et al., 1977).

3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM

A modelagem matemática pode ser definida como um conjunto de equações, de extrema importância que descrevem com precisão os processos industriais. Cada modelo possui a sua peculiaridade em função das características de cada processo a ser analisado (CASTIGLIONI et al., 2013).

Dentre os processos em que se utilizam a simulação matemática, destaca-se a cinética de secagem. Nesse processo, empregam-se modelos que representam a perda de umidade em função do tempo necessário para ocorrer a secagem.

Por meio das curvas da cinética de secagem de produtos agroindustriais, é possível obter informações relevantes para o desenvolvimento do processo estudado, tal como o dimensionamento de equipamentos, o tempo necessário da secagem para não danificar o produto, o gasto energético do equipamento, bem como a quantidade produzida, dados que agregam valor ao produto final (VILELA; ARTUR, 2008).

Sendo assim, vários autores vêm estudando o aperfeiçoamento de diversos modelos para os mais variados tipos de produtos agroindustriais.

3.4.1 Modelos de Secagem

Na literatura existem vários modelos que permitem analisar a secagem de produtos agrícolas, sendo eles teóricos, empíricos e semi-empíricos.

Os modelos teóricos, que descrevem a taxa decrescente de secagem de um sólido, consideram, geralmente, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (MARTINAZZO et al., 2007).

Os modelos semi-empíricos relacionam modelos empíricos com argumentos baseados em fundamentos de transferência de massa. Esse tipo de modelo pode usar como base a Lei de Newton do resfriamento aplicada à transferência de massa. Geralmente, consideram-se condições isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade se restringe apenas à superfície do produto. (MARTINAZZO et al., 2007).

Já para os modelos empíricos usa-se dados experimentais e análises adimensionais. Estes modelos estabelecem uma relação direta entre o conteúdo médio de água e o tempo de secagem. Eles negligenciam os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros não têm qualquer significado físico. No

entanto, apesar de não darem uma visão clara e precisa dos fenômenos que acontecem durante a secagem, eles podem descrever a curva de secagem, para as condições em que foi realizado o estudo (PANCHARIYA et al., 2002; KEEY, 1972; BROOKER et al., 1992). A Tabela 1 apresenta alguns tipos de modelos empíricos para representar a cinética de secagem de produtos agroindustriais (FARIA et al., 2012; OLIVEIRA, et al., 2014).

Tabela 1 – Modelos Empíricos clássicos de secagem

Modelo	Equação
Aproximação por Difusão	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot b \cdot t)$
Dois Termos	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$
Exponencial de Dois Termos	$\frac{(X_i - X_e)}{(X - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$
Henderson e Pabis	$\frac{(X_i - X_e)}{(X - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
Henderson e Pabis Modificado	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$
Lewis	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = \exp(-kt)$
Midilli-Kucuk	$\frac{(X_i - X_e)}{(X - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$
Newton	$\frac{(X_i - X_e)}{(X - X_e)} = \exp(-k \cdot t)$
Page	$\frac{(X_i - X_e)}{(X - X_e)} = \exp(-k \cdot t^n)$
Thompson	$\frac{(X_i - X_e)}{(X - X_e)} = \frac{\exp\{-a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0,5}\}}{2 \cdot b}$
Verma	$\frac{(X_i - X_e)}{(X - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$
Wang e Sing	$\frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$

Fonte: Adaptado Faria et al. (2012).

Onde:

X – teor de umidade do produto em decimal (base seca);

X_e – teor de umidade de equilíbrio do produto em decimal (base seca);

X_i – teor de umidade inicial do produto em decimal (base seca);

k, k₀ e k₁ – constantes de secagem em min⁻¹;

a, b, c, n – coeficientes dos modelos;

t – tempo de secagem em min.

Sendo assim, os modelos utilizados para esse trabalho, serão os modelos de Page, Midilli-Kucuk (vide Tabela 1) e o modelo de Dois Períodos.

A utilização dos dois primeiros modelos se deu por conta da literatura, onde grande parte dos estudos desses materiais, como a cagaita e o morango, possuem um bom ajuste aos dados experimentais. Em relação à escolha do terceiro modelo se deu por ser um modelo diferente dos convencionais e por não conter tantos estudos utilizando-o.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 PROCECIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os dados experimentais utilizados para cinética de secagem, umidade em função tempo de secagem da cagaita e do morango foram disponibilizados pela Universidade Federal de Lavras – UFLA. Esses dados foram obtidos via secagem em camada de espuma durante a Iniciação Científica e Trabalho de Conclusão de Curso das discentes Iana Helena Matos Leal Vicente e Luiza Teixeira, do curso de Engenharia de Alimentos, orientadas pela Prof.^a Dr.^a Bruna de Souza Nascimento.

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Com posse dos dados experimentais, foram ajustados modelos de cinética de secagem para dados de umidade em função do tempo, para diferentes temperaturas de secagem da espuma da cagaita e do morango. Posteriormente, modelou-se matematicamente o processo da cinética de secagem da cagaita e do morango, por meio de modelos empíricos. Os modelos utilizados foram: modelo de Dois Períodos (EFREMOV, 2013), modelo de Page (1949) e o modelo de Midilli-Kucuk (2002). As Equações (1), (2) e (3), mostram as equações que definem cada modelo, respectivamente. Todas as simulações foram realizadas no *software* Scilab[®], versão 6.0.1.

$$X = X_i - N_0 \left[t - \left(t_f - \frac{(X_i - X_e)}{N_0} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{N_0 \sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{(t_f - t)}{N_0 t_f - X_i + X_e} \right) \right] \quad (1)$$

Onde:

X – teor de umidade do produto em base úmida ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{total}}$);

X_e – teor de umidade de equilíbrio do produto em base úmida ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{total}}$);

X_i – teor de umidade inicial do produto em base úmida ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{total}}$);

t – tempo de secagem (h);

t_f – tempo final de secagem (h) (parâmetro a ser ajustado);

N_0 – taxa de secagem inicial (h^{-1}) (parâmetro a ser ajustado);

erfc – função de erro complementar.

$$X = X_e + (X_i - X_e) \exp(-k_p \cdot t^{n_p}) \quad (2)$$

Onde:

X – teor de umidade do produto em base úmida ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{total}}$);

X_e – teor de umidade de equilíbrio do produto em base úmida ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{total}}$);

X_i – teor de umidade inicial do produto em base úmida ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{total}}$);

t – tempo de secagem (h);

k_p – constante cinética de secagem do modelo de Page (h^{-1}) (parâmetro a ser ajustado);

n_p – parâmetro do modelo de Page (parâmetro a ser ajustado).

$$X = X_e + (X_i - X_e) a \cdot \exp(-k_M \cdot t^{n_M}) + b \cdot t \quad (3)$$

Onde:

X – teor de umidade do produto em base úmida ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{total}}$);

X_e – teor de umidade de equilíbrio do produto em base úmida ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{total}}$);

X_i – teor de umidade inicial do produto em base úmida ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{total}}$);

t – tempo de secagem (h);

k_M – constante cinética de secagem do modelo de Midilli-Kucuk (h^{-1}) (parâmetro a ser ajustado);

a , b e n_M – parâmetros do modelo de Midilli-Kucuk (parâmetro a ser ajustado).

Os parâmetros dos modelos foram ajustados pelo método de Levenberg-Marquardt (LEVENBERG, 1944; MARQUARDT, 1963), por meio de regressão não linear, o qual tem o intuito de minimizar uma função-objetivo, que é definida como o quadrado da diferença entre os valores calculados por um modelo e os valores observados experimentalmente. O comando utilizado pelo *software* Scilab® versão 6.0.1 que inclui esse método foi o “lsqrsolve”. Todas as rotinas utilizadas estão apresentadas nos Anexos A, B, C e D. A Equação (4) apresenta a função objetivo que foi minimizada.

$$\Phi = \sum_{i=0}^N (X_{cal}^i - X_{exp}^i)^2 \quad (4)$$

Após, utilizou-se métodos estatísticos para a avaliação do melhor modelo. Os testes realizados foram: Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965), com 95% de significância, e o Teste de Critério de Informação de Akaike (AKAIKE, 1973).

