



**ÉVERTON HOLANDA SALES**

**ESTUDO DE CINÉTICA DE SECAGEM E ISOTERMAS DE  
DESSORÇÃO DE POLPA DE COCO VERDE (*Cocos nucifera L*)  
EM SISTEMA ESPUMANTE**

São Luís  
2021

**ÉVERTON HOLANDA SALES**

**ESTUDO DE CINÉTICA DE SECAGEM E ISOTERMAS DE  
DESSORÇÃO DE POLPA DE COCO VERDE (*Cocos nucifera L*)  
EM SISTEMA ESPUMANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Harvey Alexander Villa Vélez

São Luís  
2021

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Holanda Sales, Éverton.

Estudos de cinética de secagem e isoterma de dessorção de polpa de coco verde *Cocos nucifera* L em sistema espumante / Éverton Holanda Sales. - 2021.  
56 f.

Orientador(a): Harvey Alexander Villa Vélez.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2021.

1. *Cocos nucifera* L. 2. Foam mat. 3. Modelos matemáticos. 4. Secagem. I. Alexander Villa Vélez, Harvey. II. Título.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA VÉLEZ  
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. DIANA MARIA CANO HIGUITA  
COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. MARIA DA GLÓRIA ALMEIDA BANDEIRA  
DETQUI/PPPGI/UFMA

**04 de fevereiro de 2021**

**DADOS CURRICULARES****Éverton Holanda Sales**

<b>NASCIMENTO</b>	16/04/1997 – UNIÃO/PI
<b>FILIAÇÃO</b>	Welly Marques Holanda de Sales Raimundo José Oliveira de Sales
<b>2015/2020</b>	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

*Dedico a minha família, aos meus amigos e a todos que em algum momento de forma, direta ou indireta contribuíram para minha formação intelectual, pessoal e profissional.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, pela vida, saúde e fé, que me foi sustento em quaisquer situações, me fazendo acreditar que a realização de mais esta etapa seria possível.

Agradeço à toda minha família, em especial aos meus pais Welly Marques e Raimundo José, aos meus irmãos Weller Jaira e William José e ao meu sobrinho Salvador Neto pelo amor incondicional, por não medirem esforços para que pudesse me dedicar aos estudos, pelas palavras por vezes confortantes que me fizeram ter esperança, me mostrando sempre o melhor caminho a ser seguido e por serem o meu porto seguro.

Aos meus amigos Mariana Moraes, Wellington Macedo, Gisleine Martins, Antônio José, Layana Sampaio, Geysa Silva pelo amor, amizade, companheirismo e por estarem sempre ao meu lado, mesmo que fisicamente distantes, meu muito obrigado.

Aos meus amigos Nilton Mafra, Paulo Sérgio, Kelle Jéssica, Fernanda Hellen, Aline Medeiro, Luís Felipe e Nielson Brito por todo amor, amizade, companheirismo, além de todo apoio emocional e acadêmico durante todos esses anos de graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Harvey Alexander, por todo ensinamento, paciência, confiança e apoio depositado a mim.

À todos os professores, servidores e colegas que cruzaram meu caminho, durante toda a minha jornada, e me ensinaram lições que eu levarei para à vida.

Ao eterno colega, Germano, pela disponibilidade em me ajudar sempre que precisava.

À UFMA, pela oportunidade e por ter sido a minha segunda casa durante esses anos.

A todos que fazem parte da minha vida, o meu muito obrigado!

*“Vai dá certo, só tenha calma”*

*Welly Marques*



SALES, E. H. **Estudos de cinética de secagem e isothermas de dessorção de polpa de coco verde (*Cocos nucifera L*) em sistema espumante**. 2021. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

## RESUMO

O aumento da produção e do consumo de coco verde nos últimos anos vem acompanhado pelo crescimento de resíduos sólidos gerados a partir da sua extração. Devido a necessidade de propor alternativas para o aproveitamento destes resíduos, este trabalho teve por objetivo estudar o processo de secagem da polpa do coco verde *in natura* em sistema espumante, em diferentes temperaturas e concentrações de polpa, empregando modelos teóricos e empíricos de camada fina, e também construir e modelar a isoterma de dessorção através do método gravimétrico estático para determinar entalpia de sorção para as temperaturas de 30, 45 e 60 °C. A secagem foi realizada em uma estufa convectiva e os dados foram coletados e analisados utilizando os modelos empíricos de camada fina: Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Logarítmica, Wang e Sing, Lewis, Page, Midilli, Dois Termos e Aproximação por Difusão. Para as isothermas foram utilizados os modelos matemáticos teóricos de GAB, BET e Langmuir, e os empíricos de Oswin, Henderson, Halsey, Iglesias e Chirife, Caurie e ChungPfof. Através da modelagem da secagem foi possível obter os valores dos coeficientes dos modelos para cada temperatura. Constatou-se que a proporção de 20% (m/m) apresentou melhores resultados de retirada de água livre do material e o modelo de Midilli, evidenciou, em geral, o melhor ajuste, descrevendo com maior precisão os dados experimentais da cinética de secagem nos três níveis de temperatura e quantidade de polpa, apresentando um maior coeficiente de determinação (0,998) e menor erro médio relativo (0,004%). Os modelos de GAB e Oswin apresentaram o melhor ajuste aos dados experimentais das isothermas, sendo o modelo de Oswin escolhido, por ter apresentando  $R^2 > 0,978$  e  $MSE < 0,0014$ , e dessa forma, serviu de referência para fornecer os parâmetros para a determinação da entalpia de sorção da água. Aplicou-se a equação de Clausius-Clapeyron a um teor de umidade constante para determinar a entalpia de sorção do sistema espumante. Os pontos mais homogêneos, em termos de energia, foram encontrados na faixa de teor de umidade de 1,550 a 3,333 kg/kg b.s., com valor máximo de entalpia igual a 35612,419 kJ/mol.

**Palavras-chave:** Secagem; *Cocos nucifera L*; Modelos matemáticos; *foam mat*.

SALES, E.H. **Studies of drying kinetics and desorption isotherms of green coconut pulp (cocos nucifera L) in a foaming system.** 2021. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

### ABSTRACT

The increase in production and consumption of green coconut in recent years has been accompanied by the growth of solid waste generated from its extraction. Due to the need to propose alternatives for the use of these residues, this study aimed to study the drying process of fresh green coconut pulp in a sparkling system, at different temperatures and concentrations of pulp, employing theoretical and empirical thin-layer models, and also to build and model the desorption isotherm using the static gravimetric method to determine sorption enthalpy for temperatures of 30, 45 and 60 ° C. The drying was carried out in a convective oven and data were collected and analyzed using the thin layer empirical models: Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Logarithmic, Wang and Sing, Lewis, Page, Midilli, Two Terms and Diffusion Approximation. The theoretical mathematical models of GAB, BET and Langmuir were used for the isotherms, and the empirical models of Oswin, Henderson, Halsey, Iglesias and Chirife, Caurie and ChungPfof. Through the drying modeling it was possible to obtain the values of the coefficients of the models for each temperature. It appears that the proportion of 20% (m / m) showed better results in removing free water from the material and the Midilli model showed, in general, the best fit, describing with greater precision the experimental data of drying kinetics in the three levels of temperature and amount of pulp, presenting a higher coefficient of determination (0.998) and a lower mean error relative (0.004%). The GAB and Oswin models presented the best fit to the experimental data of the isotherms, the Oswin model being chosen, having  $R^2 > 0.978$  and  $MSE < 0.0014$ , and thus, served as a reference to provide the parameters for the determination enthalpy of water sorption. The Clausius-Clapeyron equation was applied at a constant moisture content to determine the enthalpy of sorption in the foaming system. The most homogeneous points, in terms of energy, were found in the moisture content range of 1.550 to 3.333 kg / kg b.s., with a maximum enthalpy value equal to 35612.419 kJ / mol.

**Keywords:** Drying; *Cocos nucifera L*; Mathematical models; *foam mat*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O Coqueiro e a morfologia do coco verde <i>in natura</i> .....	5
Figura 2 - Esquema da secagem pelo método de camada de espuma (foam-mat). .....	8
Figura 3 - Curvas de secagem.....	9
Figura 4 - Tipos de isotermas descritas por Brunauer. ....	12
Figura 5 - Isoterma de sorção de um produto alimentício .....	13
Figura 6 - Secador de bandejas com circulação de ar forçado .....	16
Figura 7 - Balança semianalítica e um higrômetro.....	16
Figura 8 - Estufa incubadora B.O.D .....	18
Figura 9 - Sistema espumante após o procedimento de secagem.....	21
Figura 10 - Curvas de secagem do sistema espumante de coco verde nas temperaturas de 30, 45 e 60°C simuladas pelo modelo Midilli na concentração de 10% de polpa. ....	23
Figura 11 - Curvas de secagem do sistema espumante de coco verde nas temperaturas de 30, 45 e 60°C simuladas pelo modelo Midilli na concentração de 20% de polpa. ....	23
Figura 12 - Curvas de secagem do sistema espumante de coco verde nas temperaturas de 30, 45 e 60°C simuladas pelo modelo Midilli na concentração de 30% de polpa. ....	23
Figura 13 - Valores experimentais da umidade de equilíbrio do albúmen do coco verde em função da atividade de água às temperaturas de 30 °C (●), 45 (■) e 60 (▲) calculados pelo modelo de Oswin. ....	32
Figura 14 - Entalpia de sorção do albúmen em função da umidade de equilíbrio .....	33

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Modelos de ajuste de secagem em camada fina.....	18
Tabela 2 - Modelos de ajuste de isotermas de sorção de água. ....	19
Tabela 3 - Parâmetros estimados para os modelos a concentração de 10% nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C.. .....	24
Tabela 5 - Parâmetros estimados para os modelos a concentração de 30% nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C. ....	25
Tabela 6 - Umidade de equilíbrio para o sistema espumante da polpa de coco verde em função da temperatura e da atividade de água.....	27
Tabela 7 - Parâmetros estimados para os modelos nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C.. .....	30

## LISTA DE SÍMBOLOS

$X$	Umidade de equilíbrio (kg água/kg sólido seco)
$X_m$	Umidade na monocamada (kg água/kg sólido seco)
$a_w$	Atividade de água
$n$	Número de camadas
$C$	Constante de adsorção relacionada com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes pressão
$K$	Constante de adsorção relacionada com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes
$c$	Fator entrópico constante
$K_g$	Fator entrópico constante
$R$	Constante universal dos gases
$\Delta H$	Entalpia de sorção da água
$K$	Constante de adsorção relacionada com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes em comparação com a água pura
$P$	Pressão de vapor relativa de equilíbrio da água em um sistema
$P_0$	Pressão de vapor relativa de equilíbrio da água pura
$A$	Constante dos modelos de Halsey, Oswin, Henderson, Chung-Pfost e IglesiasChirife
$B$	Constante dos modelos de Halsey, Oswin, Henderson, Chung-Pfost e IglesiasChirife
$X_e$	Teor de umidade de equilíbrio em base seca (b.s)
$X_0$	Conteúdo de umidade inicial (kg/kg, b.s.),
$t$	Tempo
$m_{\text{água}}$	Massa da amostra úmida
$m_{\text{seca}}$	Massa da amostra após a secagem
$R^2$	Coefficiente de determinação
$MSE$	Erro médio relativo
$Y_i$	Valores experimentais
$\bar{y}$	Média dos valores experimentais
$y_i^*$	Valores estimados
$N$	Quantidade de valores experimentais
$T$	Temperatura
$k_1, k_2, k_3, k_4$	Constantes de secagem ( $s^{-1}$ ; adimensional)

## SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA .....	iii
FOLHA DE APROVAÇÃO.....	iv
DADOS CURRICULARES .....	v
DEDICATÒRIA.....	vi
AGRADECIMENTOS .....	vii
EPÍGRAFE.....	viii
RESUMO .....	ix
ABSTRACT .....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xiii
SUMÁRIO.....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral .....	3
2.1 Objetivos específicos.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 Coqueiro e o coco .....	4
3.2. Secagem de alimentos .....	6
3.2.1 Secagem foam mat.....	7
3.3 Cinética de secagem .....	8
3.4 Modelagem cinética.....	10
3.5 Isotermas de sorção .....	11
3.5.1 Métodos para as isotermas de sorção .....	11
3.5.2 Tipos de curvas.....	12
3.5.3 Modelos matemáticos de isotermas de sorção.....	14
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	15
4.1 Local da pesquisa.....	15
4.2 Preparo da matéria-prima .....	15
4.3 Secagem.....	15
4.4 Determinação da umidade da amostra.....	16

4.5 Isotermas.....	17
4.6 Modelagem matemática Secagem .....	18
4.7. Modelagem matemática Isotermas .....	19
4.8 Determinação do calor de sorção.....	20
4.9 Análise estatística dos resultados .....	20
5. RESULTADOS E DISCURSÃO .....	21
5.1 Secagem.....	21
5.2 Modelagem matemática Secagem .....	22
5.3 Isotermas.....	29
5.4 Modelagem matemática Isotermas.....	30
5.5 Determinação da entalpia de sorção da água.....	32
6. CONCLUSÕES.....	34
REFERÊNCIAS .....	35

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país privilegiado por sua extensão territorial, posição geográfica e pelas condições de clima e solo. É considerado o terceiro maior produtor de frutas no mundo, ficando atrás apenas da China e da Índia. No agronegócio brasileiro, a fruticultura é um dos setores de maior destaque e assume importância relevante para a economia brasileira, sendo assim, ela conquista resultados expressivos e gera mais oportunidades para os pequenos produtores e empresários (SEBRAE, 2015).

O coco verde in natura é um fruto que atrai crescente atenção dos consumidores e produtores. A origem do coqueiro é do sudeste da Ásia, uma planta de clima tropical e subtropical que além de fornecer alimento, água e óleo, oferece também tronco para habitação, fibras para tapetes, redes, cordas, estofamentos e colchões (CUENCA, 1998). O coqueiro (*Cocos nucifera*, L.) é cultivado em 86 países tropicais, sua inserção no Brasil se deu em 1553 no estado da Bahia, a partir de um material advindo de Cabo Verde tornando-se comum em todo o litoral nordestino, sendo cultivado para consumo, geração de rendas, emprego e produção industrial (ARAGÃO; RIBEIRO; MELO, 2009; FIGUEIRA, 2012).