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk com 95% de significância fornece o parâmetro valor de prova (valor-p, *p-value* ou significância), que pode ser interpretado como a medida do grau de concordância entre os dados e a hipótese nula (H_0), sendo H_0 correspondente à distribuição normal. Quanto menor for o valor-p, menor é a consistência entre os dados e a hipótese nula. Então, a regra de decisão adotada para saber se a distribuição é normal ou não é rejeitar H_0 : (i) se $\text{valor-p} \leq \alpha$, rejeita-se H_0 , ou seja, não se pode admitir que o conjunto de dados em questão tenha distribuição normal; (ii) se $\text{valor-p} > \alpha$, não se rejeita H_0 , ou seja, a distribuição normal é uma distribuição possível para o conjunto de dados em questão (LOPES; et al., 2013).

Já o teste de Critério de Informação de Akaike foi utilizado para decidir qual dos modelos propostos se adequa melhor aos dados experimentais. O teste foi originalmente desenvolvido por Akaike (1973), onde se calcula um critério para a seleção de modelos, o ΔAIC . O modelo que apresentar o menor valor de ΔAIC tem maior probabilidade de ser o modelo correto. (AKAIKE, 1973; BURNHAM; ANDERSON, 2002). A Equação (5) apresenta o cálculo de ΔAIC para a comparação dos modelos.

$$\Delta AIC = N_e \ln \left[\frac{(\bar{\phi}_1)^2}{(\bar{\phi}_2)^2} \right] + 2(N_{P1} - N_{P2}) \quad (5)$$

Onde:

N_e – número de dados experimentais;

N_{P1} – número de parâmetros do modelo 1;

N_{P2} – número de parâmetros do modelo 2;

$\bar{\phi}_i$ – valor da função objetivo ao fim do ajuste dos parâmetros.

Para o caso em que $\Delta AIC < 0$, o teste sugere que o modelo mais complexo tem maior probabilidade de descrever corretamente os dados experimentais. Isto se dá, pois, a inserção de mais um parâmetro aumenta a complexidade do modelo, mas

contribui de forma a diminuir a diferença entre os valores calculados pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente (MOTULSKY; CHRISTOPOULOS, 2003). Caso $\Delta AIC > 0$, a inserção de mais parâmetros ao modelo causa uma complexidade desnecessária, que não contribui com o aumento da capacidade de descrição do modelo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA A SECAGEM DA CAGAITA EM CAMADA DE ESPUMA

5.1.1 Ajuste dos Parâmetros

Para o ajuste dos parâmetros de cada modelo, utilizou-se das condições operacionais de secagem, como as condições de umidade inicial e umidade de equilíbrio, ambas em base úmida, para as temperaturas de 40, 60 e 80°C. Essas condições estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições operacionais para a secagem da cagaita via camada de espuma

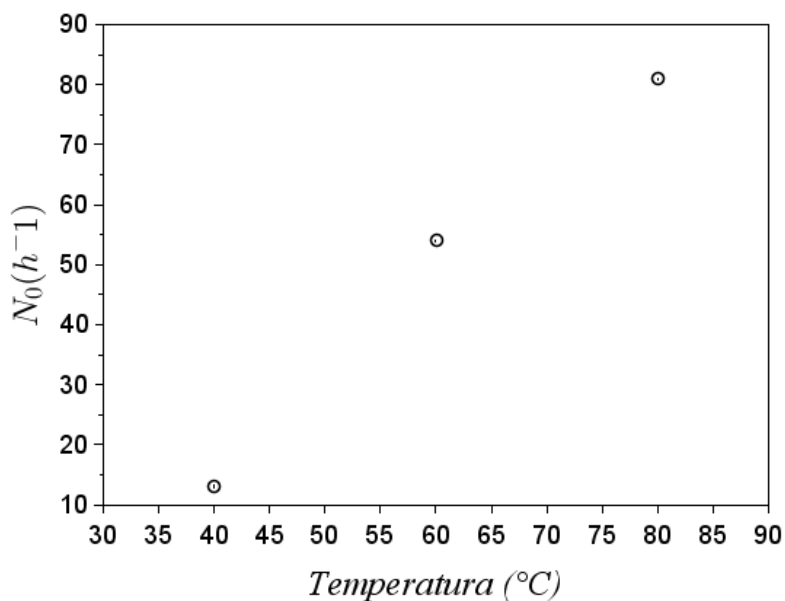
Temperatura (°C)	X_i (kg _{água} /kg _{total})	X_e (kg _{água} /kg _{total})
40	94,12512	0,01155
60	94,51662	0,17290
80	91,05021	0,14386

Fonte: Autoria própria (2018).

A Figura 5 apresenta os parâmetros ajustados para o modelo de Dois Períodos em função da temperatura. Nela pode-se observar que a taxa de secagem inicial (N_0) aumenta conforme o aumento da temperatura, não havendo uma sobreposição dos intervalos de confiança a 95%.

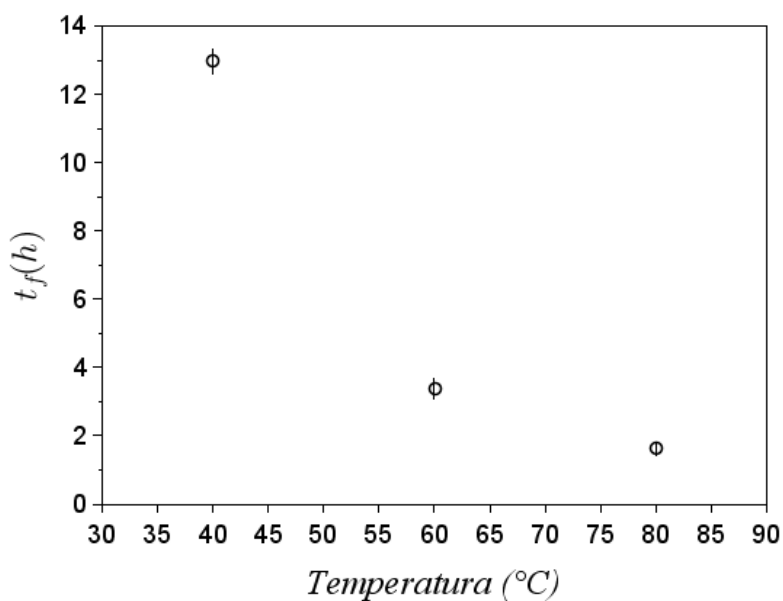
Já para o parâmetro de tempo final de secagem (t_f), conforme mostra a Figura 6, não ocorre o mesmo comportamento. Pode-se observar que o tempo final de secagem diminui com o aumento da temperatura, o que se é esperado pois, quanto maior a temperatura que se emprega durante a secagem de um produto, menor será o tempo requerido para o processo. Pode-se notar, também, que não houve uma sobreposição dos intervalos de confiança a 95%. A não sobreposição dos intervalos de confiança com 95% de confiança sugere a influência da temperatura no comportamento dos parâmetros é estatisticamente significativa.

Figura 5 – Parâmetro N_0 do modelo de Dois Períodos em função da temperatura



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 6 – Parâmetro t_f do modelo de Dois Períodos em função da temperatura

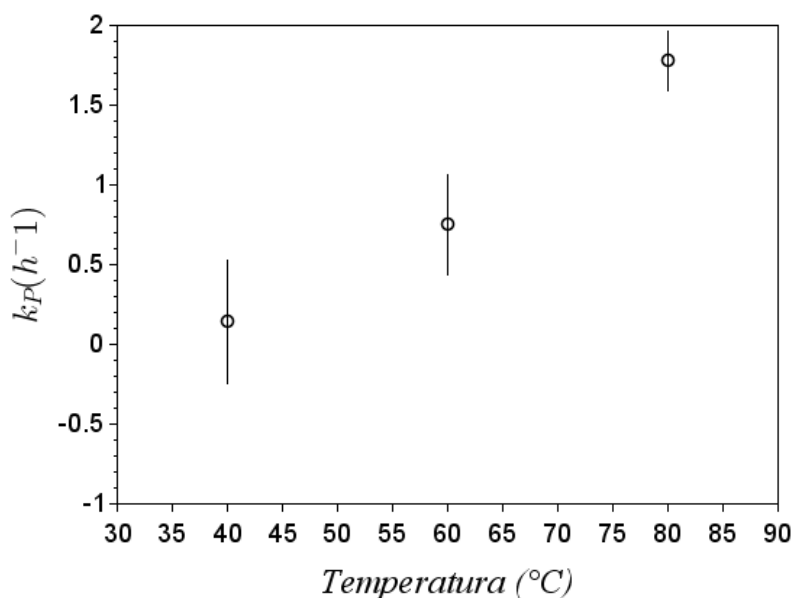


Fonte: Autoria própria (2018).