A comercialização do coco verde é sazonal, ou seja, é regulada pela procura em função das estações do ano e clima. O consumo de coco verde no verão é consideravelmente maior que nas outras estações do ano, devido ao aumento do consumo em cidades praianas. Ainda assim, mesmo em baixa temporada, observa-se o crescimento do consumo da água de coco, impulsionado principalmente pela inclusão de hábitos saudáveis no comportamento da população brasileira, competindo inclusive com bebidas isotônicas, devido às suas propriedades funcionais (MARTINS; JESUS JR, 2014). Porém com o aumento do consumo ocorre aumento proporcional da produção de resíduo (DIAS; SCHNEIDER; CHAVES; CELESTE, 2019).

Esse resíduo é formado pela parte espessa e fibrosa do fruto (mesocarpo), pela epiderme (epicarpo) e pelo endocarpo, que no fruto verde ainda não é tão rígido como no coco maduro (coco marrom) (MATTOS; ROSA; CRISÓSTOMO; BEZERRA *et al.*, 2014). Em geral, a polpa e casca têm sido descartadas de forma inapropriada (comumente a céu aberto) gerando problemas ambientais. Nos últimos anos, especial atenção vem sendo dada para minimizar ou reaproveitar os resíduos gerados nos diferentes processos industriais. Na literatura especializada são poucos os trabalhos apresentam aplicação da polpa de coco verde (SOARES; DAIUTO; DE MENDONÇA; VIETES, 2015).



Na maioria das aplicações, não foram encontrados dados relatando uso da polpa de coco verde ou apontando valor comercial. Após retirar a água de coco do fruto, a indústria frequentemente descarta a polpa, que muitas vezes está presente em quantidade e qualidade suficientes para aproveitamento (SOARES, 2014). O uso dessa polpa é uma alternativa para reduzir a geração de resíduos no processo de industrialização da água de coco e evitar o desperdício desse coproduto que pode chegar a 80.000 toneladas por ano (TEIXEIRA; TORREZAN; FREITAS-SÁ; PONTES *et al.*, 2019).

Por esse motivo, vários processos industriais foram desenvolvidos para o seu aproveitamento preservação e utilização. Entre eles, a secagem é o método mais comum, uma vez que a remoção da água inibe o crescimento dos microrganismos e a atividade enzimática, diminuindo o peso do produto, simplificando também o seu transporte e armazenamento (DE BRUIJN; RIVAS; RODRIGUEZ; LOYOLA *et al.*, 2016). A secagem com espuma é um processo simples e barato que usa facilitadores e protetores de estabilidade da espuma durante todo o processo. Algumas de suas vantagens são baixas temperaturas de processamento, curto período de desidratação, devido à maior área de contato com o ar, rápida remoção de água e obtenção de um produto poroso facilmente reidratável (GUIMARÃES; DE FIGUEIRÊDO; DE MELO QUEIROZ, 2017).

A facilidade de remoção de água durante a secagem é indicada pelo comportamento da curva. O estudo da cinética de secagem possibilita conhecer a temperatura apropriada e o tempo necessário para conclusão do processo. Além disso, a descrição efetiva por meio de equações matemáticas adequadas permite prever os parâmetros do processo a qualquer momento, a partir dos dados iniciais (AVHAD; MARCHETTI, 2016). Os modelos matemáticos permitem determinar a relação entre o teor de água e a umidade relativa, que são expressos por curvas de equilíbrio higroscópico e/ou isotérmicas. As isotermas de sorção são essenciais para definir limites de desidratação, estimar variações na umidade do produto quando armazenado em determinada temperatura e umidade relativa do ambiente (CHAVES; RESENDE; DE OLIVEIRA; DE SOUZA SMANIOTTO *et al.*, 2015).

As informações das propriedades higroscópicas são de grande importância para desenvolver o processo de secagem e determinar as condições de armazenamento da polpa de coco verde. O tempo de secagem e as condições de armazenamento dessa fruta podem ser determinados avaliando suas propriedades termodinâmicas, como isotermas de adsorção-desorção de umidade e calor isostérico de sorção (LAVOYER; GABAS; OLIVEIRA; TELIS-ROMERO, 2013a).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o processo de secagem da polpa do coco verde in natura em sistema espumante, em diferentes temperaturas e concentrações de polpa, empregando modelos teóricos e empíricos de camada fina, e também construir e modelar a isoterma de dessorção através do método gravimétrico estático para determinar entalpia de sorção para as diferentes temperaturas.

### 2.2 Objetivos específicos

- Avaliar as cinéticas de secagem de sistema espumante adicionado de polpa de coco verde nas proporções de 10%, 20% e 30 % (m/m) e temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C;
- Modelar o processo de secagem da polpa de coco verde empregando modelos teóricos e empíricos de camada fina;
- Determinar a melhor concentração da polpa de coco verde a ser adicionada ao sistema espumante, para o processo de secagem;
- Determinar o melhor modelo de camada fina para o processo de secagem do sistema espumante da polpa de coco verde;
- Determinar as isotermas de dessorção da polpa de coco verde, às temperaturas de 30, 45 e 60 °C, utilizando o método estático gravimétrico;
- Ajustar os dados experimentais das isotermas de dessorção utilizando diferentes modelos matemáticos disponíveis na literatura;
- Calcular as propriedades termodinâmicas de sorção da água para a polpa de coco verde em sistema espumante.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

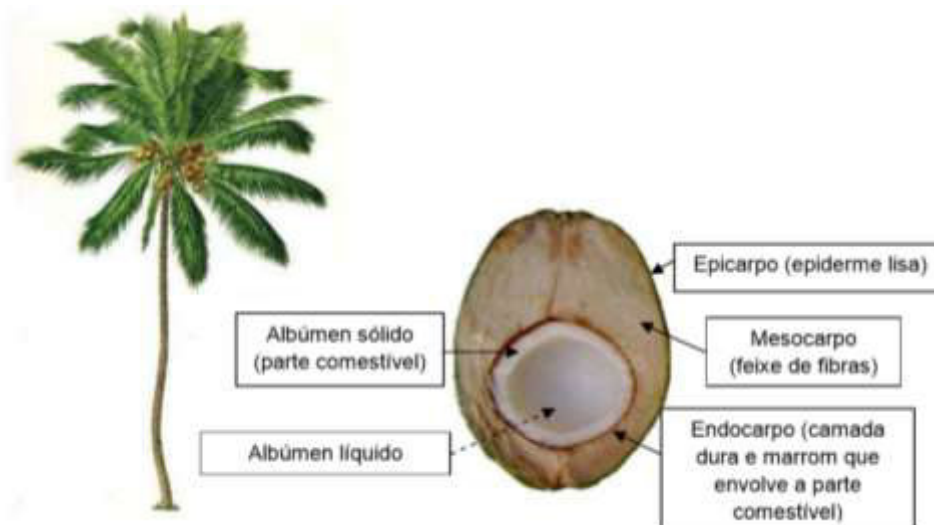
#### 3.1 Coqueiro e o coco

Cultura típica de clima tropical, o coqueiro vem sendo cultivado em cerca de 90 países. No Brasil, o cultivo do coco se desenvolve principalmente ao longo do litoral, sendo encontrado em áreas desde o Estado do Pará até o Espírito Santo. As estatísticas atuais demonstram que o Brasil possui mais de 266 mil hectares implantados com a cultura, praticamente em quase todas as Unidades da Federação (SOARES, 2014). Segundo Cuenca (2016), em 2013, cerca de 772 mil empregos diretos foram gerados a partir da cadeia produtiva do coco, demonstrando a importância dessa planta para a economia do país.

No Brasil, a variedade mais utilizada é o coqueiro anão (*Cocos nucifera*, L.) conforme destaca (SOARES, 2014), principalmente para a produção de água de coco e para utilização na indústria de alimentos. Isso porque apresenta uma qualidade sensorial elevada em relação às demais variedades. No país, aproximadamente 85% da produção de cocos é comercializada como seco: a metade é para uso culinário e o restante é industrializado (SENHORAS, 2004). Morfológicamente, é uma palmeira de tronco único, desarmada (sem espinhos) com uma coroa bastante grande que se estendem de 3 a 4,5 metros de comprimento. A planta possui um troco cilíndrico com uma base espessa, de cor marrom a acinzentada, com fendas verticais com aproximadamente 30 a 45 cm de diâmetro e dependendo da espécie a altura pode chegar a 30 metros. É uma planta do tipo monóica, o que significa que tanto as flores masculinas quanto as femininas nascem na mesma árvore (CHAN; ELEVITCH, 2006; JODRAL; GALLARDO; SERRANO, 2000; LEDO; CUNHA; ARAGÃO; TUPINAMBÁ, 2007).

O coco é uma drupa composta por exocarpo, mesocarpo, endocarpo, tegumento, albúmen sólida (carne ou polpa), albúmen líquida (água de coco) e embrião, sendo as partes comestíveis apenas a albúmen sólida e líquida, sendo o endosperma o mais importante economicamente. (SOARES; DEMEKE; VAN DE VELDE; FOULQUIÉ-MORENO *et al.*, 2017). A Figura 1 mostra em detalhes os constituintes do coco verde.

Figura 1 – O Coqueiro e a morfologia do coco verde *in natura*.



Fonte: (BENASSI, 2006)

Os produtos provenientes do coco verde ou maduro são amplamente utilizados e comercializados, sendo os principais produtos obtidos são o óleo, o leite, o coco ralado, a copra, a farinha de copra, entre outros. Aplicações desses produtos incluem alimentos, ração animal, sínteses industriais, sabões, detergentes e cosméticos (OCHOA-VELASCO; CRUZ-GONZÁLEZ; GUERRERO-BELTRÁN, 2014). Apesar disso, a cultura de exploração do coco tem condições de ser mais atuante nos mercados nacional e internacional, desde que sejam superadas algumas dificuldades, como a melhoria da produtividade da plantação de coqueiros, expansão das áreas de plantio e investimentos em todo o parque industrial, com a finalidade de aumentar a oferta de matéria-prima e a capacidade de processamento das indústrias. (FONTENELE; AGROINDUSTRIAS, 2005).

Embora orgânico, o resíduo do coco é de difícil degradação, serve de foco para proliferação de doenças, e atualmente diminui a vida útil de aterros sanitários e lixões. Enquanto matéria-prima não utilizada, esses resíduos apresentam custos de desova significativos para a sociedade, sendo, portanto, de grande importância o aproveitamento dos mesmos para o avanço da cadeia agroindustrial do coco, que gera oportunidades de trabalho e de renda, e amplia bases sociais da produção (SENHORAS, 2003).

O aproveitamento da polpa do coco verde, em específico, é uma maneira de reduzir as perdas e consequentemente evitar desperdícios. Esses frutos a serem reaproveitados apresentam, no estágio de maturação indicado, um conteúdo de polpa pequeno, cujo aproveitamento não é economicamente viável, entretanto, no caso da presença deste material ser representativa, devido ao volume trabalhado, as indústrias podem, opcionalmente,

aproveitá-lo na forma de polpa. Esta pode ser utilizada, principalmente, na formulação de doces, sorvetes, iogurtes, drinques, etc. (ROSA; DE ABREU, 2000).

### 3.2 Secagem de alimentos

A aplicação da secagem oferece vantagens na conservação, reutilização ou no tratamento de certos materiais. Destacam-se como vantagens: facilidade de transporte, diminuição da carga microbiana, concentração dos constituintes químicos e disponibilidade para seu processamento em qualquer época do ano (PARK; ANTONIO, 2006). O processo de secagem não pode ser generalizado a todos os materiais biológicos, uma vez que cada material possui características específicas que podem ser alteradas drasticamente pelo processo de secagem (PARK; BIN; BROD, 2001).

Apesar disso, quando comparado com outros procedimentos de conservação de alimentos, como refrigeração ou tratamentos químicos, a secagem apresenta-se como uma solução mais simples e de menor custo (ARAÚJO; MACEDO; VIMERCATI; SARAIVA *et al.*, 2017). Este método se baseia no fato de microrganismos, enzimas e todo o mecanismo metabólico necessitarem de alta atividade de água para se desenvolverem (CARVALHO, 2018). A secagem é um processo que consiste na eliminação de água de um produto por evaporação, com transferência de calor e massa e envolve três meios de transferência de calor: convecção, condução e radiação. A transferência de calor por convecção é o meio mais utilizado na secagem comercial, em que um fluxo de ar aquecido passa através da camada do produto (FIB, 2016).

Para que o procedimento seja vantajoso, é sempre necessário avaliar o binômio tempo/temperatura de secagem, para entender se é viável utilizar temperaturas mais elevadas diminuindo o tempo de secagem e, conseqüentemente, o tempo de exposição do produto ao aquecimento. Todavia, é importante evidenciar que o curto tempo de exposição ao aquecimento em temperaturas mais elevadas pode também minimizar as perdas e garantir a qualidade nutricional do alimento (VASCONCELOS; MELO, 2016).

Dentre os processos de secagem para obtenção dos pós de polpa de frutas, destaca-se a secagem da manta de espuma. É um método em que o alimento líquido ou semilíquido é misturado a agentes espumosos e transformado em espuma por agitação, sendo então submetido à secagem com ar quente (BAPTESTINI; CORRÊA; JUNQUEIRA; RAMOS *et al.*, 2015).

### 3.2.1 Secagem *foam-mat*

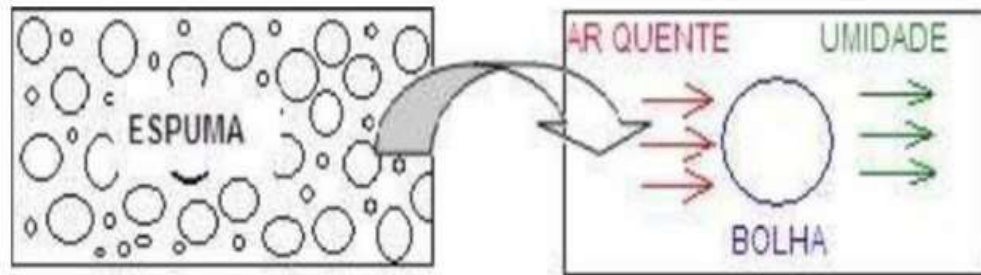
Entre as técnicas utilizadas para secar alimentos, tem-se o processo de desidratação por camada de espuma, também conhecido como “*foam-mat*”, que consiste na obtenção de pó a partir de uma espuma feita com o material desejado com o auxílio de agente emulsificante. Este método é uma alternativa de menor custo em relação a outros métodos utilizados, uma vez que o pó obtido apresenta boa qualidade, boa retenção de aroma, cor e sabor. O alto rendimento final que a secagem por camada de espuma entrega, aliado às baixas temperaturas utilizadas e tempo curto do processo tornam este um método vantajoso para a secagem de produtos alimentícios (ARAUJO, 2019).