Para os parâmetros do modelo de Page, pode-se observar um crescimento da constante cinética do modelo (k_p) com o aumento da temperatura, conforme mostra a Figura 7. Nota-se também que, ocorre sobreposição dos intervalos de confiança entre as temperaturas de 40 e 60°C. Isto sugere que não é possível afirmar

estatisticamente que a mudança de 40 para 60°C afetou o parâmetro k_p . Este comportamento não é observado na transição entre 60 e 80°C.

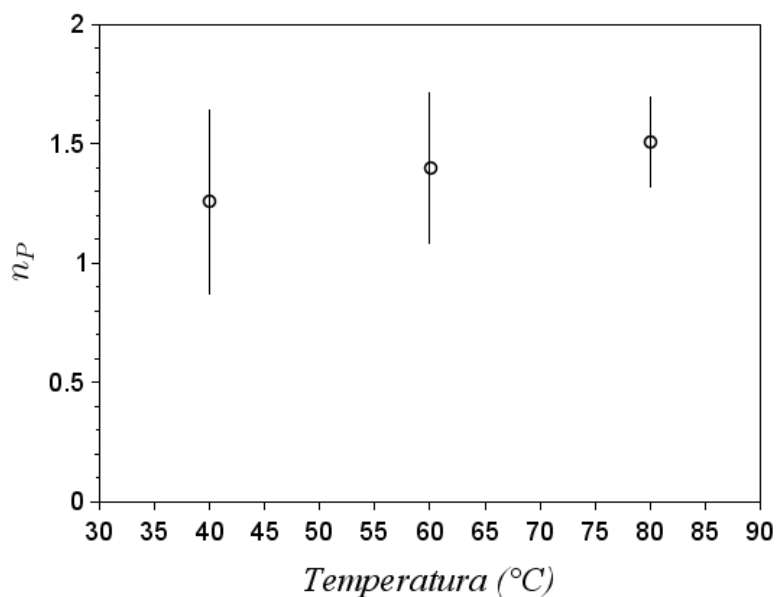
Figura 7 – Constante cinética do modelo de Page em função da temperatura



Fonte: Autoria própria (2018).

Quando observados os valores do parâmetro n_p do modelo de Page, na Figura 8, nota-se que há um leve aumento dele em função do aumento da temperatura. O fato de que nas três temperaturas de secagem houve sobreposição dos intervalos de confiança sugere que não é possível afirmar que há diferenças estatísticas entre os valores de n_p para o modelo de Page. Portanto, conclui-se que a temperatura não afeta de forma significativa o comportamento deste parâmetro, ou seja, é possível afirmar que ele permanece constante com o aumento da temperatura. Outro fato que chama a atenção na tentativa de aplicar o modelo de Page aos dados da cagaita é que o intervalo de confiança para o valor de k_p a 40°C incluir o zero (o mínimo do intervalo é negativo e o máximo do intervalo é positivo). Isto indica que há a probabilidade de que k_p possa ser igual a zero. Isto faria com que ele pudesse ser desconsiderado no modelo para a descrição dos dados nesta temperatura. Porém, a desconsideração deste parâmetro remove a dependência do tempo do modelo de Page. Resultados como este geralmente estão associados à falta de adequação do modelo aos dados, ou seja, ao desempenho ruim do modelo na descrição da curva cinética nesta temperatura.

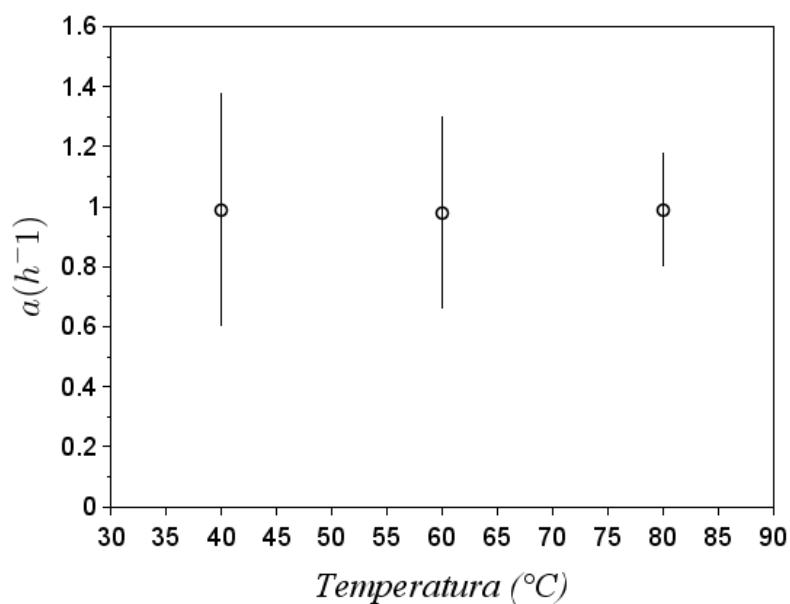
Figura 8 – Parâmetro n_p do modelo de Page em função da temperatura



Fonte: Autoria própria (2018).

A Figura 9 apresenta o parâmetro a para o Modelo de Midilli-Kucuk, a qual mostra que o parâmetro não sofre alterações com o aumento da temperatura, gerando um resultado em torno de 1 h^{-1} para ambas as temperaturas.

Figura 9 – Parâmetro a do modelo de Midilli-Kucuk em função da temperatura

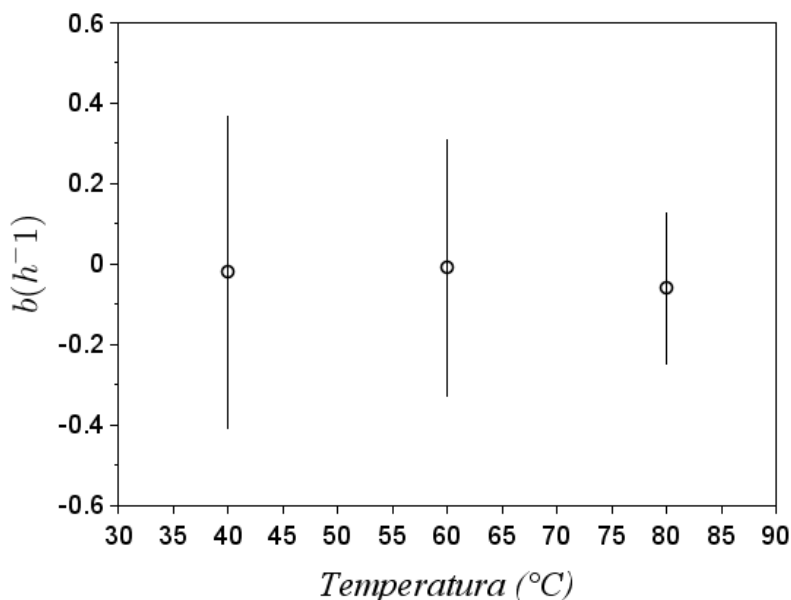


Fonte: Autoria própria (2018).

Já para o parâmetro b , como mostra a Figura 10, indica um valor de aproximadamente 0 h^{-1} para valores de temperaturas diferentes. Como já comentado

anteriormente, é possível afirmar que tanto o parâmetro a quanto o parâmetro b não tem seu comportamento afetado pela temperatura, pois há sobreposição dos intervalos de confiança em ambos os casos.

Figura 10 – Parâmetro b do modelo de Midilli-Kucuk em função da temperatura



Fonte: Autoria própria (2018).

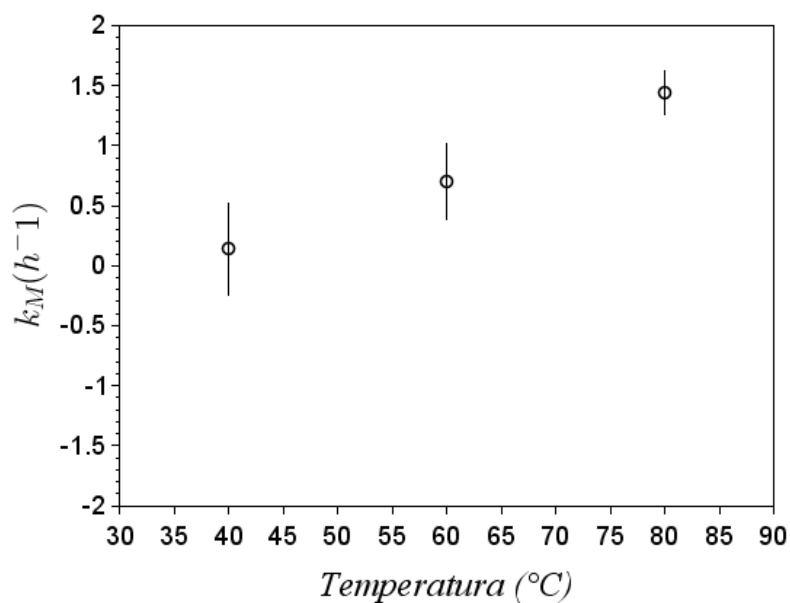
Analisando a Equação (2) do Modelo de Page e a Equação (3) para o modelo de Midilli-Kucuk, pode-se perceber que o Modelo de Midilli-Kucuk, quando aplicado aos dados de secagem da cagaita, é nada mais que o Modelo de Page Modificado. Isto pode ser concluído pela análise das Figuras 9 e 10. As figuras apresentam, respectivamente, que $a \rightarrow 1$ e que $b \rightarrow 0$. A equivalência estatística resultante da sobreposição dos intervalos de confiança sugere que este comportamento se repete para todas as temperaturas de secagem. Aplicando nos modelos estas hipóteses, é possível concluir que os modelos de Page e de Midilli-Kucuk são equivalentes quando aplicados aos dados cinéticos da secagem da cagaita.