Este processo pode ser utilizado na produção em larga escala de polpas de frutas em pó, devido à sua adequação a diversos tipos de frutas, boa retenção da qualidade nutricional, fácil reprodução e baixo custo. Os pós de frutas obtidos por meio desse processo apresentam alto potencial econômico em comparação com seus equivalentes líquidos, como redução de volume ou peso, redução do espaço de armazenamento, manuseio e transporte mais simples e maior vida útil. Também podem ser usados em sucos, iogurtes, bebidas, sorvetes e geleias (SANGAMITHRA; VENKATACHALAM; JOHN; KUPPUSWAMY, 2015).

O método consiste em três etapas. A primeira etapa consiste na transformação do alimento líquido ou pastoso em uma espuma estável por meio do uso de batedeiras ou equipamentos geradores de espuma, com o auxílio de um agente espumante. Em alguns casos, ocorre a incorporação de gases não tóxicos, como o  $N_2$  e o  $CO_2$ . A segunda etapa é o espalhamento da espuma em uma superfície, perfurada ou não, em camada com espessura em torno de 2 a 5 mm. A terceira etapa é o processo de desidratação, que ocorre geralmente por corrente de ar quente e resulta em um produto poroso e quebradiço, que é facilmente transformado em pó (SOUZA, 2011).

A Figura 2 mostra um modelo esquemático de como ocorre a secagem pelo método *foam-mat*. Inicialmente há a formação da espuma, onde foi adicionado o agente emulsificante ao líquido ou semi-líquido que será desidratado, em seguida, promove-se a incorporação de ar no material. A espuma obtida é disposta em camadas finas em placas, e exposta a uma fonte de ar quente que facilmente consegue retirar a umidade do material, graças às forças capilares promovidas pela movimentação do ar quente nas finas películas líquidas que separam as bolhas de ar da espuma (DANTAS, 2010).

Figura 2 - Esquema da secagem pelo método de camada de espuma (foam-mat).



Fonte: (DANTAS, 2010).

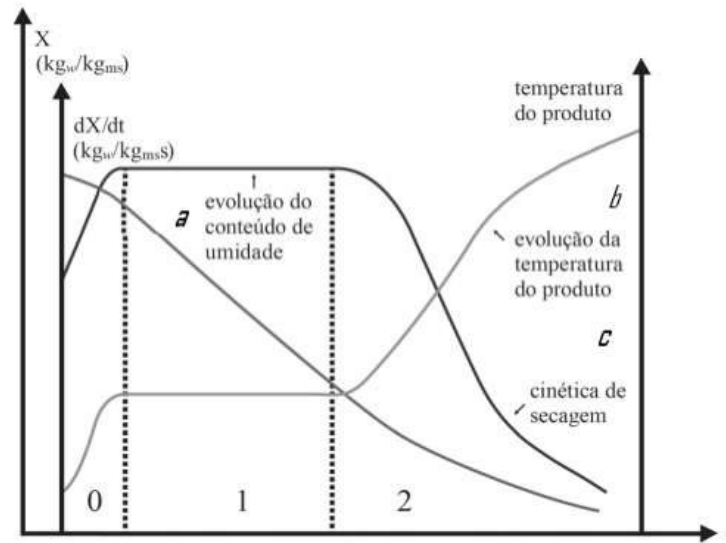
No caso dos produtos agrícolas, a secagem pode representar até 50% do consumo total de energia. Fatores como umidade do material, temperatura do ar de secagem, tempo de secagem no equilíbrio, desempenho do secador e consumo específico de energia devem ser considerados na análise econômica de um sistema de secagem. (BOERI; DA SILVA; FERREIRA, 2013; REINATO; BORÉM; VILELA; CARVALHO *et al.*, 2002).

### 3.3 Cinética de secagem

A partir dos dados de secagem, é possível realizar o estudo da cinética de secagem, com o auxílio da curva característica de secagem do material. O conhecimento da curva e da cinética de secagem é relevante devido ao auxílio na determinação das melhores condições de temperatura e tempo de secagem, fundamentando a escolha e desenvolvimento de equipamentos e cálculos de custos operacionais (RONCHETTI, 2014). Assim, para fundamentar a secagem, é necessário conhecer a umidade inicial, e ao longo do processo, a relação da água com a estrutura sólida e a forma como ocorre o transporte de água do interior do material até sua superfície (PARK; BIN; BROD, 2001).

A remoção de umidade de um produto alimentício segue uma série de velocidades de secagem, conforme ilustrado na Figura 3, onde mostra as curvas do processo de secagem (SINGH; HELDMAN, 2014).

Figura 3- Curvas de secagem



Fonte: (CESPE, 2019).

A curva (a) representa a diminuição do teor de água em base seca ( $X$ ) ao decorrer do processo de secagem. A curva (b) representa a taxa (ou velocidade) de secagem em relação ao tempo, obtida a partir da derivação da curva (a), 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) representa a variação da temperatura do produto em relação ao tempo durante a secagem (PARK; BIN; BROD, 2001).

Sabe-se que durante o processo de secagem a perda de água não acontece a uma velocidade constante, mas sim que a taxa de remoção de água diminui ao decorrer da curva de secagem. A forma precisa de uma curva de secagem normal varia conforme o alimento, com os diferentes tipos de secadores e em resposta às variações das condições de secagem, tais como a temperatura, a umidade, a velocidade do ar, o sentido do ar, a espessura do alimento, entre outros fatores (MELONI, 2003).

O período de secagem é comumente dividido em dois, um de velocidade constante e outro de velocidade decrescente. No primeiro período, as transferências de calor e massa são analisadas a partir da superfície do material para o ar de secagem, enquanto que no segundo período as análises são baseadas nas transferências internas que governam a secagem (PARK; ANTONIO; OLIVEIRA; PARK, 2007). Os modelos matemáticos são utilizados para ajustar os dados experimentais e são de grande importância na prática, já que permitem a redução de



exaustivos ensaios de laboratório na predição do comportamento de secagem de diversos materiais (WAUGHON; PENA, 2008).

### 3.4 Modelagem matemática

Modelos matemáticos são de suma importância na prática, pois por meio deles é possível prever o comportamento de processos. Através de modelos matemáticos é possível fazer estudos de secagem, o dimensionamento e a otimização do processo e determinação da viabilidade de sua aplicação comercial (GURGEL, 2014). Dentre os muitos modelos propostos para descrever a secagem de alimentos, os modelos que descrevem secagem em camadas finas são os mais utilizados. Esses modelos são classificados como teóricos, semi-teóricos e empíricos (FRANCO, 2015).

Os modelos teóricos levam em consideração os mecanismos de transferência em diferentes misturas e envolvem soluções de sistemas de equações linearmente independentes ou dependentes de transferência de calor e massa. Os modelos semi-empíricos geralmente são fundamentados na lei do resfriamento de Newton aplicados à transferência de massa e secagem isotérmica (ABALONE; GASTÓN; CASSINERA; LARA, 2006). Eles requerem um tempo pequeno comparado aos modelos teóricos de camada fina e não precisam de suposições da geometria do alimento, sua difusividade mássica e condutividade (PARRY, 1985).

Os modelos empíricos produzem uma relação direta entre conteúdo de umidade e o tempo de secagem, negligenciando os fundamentos do processo de secagem (ABALONE; GASTÓN; CASSINERA; LARA, 2006) e seus parâmetros não tem significado físico, portanto, eles não podem dar uma visão clara e precisa dos importantes processos que ocorrem durante a secagem, embora possam descrever a curva de secagem para as condições do experimento (KEEY, 1972).

Estes modelos além de permitir uma avaliação dos mecanismos e das propriedades físicas de transporte de massa durante o processo são importantes na seleção e desenvolvimento de equipamentos, e no cálculo dos custos operacionais (DIONELLO; BERBERT; MOLINA; PEREIRA *et al.*, 2009). Além da secagem, as isotermas também fornecem dados relevantes para etapas como embalagem e o armazenamento do produto (CASSINI MARCZAK; NOREÑA, 2004).

### 3.5 Isotermas de sorção

As isotermas de sorção descrevem a relação entre a atividade da água e o teor de umidade de equilíbrio de um alimento em temperatura constante. São úteis na compreensão das características das propriedades estruturais do produto, como propriedades termodinâmicas, propriedades específicas da superfície e propriedades de sorção. Por sua vez, essas propriedades fornecem informações valiosas sobre a estabilidade da vida útil e algumas etapas do processo, incluindo o empacotamento, armazenamento e design ou otimização do processo de secagem (ALPIZAR-REYES; CARRILLO-NAVAS; ROMERO-ROMERO; VARELA-GUERRERO *et al.*, 2017).

As isotermas possuem formas diferentes para cada tipo de alimento, uma vez que os mesmos possuem diferenças na estrutura física, composição química e quantidade de água ligada. Em decorrência disso, diversos autores propuseram modelos de ajuste de isotermas de sorção, os quais são úteis no conhecimento das características dos produtos (FELLOWS, 2006). 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; PARK; CORNEJO; FABBRO, 2008).

**Isotermas de dessorção:** São obtidas quando a amostra está completamente úmida e, ao passar do 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).

#### 3.5.1 Métodos para as isotermas de sorção

As formas e as posições das isotermas são determinadas por fatores diversos, como a composição e estrutura física da amostra, temperatura e metodologia utilizada. O método padrão para a determinação de isotermas de sorção é o método gravimétrico, que consiste em colocar o material em ambientes com umidades relativas e temperaturas conhecidas e constantes até atingir o equilíbrio termodinâmico. Quando o equilíbrio é atingido, situação

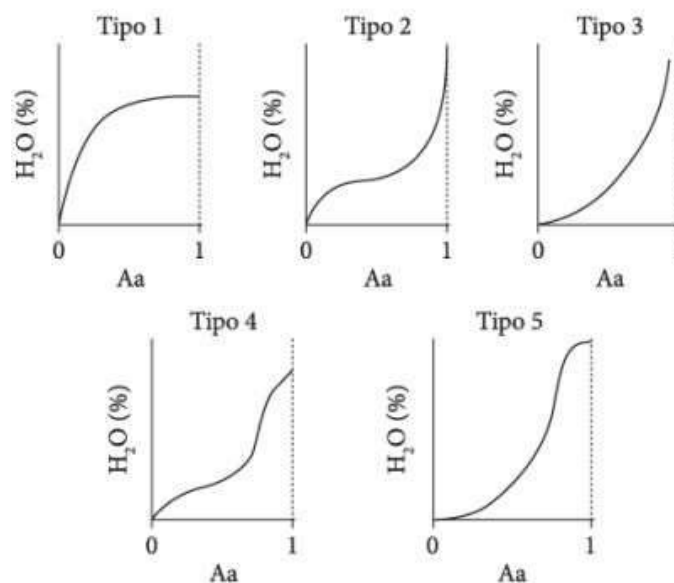
verificada através da massa da amostra permanecendo constante, o valor de atividade de água da amostra corresponde ao valor da umidade relativa do ambiente, e então é determinado o teor de umidade da amostra para obtenção do ponto atividade de água versus umidade (DAMODARAN, 2010; SPIESS; WOLF, 1983). Ainda que bastante preciso, este método tem o inconveniente de levar um tempo muito grande para o levantamento completo das isoterms, em geral de 20 a 30 dias para cada temperatura (AMBROS, 2013).

A relação entre o teor de umidade de equilíbrio e a umidade relativa do ar, em uma temperatura constante, pode ser expressa por meio de curvas de isoterms, dessa maneira, o conhecimento das isoterms de sorção dos alimentos é de extrema importância para os processos de conservação dos alimentos, uma vez que o princípio por trás dela é o de eliminar a água livre presente nos alimentos, tornando-a indisponível para agentes deteriorantes (CASTILLO; MARTÍNEZ; GONZÁLEZ; PACIN *et al.*, 2003)

### 3.5.2 Tipos de curvas

De acordo com (BRUNAUER; DEMING; DEMING; TELLER, 1940), a maioria destas pode ser agrupada em cinco classes. O formato dessas curvas indica o tipo de forças existentes na ligação de água com a superfície do material higroscópico, permitindo assim analisar a estrutura do material. Na Figura 4 é apresentado um esboço destes tipos de isoterms.

Figura 4 – Tipos de isoterms descritas por Brunauer.



Fonte: (MATHLOUTHI; ROGÉ, 2003)

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.

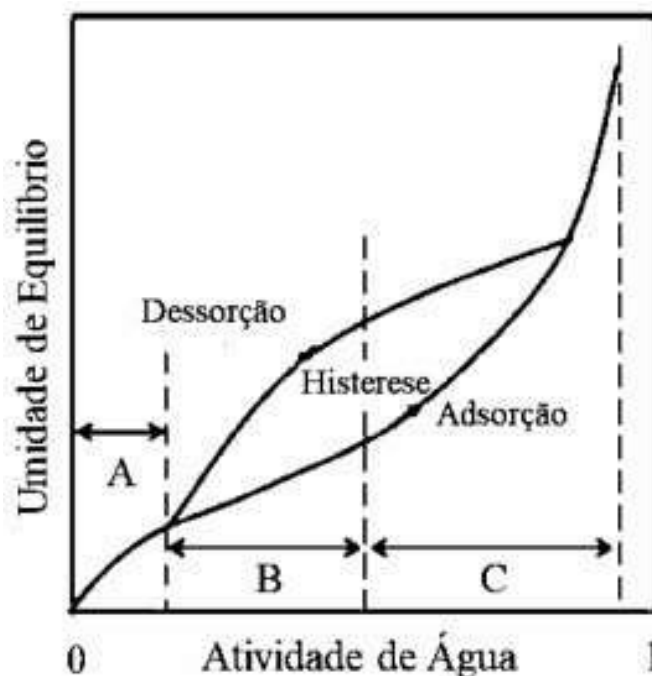
Isoterma tipo III – Conhecida como isoterma de Flory- Huggins, ocorre em alimentos com grande concentração de sais, açucares e moléculas hidrofílicas.

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.

As isotermas de polímeros hidrofílicos, tal como fibras naturais, e de alimentos são do tipo II. Isotermas de borracha hidrofílica, plástico, fibras sintéticas e alimentos ricos em componentes solúveis são do tipo III. Isotermas de certos materiais inorgânicos (tal como óxido de alumínio) são do tipo IV. Porém para muitos materiais, as isotermas não podem ser classificadas dessa forma, podendo enquadrar-se em mais de um tipo (BRUNAUER; DEMING; DEMING; TELLER, 1940).

Figura 5 – Isoterma de sorção de um produto alimentício



Fonte: (LEMUS, 2011).