As Figuras 11 e 12 apresentam, respectivamente, o comportamento dos parâmetros k_M e n_M do modelo de Midilli-Kucuk em função da temperatura.

É possível observar que o parâmetro k_M (Figura 11) apresenta comportamento muito similar ao parâmetro k_p do modelo de Page. A equivalência entre estes dois modelos demonstrada anteriormente conduziu a esta similaridade de comportamento para as constantes cinéticas.

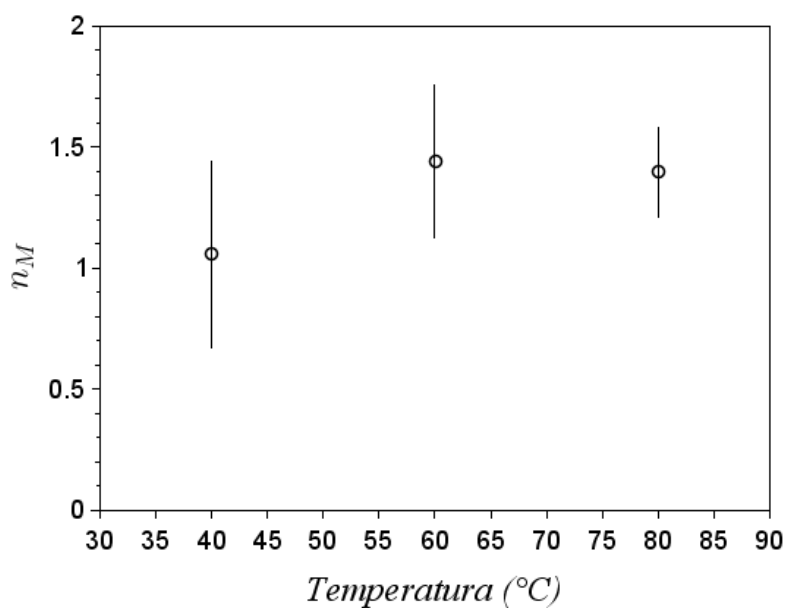
O parâmetro n_M não apresentou uma tendência nítida em função do aumento da temperatura. Porém, a sobreposição dos intervalos de confiança para todas as temperaturas sugere que este parâmetro não teve seu comportamento afetado de forma significativa pela temperatura de secagem.

Figura 11 – Constante cinética do modelo de Midilli-Kucuk em função da temperatura



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 12 – Parâmetro n_M do modelo de Midilli-Kucuk em função da temperatura



Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 3 mostra resumidamente todos os parâmetros obtidos para os três modelos estudados na secagem da cagaita via camada de espuma.

Tabela 3 – Parâmetros obtidos para os modelos de Dois Períodos, Page e Midilli-Kucuk

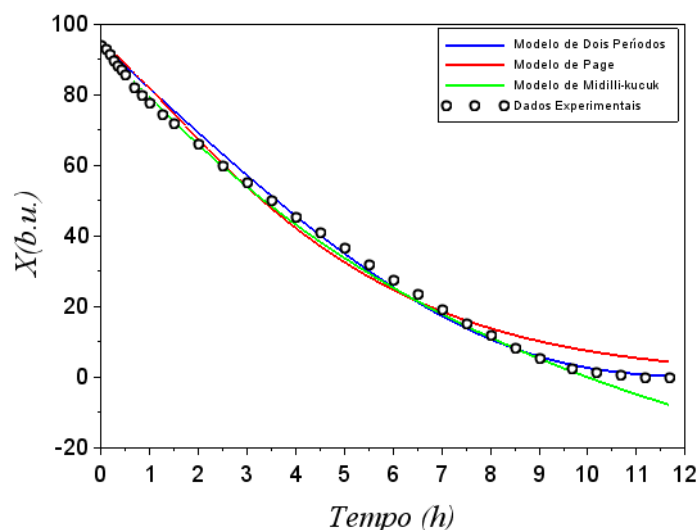
Temperatura (°C)	Dois Períodos		Page		Midilli-Kucuk			
	N_0 (h ⁻¹)	t_f (h)	k_p (h ⁻¹)	n_p	a	b	k_M (h ⁻¹)	n_M
40	13,15	12,99	0,14	1,26	0,99	-0,02	0,14	1,06
60	53,96	3,39	0,75	1,40	0,98	-0,01	0,70	1,44
80	81,08	1,63	1,78	1,51	0,99	-0,06	1,44	1,40

Fonte: Autoria própria (2018).

5.1.2 Desempenho dos Modelos

A Figura 13 apresenta a comparação dos três modelos utilizados neste trabalho, os modelos de Dois Períodos, Page e Midilli-Kucuk, com dados experimentais de umidade da cagaita seca em camada de espuma, em função da temperatura de 40°C. É nítida a menor capacidade descritiva dos modelos de Page e Midilli-Kucuk, principalmente na região da passagem do estado transiente da secagem (altas taxas de transferência de massa) para o estado estacionário (taxas de transferência de massa praticamente nulas). Pode-se observar, também, que os dados experimentais são bem descritos por quase toda a curva do modelo de Dois Períodos (curva azul) quando comparado com os outros, confirmando um melhor ajuste deste.

Figura 13 – Comparação do desempenho dos três modelos para os dados experimentais da cagaita para 40°C



Fonte: Autoria própria (2018).

Para avaliar a qualidade dos ajustes dos modelos, foi feito o teste de Shapiro-Wilk com nível de confiança de 95%, conforme descrito no material e métodos. Esse teste avalia se os resíduos entre os valores calculados pelo modelo e os dados experimentais fazem parte de uma distribuição normal em torno da média zero. Se isto acontecer, significa que a maioria dos resíduos são muito próximos ou exatamente zero, o que é desejável. A distribuição dos resíduos em torno da média zero indica que o modelo se adequa satisfatoriamente aos dados experimentais, apresentando poucos desvios entre os valores calculados e os valores obtidos experimentalmente. Para isto, é necessário que valor-p do teste seja maior ou igual à 0,05 (SACULINGGAN; BALASE, 2013; SHAPIRO; WILK, 1965).

A Tabela 4 apresenta os valores-p calculados pelo teste de Shapiro-Wilk e os valores da média dos resíduos quadráticos (MSE).

Tabela 4 – Valores-p e MSE para os ajustes aos dados da cagaita seca em camada de espuma

Temperatura (°C)	Dois Períodos		Page		Midilli-Kucuk	
	valor-p	MSE	valor-p	MSE	valor-p	MSE
40	0,1708	4,7028	0,0268	11,8365	0,6744	2,4078
60	0,3175	0,3821	0,1011	2,8824	0,4211	1,7139
80	0,3558	0,3712	0,7173	4,7676	0,6041	1,1937

Fonte: Autoria própria (2018).

Observando os resultados obtidos, pode-se perceber que o teste para o modelo de Page falha para a temperatura de 40°C, onde resultou em um valor-p igual à 0,0268, isto indica que nestas temperaturas o modelo não se adequou tão bem aos dados experimentais e apresentou desvios que podem comprometer a descrição dos mesmos.

Os baixos valores obtidos de MSE para o modelo de Dois Períodos corroboram a qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais, quando comparado aos outros modelos.