Conforme observado na Figura 5, uma isoterma é tipicamente dividida em três zonas:

Zona A- representa a água mais fortemente ligada ao produto e menos móvel e hidrofílicos do material. É denominada como a água da monocamada, a qual é fixa aos grupos polares de certos compostos como o amido, fibras, etc. Esta água não pode ser congelada, não está disponível para reações químicas e apresenta calor de vaporização muito superior ao da água pura.

Zona B - corresponde a umidade das camadas de hidratação dos constituintes solúveis de um alimento a ligação entre as moléculas de água e o material é mais fraca do que na região A, e o calor de vaporização da água é levemente superior ao da água pura. A água dessa região é considerada de transição entre a água livre e a água ligada aos compostos orgânicos. A atividade de água nesta zona da isoterma está entre 0,25, 0,3 e 0,8.

Zona C- compreende a umidade livre ligada aos alimentos e mais móvel, onde possui a mesma entalpia de vaporização da água pura. Encontra-se retida fisicamente em capilares para permitir o desenvolvimento de microrganismos, reações enzimáticas e químicas. Equivale à atividade de água de 0,8 a 0,9. (ANDRADE; LEMUS; PEREZ, 2011).

### **3.5.3 Modelos matemáticos de isotermas de sorção**

Existem diversos modelos matemáticos de ajuste de isotermas de sorção, estes descrevem o comportamento das isotermas, sendo úteis no conhecimento das características do produto (PARK; BIN; BROD, 2001). Tais modelos facilitam a predição de um maior número de pontos partindo de poucos pontos experimentais, devido à limitação de medida dos higrômetros em baixos níveis de atividade de água ( $a_w$ ) e ao rápido desenvolvimento de fungos em altos níveis de  $a_w$  (SILVA; SILVA; PENA, 2008).

Alguns modelos matemáticos empíricos e teóricos têm sido propostos para o ajuste das curvas de umidade de equilíbrio de vários produtos, em função da atividade de água e também da temperatura do ar, em que, dentre os mais comuns e por sua relativa precisão e generalidade de uso, podem ser citados o de Brunauer, Emmet, Teller (BET), Guggenheim, Anderson, DeBoer (GAB), Halsey e Oswin (SILVA; GOUVEIA; ALMEIDA, 2002).

O uso desses modelos é de grande importância tanto no armazenamento quanto na secagem. Durante a secagem e devido às variações contínuas de temperatura e umidade relativa do ar em contato com o produto, ocorrem mudanças no teor de umidade de equilíbrio e o seu cálculo é facilitado com o auxílio dessas equações (SILVA; GOUVEIA; ALMEIDA, 2002).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Local da pesquisa

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Surfactantes e biodiesel, situado na Universidade Federal do Maranhão (UFMA - Campus Bacanga), na cidade de São Luís - MA.

### 4.2 Preparo do Sistema espumante

Os cocos verdes (*Cocos nucifera L.*) adquiridos no comércio local, no município de São Luís - MA. A polpa *in natura* foi removida manualmente da casca e higienizadas, posteriormente foram fragmentadas em um processador de alimentos (Modelo Chrome 4655, Oster, USA). Preparou-se os sistemas espumantes com 30 gramas de albumina de ovo em pó (CPovos, Mogi das Cruzes, Brasil), misturando-a com 100 ml de água e agitando com a o auxílio de um mixer (modelo 2615R, Oster, USA) até formar o ponto de neve.

Em seguida, acrescentou-se as porções de 7,5 gramas de maltodextrina (Neonutri, São Paulo, Brasil), 15 gramas de amido (Maizena, São Paulo, Brasil) e adicionou-se 5,25, 7,75 e 14,75 gramas do albúmen para as concentrações de 10%, 20% e 30% (m/m) de polpa presente na composição, respectivamente.

### 4.3 Secagem

Para realização da secagem, as espumas formadas foram dispostas em quatro placas cilíndricas de alumínio, com diâmetro de 9,2 cm e altura de 2,5 cm. Em seguida, realizou-se as medições das espessuras, em diferentes posições, com um paquímetro (modelo Vis, Polônia) de precisão de 0,005 mm. Cada conjunto de amostras foram secas separadamente em secador convectivo de bandejas (modelo PE14, Pardal, Brasil), conforme mostrado na Figura 6, nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C, e velocidade do ar de secagem de 3,0 m/s. As temperaturas foram escolhidas utilizando o critério operacional para evitar perdas de compostos voláteis. Portanto, as temperaturas de maior interesse de produção comercial.

Figura 6- Secador de bandejas (modelo PE14, Pardal, Brasil)



Fonte: [www.pardal.com.br/desidratador-pe-14analogico](http://www.pardal.com.br/desidratador-pe-14analogico) (acesso em 21/11/2020).

Durante o experimento foram mensuradas as massas, temperatura e a umidade relativa, utilizando uma balança semianalítica de precisão  $10^{-3}$  g (modelo UX220H, Shimadzu, Japão) e um higrômetro (modelo INS-28, Instrusul, Brasil) respectivamente, conforme mostrado na Figura 7, em intervalos de tempo de 5, 10 e 20 minutos com 10 pontos em cada intervalo até o produto atingir um peso constante. Na análise gráfica das curvas de secagem da polpa de coco verde, foi plotado a taxa de secagem versus a umidade em base seca para cada tempo de secagem, nas concentrações e temperaturas propostas.

Figura 7- Balança semianalítica e um higrômetro.



Fonte: Autor (2020).

#### 4.4 Determinação da umidade da amostra

O conteúdo de umidade inicial do material foi determinado em estufa a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 5 horas segundo o método AOAC 934.06 (INT, 2007). O teor de umidade de equilíbrio em base seca (b.s.) foi obtido com base nas diferenças de massa da amostra no equilíbrio e seca Equação 1.

$$X_e = \frac{m_{agua}}{m_{seca}} \quad (1)$$

onde:  $X_e$  - Teor de umidade de equilíbrio em base seca (b.s.);  $m_{agua}$  - Massa de água adsorvida pela amostra(g);  $m_{seca}$  - Massa seca da amostra (g).

#### 4.5 Isotermas

A partir dos dados obtidos durante a secagem foram realizadas as análises de equilíbrio higroscópico (Isotermas). Para obter as isotermas, realizou-se a secagem do sistema espumante com 20% (m/m) de polpa em estufa convectiva à temperatura de 30°C, 45°C e 60 °C e velocidade do ar de 3,0 m/s, durante 24 horas, por apresentar melhores resultados de retirada de água livre do material, conforme estudos realizados previamente.

Para a obtenção das isotermas de desorção empregou-se o método gravimétrico estático, utilizando-se soluções saturadas de ácido sulfúrico ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) 95% PA, (Quimex, São Paulo, Brasil). Nas concentrações de 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80%. Desta forma foram criados microssistemas com atividades de água ( $a_w$ ) que variaram de 0,0059 até 0,8882, para cada concentração da solução ácida nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C.

Para cada conjunto de amostras pesou-se em torno de 1,0 g de amostra utilizando uma balança semi-analítica de precisão 0,001 g (modelo BL320H, Shimadzu, Japão) em um copo de plástico previamente tarado e posicionado sobre um suporte composto por um conjunto de três pedaços de tubo PVC e um pedaço de uma tela de malha para que as amostras fiquem suspensas no interior do frasco de vidro hermético, contendo em seu fundo uma das soluções de  $H_2SO_4$ .