Para a confirmação do melhor modelo que se ajustasse aos dados experimentais, optou-se pelo teste do Critério de Informação de Akaike (Akaike Information Criterion – AIC, (AKAIKE, 1973)). O teste é adequado para a escolha do melhor modelo para o caso em que um é mais complexo, e o outro é mais simples. Outro critério é que os modelos que estão sendo avaliados sejam modelos que possuam o mesmo conjunto de dados experimentais (BURNHAM; ANDERSON, 2002;

MOTULSKY; CHRISTOPOULOS, 2003). A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para o teste de Akaike. A comparação por meio do teste de Akaike foi feita somente entre os modelos de Dois Períodos e de Midilli-Kucuk, visto que os modelos de Page e de Midilli-Kuck apresentaram similaridade quando aplicados aos dados de secagem da espuma de cagaita.

Tabela 5 – Teste para o Critério de Informação de Akaike

ΔAIC		
Temperatura (°C)	Modelo de Dois Períodos	Modelo de Midilli-Kucuk
40	19,6299	-19,6299
60	-27,0812	47,4470
80	-15,3388	34,2368

Fonte: Autoria própria (2018).

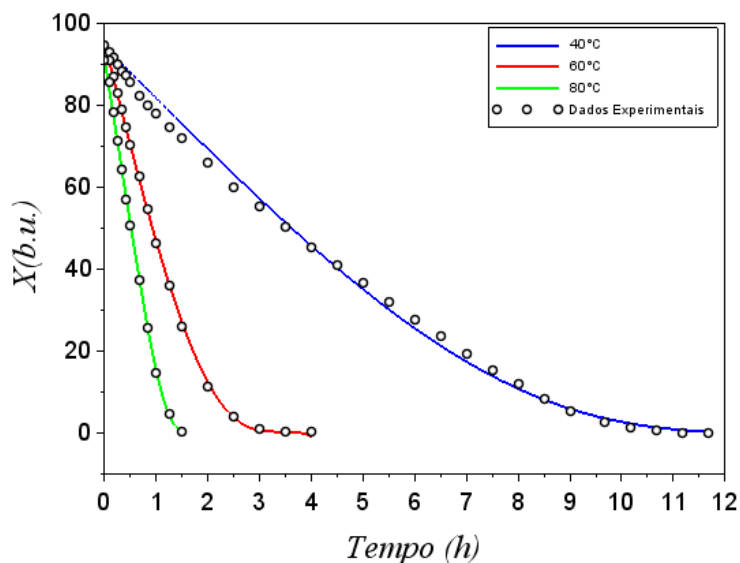
Como é possível observar na Tabela 5, os valores do teste de Akaike foram menores para o modelo de Dois Períodos para as temperaturas de 60 e 80°C e os valores de ΔAIC foram negativos para elas. Isto indica que o modelo de Dois Períodos tem maior probabilidade de ser o modelo mais adequado para representar o conjunto de dados experimentais considerado para as temperaturas de 60 e 80°C. Embora o teste de Akaike sugira que o modelo de Midilli-Kucuk represente melhor os dados na temperatura de 40°C, é possível observar pela Figura 13 que este resultado se deve à maior aproximação do modelo aos dados na região altamente transiente da secagem. Após a transição para a região estacionária, o modelo de Midilli-Kucuk perde eficiência e prevê, inclusive, valores negativos para a umidade. Este fato possibilita afirmar que o modelo de Dois Períodos é o mais indicado para toda a faixa de temperaturas abordadas experimentalmente neste trabalho.

A Figura 14 apresenta os dados experimentais da cagaita em função do tempo para o modelo de Dois Períodos considerando as três temperaturas estudadas. Como é possível observar, este modelo apresentou um bom ajuste aos dados experimentais para as três temperaturas.

A Figura 14 também mostra que quando a cagaita foi submetida à uma temperatura de 40°C, ela atingiu sua umidade de equilíbrio em aproximadamente 12 horas de secagem. Para 60 e 80°C, obteve-se um tempo de secagem de aproximadamente de 4 e 1,5 horas, respectivamente. Isso se dá pelo fato de que é necessário mais tempo para uma menor quantidade de energia aplicada ao sistema (40°C) e menos tempo para quando se há uma maior quantidade de energia.

Vicente (2018) mostrou que, para os dados experimentais da cagaita seca em camada de espuma, o modelo que melhor se ajustou foi o de Page. Comparando os resultados mostrados de valor-p anteriormente, o modelo de Dois Períodos então seria robusto quando se trata desses tipos de dados, mesmo quando o modelo de Page é considerado adequado pela literatura.

Figura 14 – Modelo de Dois Períodos e dados experimentais da cagaita em função do tempo



Fonte: Autoria própria (2018).

5.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA A SECAGEM DO MORANGO EM CAMADA DE ESPUMA

5.2.1 Ajuste dos Parâmetros

Como mencionado anteriormente, o modelo de Dois Períodos se ajustou melhor para o estudo da secagem da cagaita em camada de espuma. Sendo assim, optou-se por utilizar o mesmo modelo para os dados experimentais da secagem do morango em camada de espuma.

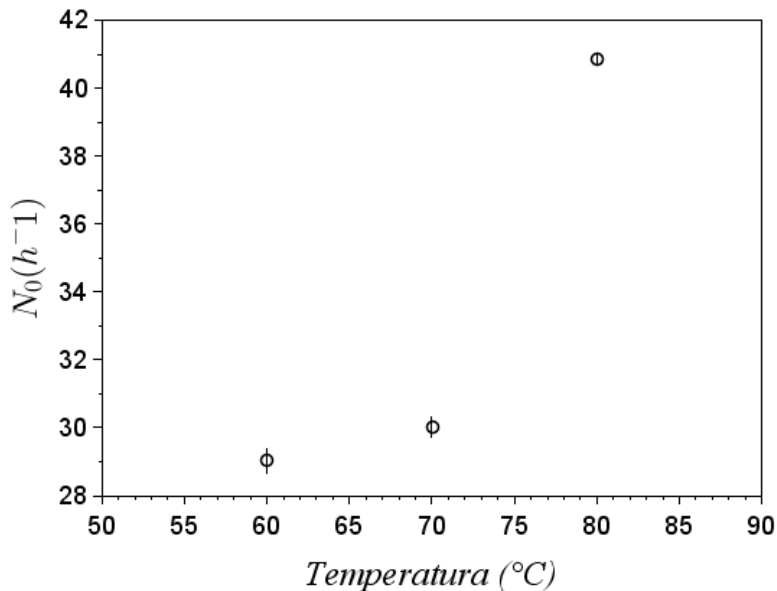
Para o ajuste dos parâmetros do modelo de Dois Períodos, utilizou-se das condições operacionais de secagem, como as condições de umidade inicial e umidade de equilíbrio, ambas em base úmida, para as temperaturas de 60, 70 e 80°C. Essas condições estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Condições operacionais para a secagem do morango via camada de espuma

Temperatura (°C)	X_i (kg _{água} /kg _{total})	X_e (kg _{água} /kg _{total})
60	85,39778	1,39857
70	85,63428	1,50557
80	85,58268	0,94907

Fonte: Autoria própria (2018).

A Figura 15 mostra o comportamento dos parâmetros N_0 e t_f em função das temperaturas de 60, 70 e 80°C. Nesta figura é possível observar que a taxa de secagem inicial (N_0) tende a um crescimento conforme o aumento da temperatura, não havendo uma sobreposição dos intervalos de confiança a 95%. Também para o caso do morango, é possível observar a alta influência da temperatura na taxa com a qual ocorre a secagem (N_0), comportamento este que se adéqua ao processo de secagem. Embora a taxa de secagem obtida para as temperaturas de 60 e 70°C tenham sido muito próximas.

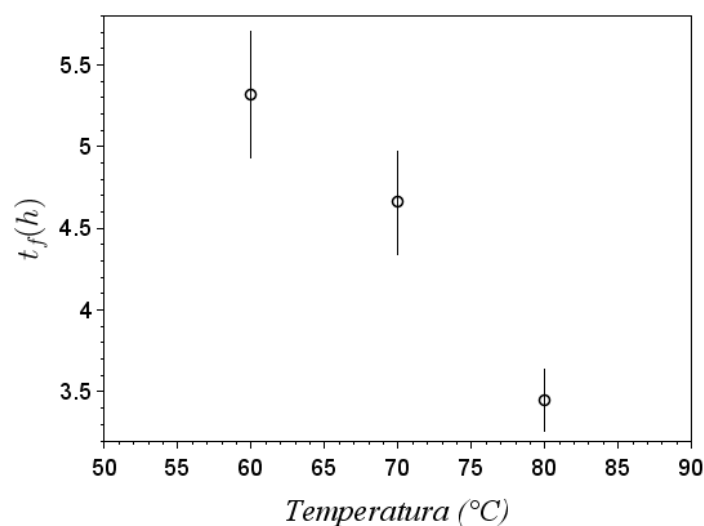
Figura 15 – Parâmetro N_0 do modelo de Dois Períodos em função da temperatura

Fonte: Autoria própria (2018).

Já para o parâmetro de tempo final de secagem (t_f), conforme mostra a Figura 16, não ocorre o mesmo comportamento. Pode-se observar que o tempo final de secagem tem um comportamento inversamente proporcional à temperatura, o que é esperado, pois quanto maior a temperatura que se emprega durante a secagem de

um produto, menor será o tempo requerido para que o processo se encerre. Pode-se notar, também, que houve sobreposição dos intervalos de confiança a 95% entre as temperaturas de 60 e 70°C. Isso se dá ao fato de que nessas temperaturas seus tempos finais de equilíbrio foram muito próximos.

Figura 16 – Parâmetro t_f do modelo de Dois Períodos em função da temperatura



Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 7 mostra resumidamente todos os parâmetros obtidos para o modelo de Dois Períodos para a secagem do morango via camada de espuma.

Tabela 7 – Parâmetros obtidos para o modelo de Dois Períodos

Temperatura (°C)	Dois Períodos	
	N_0 (h ⁻¹)	t_f (h)
60	29,03	5,32
70	30,00	4,66
80	40,86	3,45

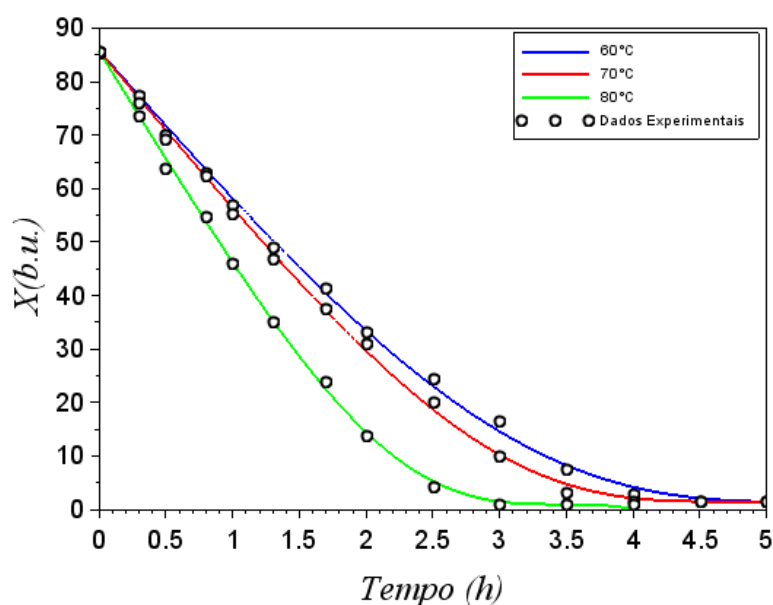
Fonte: Autoria própria (2018).

5.2.2 Desempenho do Modelo

A Figura 17 mostra o comportamento dos dados experimentais do morango em função do tempo, para o modelo de Dois Períodos, para as três temperaturas de 60, 70 e 80°C. Como é possível observar, o modelo proposto teve um bom ajuste aos dados experimentais para as três temperaturas, correlacionando-se muito bem com o comportamento experimental.

Também é possível observar que os tempos para que as umidades de equilíbrio fossem atingidas para 60, 70 e 80°C foram de 5, 5 e 4 horas, respectivamente. Nota-se que, para menores temperaturas, é necessário um tempo maior para atingir o estado de equilíbrio e, para temperaturas maiores, um tempo menor. Pode-se observar que, para todas as temperaturas, a umidade foi reduzida rapidamente no início e, posteriormente, diminuiu lentamente à medida que aumentava o tempo de secagem.

Figura 17 – Modelo de Dois Períodos e dados experimentais do morango em função do tempo



Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 8 apresenta os valores-p calculados pelo teste de Shapiro-Wilk e os valores da média dos resíduos quadráticos (MSE) para o estudo do morango.

Sabe-se que valores-p calculados pelo teste que sejam maiores ou iguais a 0,05 confirmam que os resíduos fazem parte de uma distribuição normal em torno de zero, o que é desejado uma vez que quanto mais próximo de zero forem os resíduos, mais o modelo se aproxima dos resultados experimentais. Logo, nota-se que para todas as temperaturas houve um valor-p maior que 0,05. No que diz respeito ao MSE, obteve-se valores baixos, o que permite concluir que os resultados dos ajustes foram satisfatórios para todas as temperaturas.

Tabela 8 – Valores-p e MSE para os ajustes aos dados do morango seco em camada de espuma

Modelo de Dois Períodos		
Temperatura (°C)	valor-p	MSE
60	0,2377	1,284
70	0,5462	1,068
80	0,8103	0,833

Fonte: Autoria própria (2018).

Vimercati et al (2016) realizaram estudos para os ajustes de modelos matemáticos à cinética de secagem da polpa de morango (*Fragaria sp.*) com o objetivo de estudar o processo de secagem em leito de espuma da polpa de morango na temperatura de 55°C. Nesse estudo, os autores analisaram o ajuste dos modelos matemáticos que melhor descrevam a cinética de secagem. Foram ajustados os modelos de Lewis, Henderson e Pabis, Midilli modificado e Page. O modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais na temperatura estudada, pois apresentou o maior valor do coeficiente de determinação ajustado e menor valor do erro padrão da regressão.

Já Venencio (2010), estudou a degradação de anticioninas em morangos durante o processo de secagem a temperaturas de 50, 60 e 65°C, utilizando os modelos de Newton, Henderson e Pabis, Page, Logarítmico e Dois Termos Exponencial. Segundo o autor, os modelos que apresentaram melhor correlação foram os modelos Logarítmico, a 50 e 65 °C, e de Dois Termos Exponencial, a 60°C.

Jorge e Silva (2015) estudaram a cinética de secagem do morango através da variação da temperatura 80 e 90°C de forma geométrica (cúbica e cilíndrica). Os modelos utilizados pelos autores foram os de Page, Newton, Henderson e Pabis e Logarítmico. Sendo assim, obteve-se um processo mais eficiente utilizando-se a temperatura de 90°C e a forma geométrica cúbica. O modelo Logarítmico se ajustou bem aos dados experimentais.

Roncheti (2014) propôs a secagem de quatro produtos: cenoura, tomate, beterraba e morango. Ambos eles secos em leito de espuma nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80°C. Os modelos utilizados foram os de Page, Henderson e Pabis, Newton, Midilli e Midilli Modificado, sendo que o melhor se ajustou foi o de Page.

Com base na revisão na literatura, nota-se que a maioria dos modelos que melhor se ajustaram para os dados da cinética da secagem do morango, sendo ele secado em camada de espuma ou não, foram os modelos de Page e Logarítmico.

Sendo assim, observa-se que o modelo proposto nesse trabalho (modelo de Dois Períodos) é robusto quando comparado a outros estudos e praticamente não foi utilizado pelos autores citados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram abordados modelos matemáticos para a modelagem da cinética de secagem da cagaita e do morango, por meio de modelos empíricos, sendo eles: modelo de Dois Períodos, modelo de Page e modelo de Midilli-Kucuk.

Para os dados experimentais da secagem de cagaita via camada de espuma, foi possível observar que o modelo que melhor teve capacidade descritiva foi o modelo de Dois Períodos, quando comparado com os modelos tradicionais usados na literatura. Outro fato observado para os dados da cagaita, é que o Modelo de Midilli-Kucuk, quando aplicado aos dados de secagem da cagaita, é nada mais que o Modelo de Page em uma forma modificada. Este fato foi demonstrado uma vez que o parâmetro $a \rightarrow 1$ e $b \rightarrow 0$ para o modelo de Midilli-Kucuk. Aplicando-se estes comportamentos no modelo, concluiu-se que ele se reduz ao modelo de Page. A equivalência estatística resultante da sobreposição dos intervalos de confiança sugeriu que este comportamento se repetiu para todas as temperaturas de secagem. O teste de Akaike realizado forneceu valores menores para o modelo de Dois Períodos nas temperaturas de 60 e 80°C e valores de ΔAIC negativos para elas. Isto confirma que o modelo de Dois Períodos tem maior probabilidade de ser o modelo mais adequado para representar o conjunto de dados experimentais para esse caso.

Já os testes realizados para os dados de experimentais de secagem do morango via camada de espuma mostraram-se eficientes quando ajustados com o modelo de Dois Períodos, mostrando que o modelo estudado é mais adequado quando comparado com outros tradicionalmente usados na literatura para esse tipo de fruta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Comparação de Modelos Matemáticos para Descrição da Cinética de Secagem em Camada Fina de Sementes de Feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.349353, 1999.

AKAIKE, H. Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. **Second International Symposium on Information Theory**, p. 267–281, 1973.

ALMEIDA, S. P.; SILVA, J. A.; RIBEIRO, J.F. **Aproveitamento Alimentar de Espécies Nativas do Cerrado: Araticum, Baru, Cagaita e Jatobá**. Planaltina, DF: Embrapa, 1987.

AVIDOS, M. F. D.; FERREIRA, L.T. Frutos dos Cerrados. **Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento**, v.3, n.15, p.36-41, 2000.

BERISTAIN, C. I.; CORTÉS, R.; CASILLAS, M. A.; DÍAZ, R. **Obtención de jugo de piña en polvo por el método de secado por espumas**. Archivos Latino americanos de Nutrición, v.41, n.2, p.238-245, 1991.

BIOSOM. 10 Benefícios do morango para a saúde. (2018). Disponível em: <<https://biosom.com.br/blog/alimentacao/10-beneficios-de-morango-para-saude/>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

BROD, F.P.R., ALONSO, L.F.T., PARK, K.J. **Secagem de produtos agrícolas**. XI SEMEAGRI – Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp. Campinas: Agrológica – Empresa Júnior de Eng. Agrícola. 1999, 122 p.

BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oil seeds**. v. 1. New York: AVI Book Publication, 1992.

BRYGIDYR, A. M., RZEPECKA, M. A., MCCONNELL, M. B. Characterization and drying of tomato paste foam by hot air and microwave energy. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal** 10(4), 313-319. 1977.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. **Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach**. 2nd Editio ed. Colorado: Springer, 2002. v. 172p. 488.

CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A.; CALIARI, M.; JUNIOR, M. S. S. **Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca**. R. Bras. Eng. Agric. Ambiental, v.17, n.9, p.987-994. 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v17n9/a12v17n9.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2018.

CELESTINO, S. M. C. **Princípio de Secagem de Alimentos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010.

CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; AFONSO JÚNIOR, P. C. Determinação dos Parâmetros de Secagem em Camada Delgada de Sementes de Milho Doce (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.2, p.110-119, 2003.

DANTAS, S. C. **Desidratação de polpa de fruta pelo método foam-mat**. Rio Grande do Norte: UFRN, 2010. 100 p. Dissertação Mestrado.

DEFENDI, R.O.; NICOLIN, D.J.; PARAÍSO, P.R.; JORGE, L.M.M. (2016). Assessment of the initial moisture content on soybean drying kinetics and transport properties. **Dry Technol.** vol. 34, p. 360–371.

EFREMOV, G. **Describing of Generalized Drying Kinetics with Application of Experiment Design Method**. Technical Sciences: Moscow 16(4)2013, 14, 309-322, 2013.

FARIA, R. Q.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; RESENDE, O. Cinética de Secagem de Sementes de Crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 16, n. p.5573-583, 2012.

FERLA, N. J.; MARCHETTI, M. M.; GONÇALVES, D. Ácaros predadores (Acari) associados à cultura do morango (*Fragaria* sp, Rosaceae) e plantas próximas no Estado do Rio Grande do Sul. **Biota Neotropica**. v 7. p. 1-8, 2007.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. ed. 2, Rio de Janeiro: Editora LTC, p. 401-432, 1982.

GEANKOPOLIS, C. J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitárias**. ed. 3, México: CECSA, 1998. 1008 p.

GEBHARDT, S. E.; THOMAS, R. G. **Nutritive Value of Foods**. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service, Nutrient Data Laboratory, Beltsville, Maryland, 2002.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.

JORGE, I.R.; SILVA, M.B. Determinação experimental da cinética de secagem do morango. In: XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2015. Campinas. **Anais eletrônicos...**Campinas: USP, 2015. Disponível em: < <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/determinao-experimental-da-cintica-de-secagem-do-morango-19900>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

KARIM, A. A.; CHEE-WAI, C. Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) purée. stability and air drying characteristics. **Food Chemistry**, v. 64, n. 3, p. 337-343, 1999.

KEEY, R. B. **Drying: Principles and practice**. New York: Pergamon Press, p. 358, 1972.

LEVENBERG, K. A method for the solution of certain problems in least squares. **Quart. Applied Math.**, v. 2, p. 164–168, 1944.

LEWIS, W. K. The drying of solid materials. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 05, p. 427-433, 1921.

LOPES, M. M.; BRANCO, V. T. F. C.; SOARES, J. B. Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. **Revista Transportes**, v. 21, n. 1, p. 59-66. 2013.

MARQUARDT, D. W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431–441, jun. 1963.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e Descriminação Matemática da Cinética de Secagem de Folhas de Capim-Limão. **Revista Brasileira de Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.

MC CABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. ed. 5, New York: McGraw-Hill, 1993. 1130 p.

MELONI, P. L. S. **Desidratação de Frutas e Hortaliças**. Fortaleza: Instituto Frutal, 2003. 87p. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/lmendesdasilva/104908236-apostiladesidratacaodefrutasehortalicas>>. Acesso em: 17 mar. 2018.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. *Drying Technology*, v.20, p.1503-1513, 2002.

MOTULSKY, H.; CHRISTOPOULOS, A. **Fitting Models to Biological Data using Linear and Nonlinear Regression**. 1st editio ed.[s.l.] Oxford University Press, 2003. p. 352.

MUDNIC, I.; MODUN, D.; BRIZIC, I.; VUKOVIC, J. Cardiovascular effects in vitro of aqueous extract of wild strawberry (*Fragaria vesca*, L.). **International Journal of Phytotherapy and Phytopharmacology**, v.16, p.462-469, 2009.

OLIVEIRA, R. C., R. M. ROSSI, M. L. GIMENES, S. T. D. BARROS. **Adjustment of non-linear models for drying in thin layer by Bayesian inference**. *Acta Scientiarum* 36, n. 2, p. 263-269, 2014.

PAGE, C. Factors influencing the maximum rate of drying shelled corn in layers. M.S. Thesis, Purdue University, 1949.

PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 4, p. 349-357, 2002.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. **Estudo de Secagem de Pêra Bartlett (*Pyrus sp.*) em Fatias**. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 21, n. 3, p. 288-292, set-dez. 2001.

PINTO, J.C.; LAGE, P.L. DA C. (2001). **Métodos Numéricos em Problemas de Engenharia Química**. 1st ed. E-papers Serviços Editoriais Ltda, Rio de Janeiro.

REISSER JUNIOR, C.; ANTUNES, L. E. C.; RADIN, B. **Produção de morango**. In: Simpósio do Morango, 5., Encontro sobre pequenas frutas e frutas nativas do Mercosul, 4., 2010, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010. 216 p.

ROESLER, R.; MALTA, L.G.; CARRASCO, L.C.; HOLANDA, L.B.; SOUZA, C.A.A.S.; & PASTORE, G.M., (2007). Atividade Antioxidante de Frutas do Cerrado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 27, 53 - 60.

RONCHETI, E.F.S. **Estudo do Processo de Secagem em Leito de Espuma de Cenoura, Tomate, Beterraba e Morango**. 2014. 52p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2014.

SACULINGGAN, M.; BALASE, E. A. Empirical Power Comparison Of Goodness of Fit Tests for Normality In The Presence of Outliers. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 435, p. 012041, 2013.

SANO, S. M; FONSECA, C. E. L. **Taxa de Sobrevivência e Frutificação de Espécies Nativas do Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 20.

SEGURA, E.; MONROY, L. A.; MANRIQUE, G. Aplicacion de la tecnologia de deshidratacion por el metodo de secado de espumas (Foam-mat) en jugos de frutas tropicales II (naranja, piña, mora y maracuyá). **Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas**, n.18, p.47-52, 1990.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591–611, 1965.

SILVA, S. P.; TASSARA, H. **Frutas no Brasil**. 5. ed. São Paulo: Nobel, 2001. 230 p.

SILVA, S.; TASSARA, H. **Frutas no Brasil**. 5. ed. São Paulo: Editare, 2003.

SILVA, J. A. et al. **Frutas nativas dos Cerrados**. Brasília: EMBRAPA-CPAC, 1994.

SILVA, R. N. G.; FIGUEIREDO, R.M.F; QUEIROZ, A.J.M.; GALDINO, P.O. Armazenamento de umbu-cajá em pó. **Revista Ciência Rural**, n.5, v.35, 2005.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. **Mathematical simulation of corn drying: A new model**. Transactions of ASAE, St. Joseph, v.11, n.4, p.582-586, 1968.

TRAVAGLINI, D. A.; AGUIRRE, J. M.; SILVEIRA, E. T. F. **Desidratação de frutas**. Campinas: CETEA/ITAL, 2001. 40 p.

VENENCIO, G. **Avaliação da degradação de pelargonidina durante a secagem de morangos**. (Trabalho de conclusão de graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

VERMA, L. R. et al. **Effects of drying air parameters on rice drying models**. Transactions of the ASAE, v. 28, p. 296- 301, 1985. Disponível em: <<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=32245>>. Acesso em: 13 mai. 2018.

VICENTE, I. H. M. L. **Secagem em Camada de Espuma de Fruto do Cerrado: Cagaita**. 2018. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

VICENTE, I.H.M.L.; SILVA, L.T.; SILVA, A.C.B.; NASCIMENTO, B.S. **Utilização de Redes Neurais para Predizer a Cinética de Secagem de Cagaita**. p. 2219-2224. In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica [=Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n.4]. ISSN.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, p.387-394, 2008. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=395940087018>>. Acesso em: 05 mai. 2018.

VIMERCATI, W. C., ARAÚJO, C. S.; MACEDO, L. L.; TEIXEIRA, L. J. Q.; SARAIVA, S. H. Ajustes de modelos matemáticos à cinética de secagem da polpa de morango (*Fragaria sp*). In: XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência, 2016, Paraíba. **Anais eletrônicos...** Paraíba: Universidade do Vale do Paraíba, 2016. Disponível em: <<https://revista.univap.br/index.php/revistaunivap/article/view/633>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

VIVEIRO CIPREST - Plantas Nativas e Exóticas (2017). Disponível em: <<http://ciprest.blogspot.com.br/2017/11/cagaita-eugenia-dysenterica.html>>. Acesso em: 01 mai. 2018.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. **Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying**. Transaction of ASAE, St. Joseph, v.11, ASAE Paper n.78-3001, 1978. Disponível em: <<https://jmiie.pure.elsevier.com/en/publications/use-of-variable-equilibrium-moisture-content-in-modeling-rice-dry>>. Acesso em: 13 mai. 2018.

WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E.; RORRER, G. R. (2007), **Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer**. 5. New York: John Wiley & Sons.

APÊNDICE A – Rotina para os dados experimentais da secagem da cagaita em camada de espuma para o Modelo de Dois Períodos

```

//Rotina para os dados experimentais da secagem da cagaita em
camada de espuma para o Modelo de Dois Períodos//
clear
clc
close

//-----Dados experimentais-----//
//Base úmida média na ordem de 40, 60 e 80°C//
x_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

x_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

x_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

//tempo experimental em horas na ordem de 40, 60 e 80°C//
t_exp= [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

t_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

t_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

//-----Parâmetros do modelo-----//
//N_0=P(1); t_f=P(2)//
t = linspace(0,t_exp($),5000);

function res=residuos(P, m)
    A=P(2)-(x_exp(1)-x_exp($))/P(1);
    B=(P(1)*sqrt(%pi))/2;
    C=(P(1)*P(2))-x_exp(1)+x_exp($);
    sum_ = x_exp(1)-P(1)*(t-A*erfc((B/C)*(P(2)-t)));
    sum_1 = interp1(t',sum_,t_exp,'spline');
    res = sum_1- x_exp;
endfunction

//Estimativa inicial
P0 = [13.150947 12.991166];
[xsol,v,info]=lsqrsolve(P0,residuos,length(t_exp))

A=xsol(2)-(x_exp(1)-x_exp($))/xsol(1);

```

```
B=(xsol(1)*sqrt(%pi))/2;  
C=(xsol(1)*xsol(2))-x_exp(1)+x_exp($);  
f = x_exp(1)-xsol(1)*(t-A*erfc((B/C)*(xsol(2)-t)))  
  
plot(t,f,'-k')  
plot(t_exp,x_exp,'ok')
```

APÊNDICE B – Rotina para os dados experimentais da secagem da cagaita em camada de espuma para o Modelo de Page

```

//Rotina para os dados experimentais da secagem da cagaita em
camada de espuma para o Modelo de Page//
clear
clc
close

//-----Dados experimentais-----//
//Base úmida média na ordem de 40, 60 e 80°C//

x_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

x_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

x_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

//tempo experimental em horas na ordem de 40, 60 e 80°C//
t_exp= [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

t_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

t_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

//-----Parâmetros do modelo-----//
//k=P(1); n=P(2)//

t = linspace(0,t_exp($),5000);

function res=residuos(P, m)
    sum_ = x_exp($) +(x_exp(1)-x_exp($))*exp(-P(1)*t.^P(2));
    sum_1 = interp1(t',sum_,t_exp,'spline');
    res = sum_1- x_exp;
endfunction
//Estimativa inicial
P0 = [0.140835 1.2640907];
[xsol,v,info]=lsqr solve(P0,residuos,length(t_exp))

f = x_exp($)+ (x_exp(1)-x_exp($))*exp(-
xsol(1)*t.^xsol(2));

plot(t,f,'-k')
plot(t_exp,x_exp,'ok')

```

APÊNDICE C – Rotina para os dados experimentais da secagem da cagaita em camada de espuma para o Modelo de Midilli-Kucuk

```

//Rotina para os dados experimentais da secagem da cagaita em
camada de espuma para o Modelo de Midilli-Kucuk //
clear
clc
close

//-----Dados experimentais-----//
//Base úmida média na ordem de 40, 60 e 80°C//

x_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

x_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

x_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

//tempo experimental em horas na ordem de 40, 60 e 80°C//
t_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

t_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

t_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

//-----Parâmetros do modelo-----//
//k=P(1); n=P(2); a=P(3); b=P(4)//

t = linspace(0,t_exp($),5000);

function res=residuos(P, m)
    sum_ = x_exp($) +(x_exp(1)-x_exp($))*(P(3)*exp(-
P(1)*t.^P(2))+P(4)*t);
    sum_1 = interp1(t',sum_,t_exp,'spline');
    res = sum_1- x_exp;
endfunction

//Estimativa inicial
P0 = [1.4363325 1.4060293 0.9893874 -0.0611517];
[xsol,v,info]=lsqrsolve(P0,residuos,length(t_exp))

f = x_exp($)+ (x_exp(1)-x_exp($))*(xsol(3)*exp(-
xsol(1)*t.^xsol(2))+xsol(4)*t);

```

```
plot(t, f, '-k')  
plot(t_exp, x_exp, 'ok')
```


APÊNDICE D – Rotina para os dados experimentais da secagem do morango em camada de espuma para o Modelo de Dois Períodos

```

//Rotina para os dados experimentais da secagem do morango em
camada de espuma para o Modelo de Dois Períodos//
clear
clc
close

//-----Dados experimentais-----//
//Base úmida média na ordem de 60, 70 e 80°C//

x_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

x_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

x_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

//tempo experimental em horas na ordem de 40, 60 e 80°C//

t_exp= [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

t_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

t_exp = [Os dados experimentais foram omitidos por terem sido
concedidos pela parceria com a UFLA]

//-----Parâmetros do modelo-----//
//N_0=P(1); t_f=P(2)//

t = linspace(0,t_exp($),5000);

function res=residuos(P, m)
    A=P(2)-(x_exp(1)-x_exp($))/P(1);
    B=(P(1)*sqrt(%pi))/2;
    C=(P(1)*P(2))-x_exp(1)+x_exp($);
    sum_ = x_exp(1)-P(1)*(t-A*erfc((B/C)*(P(2)-t)));
    sum_1 = interp1(t',sum_,t_exp,'spline');
    res = sum_1- x_exp;
endfunction

//Estimativa inicial
P0 = [31.910097 5.9228266];
[xsol,v,info]=lsqr solve(P0,residuos,length(t_exp))
    A=xsol(2)-(x_exp(1)-x_exp($))/xsol(1);

```

```
B=(xsol(1)*sqrt(%pi))/2;  
C=(xsol(1)*xsol(2))-x_exp(1)+x_exp($);  
f = x_exp(1)-xsol(1)*(t-A*erfc((B/C)*(xsol(2)-t)))  
  
plot(t,f,'-k')  
plot(t_exp,x_exp,'ok')
```