O mesmo processo foi repetido para todas as soluções de ácido sulfúrico, onde em cada frasco foi colocado um total de três amostras. Após os frascos contendo as amostras foram armazenados em uma incubadora B.O.D. (modelo SP-500, SPLabor, Brasil), conforme observado na Figura 8, às temperaturas de 30, 45 e 60 °C. As amostras foram pesadas em intervalos de tempo de 2 dias até atingirem peso constante. Os resultados da umidade equilíbrio do albúmen foram apresentados em base seca “b.s” (kg água/kg sólido seco).



Figura 8 – Estufa incubadora B.O.D.



Fonte: splabor (acesso em 30/11/2020).

#### 4.6 Modelagem matemática (secagem)

Foram utilizados modelos empíricos de camada fina: Weibull (Eq. 2), Peleg (Eq. 3), Henderson-Pabis (Eq. 4), Logarítmica (Eq. 5), Wang e Sing (Eq. 6), Lewis (Eq. 7), Page (Eq. 8), Midilli (Eq. 9), Dois Termos (Eq. 10) e Aproximação por Difusão (Eq. 11). As modelagens dos modelos testados foram realizadas por meio do software interativo do Matlab® 7.1 (The MathWorks Inc., Natick, MA, EUA), tendo como objetivo a determinação das constantes e obtenção das curvas teóricas de cada modelo, para isso implantou-se algorítmicos tendo como dados de entrada os encontrados experimentalmente.

Tabela 1: Modelos de ajuste de secagem em camada fina.

	Equações
$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp\left(-\frac{t}{k_1}\right)$	(2)
$X = X_0 - \left(\frac{t}{k_1 + k_2 t}\right)$	(3)
$X = X_e + (X_0 - X_e) k_1 \exp(-k_2 t)$	(4)
$X = X_e + (X_0 - X_e) k_1 \exp(-k_2 t) + k_3$	(5)
$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(k_1 t^2 - k_2 t + 1)$	(6)
$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-k_1 t)$	(7)
$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-k_1 t^{k_2})$	(8)
$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-k_1 t^{k_2}) + k_3 t$	(9)
$X = X_e + (X_0 - X_e) (k_1 \exp(-k_2 t) + k_3 \exp(-k_4 t))$	(10)
$X = X_e + (X_0 - X_e) (k_1 \exp(-k_2 t) + (1 - k_1) \exp(-k_2 (k_3 t)))$	(11)

Onde  $X$  é conteúdo de umidade (kg/kg, b.s.),  $X_e$  é o conteúdo de umidade de equilíbrio (kg/kg, b.s.),  $X_0$  é o conteúdo de umidade inicial (kg/kg, b.s.),  $t$  é o tempo (s),  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$  são as constantes de secagem ( $s^{-1}$ ; adimensional).

#### 4.7 Modelagem matemática (isoterma)

Os dados experimentais foram ajustados pelos modelos teóricos: GAB (Eq. 12), BET (Eq. 13) e Langmuir (Eq. 14) e os modelos empíricos de Henderson (Eq. 15), Halsey (Eq. 16), Iglesias e Chirife (Eq. 17), Caurie (Eq. 18), Oswin (Eq. 19), Chung e Pfost (Eq. 20) (RIZVI, 2014; TIMMERMANN; CHIRIFE; IGLESIAS, 2001). A modelagem e simulação foi realizada por meio do software interativo do Matlab® 7.1 (The MathWorks Inc., Natick, MA, EUA), tendo como objetivo a determinação das constantes dos modelos por regressão não linear usando a função “nlinfit” considerando a alternativa “roubust” de análise.

Tabela 2: Modelos de ajuste de isotermas de sorção de água.

Equações	
$X_e = \frac{X_m C_g K_g a_w}{(1 - K_g a_w)(1 + (C_g - 1)(K_g a_w))}$	(12)
$X_e = \frac{X_m C_b a_w}{(1 - a_w)(1 + (C_b - 1)a_w)}$	(13)
$X_e = (X_m C a_w) / (1 + (C a_w))$	(14)
$X_e = [-\log(1 - a_w) / (b)]^{1/a}$	(15)
$X_e = (-a / \log(a_w))^{1/b}$	(16)
$X_e = a + b(a_w / 1 - a_w)$	(17)
$X_e = \exp(a_w \log(a)) - (1/4,5b)$	(18)
$X_e = a(a_w / 1 - a_w)^b$	(19)
$X_e = a + (\log(a_w)b)$	(20)

Onde:  $a_w$  - é a atividade de água;  $C$  e  $K$  - Parâmetros dos modelos de GAB e BET (adimensionais);  $a$  e  $b$  - Parâmetros.

#### 4.8 Determinação do calor de sorção

Justamente com as isotermas de sorção, as propriedades termodinâmicas da água formam um meio útil para o estudo das interações das moléculas de água com o material (VILLA-VÉLEZ; VÁQUIRO; BON; TELIS-ROMERO, 2012). Para determinação do calor isotérico de dessorção utilizou-se a Equação de *Clausius-Clayperon*, Equação 21, a qual relaciona a mudança da umidade relativa do ar com a temperatura, onde plotando-se  $\ln(UR)$  versus  $1/T$ , para uma umidade específica, determina-se a inclinação da reta, que equivale a  $q_{st}/R$ .

$$\frac{\partial(\ln a_w)}{\partial(1/T)} = -\frac{\Delta H}{R} \quad (21)$$

Onde:  $\Delta H$  - Entalpia de sorção da água (kJ/kmol),  $R$  - Constante universal dos gases (8,314 J/mol.K),  $T$  - Temperatura absoluta (K)

#### 4.9 Análise estatística dos resultados

Para verificar o grau de ajuste dos modelos, foram consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do erro médio relativo (MSE) sendo que, de modo geral, quanto menores forem as magnitudes desses índices melhores os ajustes do modelo aos dados observados. O  $R^2$  determina a eficiência dos modelos propostos frente à variação dos dados. Já o parâmetro estatístico MSE é um critério que avalia a precisão das estimativas (VILLA-VÉLEZ; VÁQUIRO; BON; TELIS-ROMERO, 2012). Os parâmetros dos modelos de ajuste das cinéticas de secagem foram estimados através das funções do programa Matlab R2013b© (The Mathworks Inc., Natick, MA, USA). Os valores de  $R^2$  e MSE para cada modelo foram calculados pelas Equações 22 e 23, respectivamente:

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^{\beta} (\gamma_k^* - \bar{\gamma})^2}{\sum_{k=1}^{\beta} (\gamma_k - \bar{\gamma})^2} \quad (22)$$

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{\beta} (y_k^* - \bar{y})^2} \quad (23)$$

Em que  $MSE$  - Erro médio relativo;  $R^2$  - Coeficiente de determinação;  $y$  - Representa os valores experimentais;  $y^*$  - Representa os valores calculados;  $\bar{y}$  - Média dos valores experimentais;  $\beta$  - Quantidade de valores experimentais.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Secagem do sistema espumante

A Figura 9 mostra o resultado do processo de secagem do sistema espumante de polpa de coco verde. O produto apresentou-se poroso, quebradiço e de coloração amarelada, podendo ser facilmente transformado em pó seco.

Figura 9 – Sistema espumante após o procedimento de secagem.



Fonte: Autor (2020)

### 5.2 Modelagem matemática das cinéticas de secagem

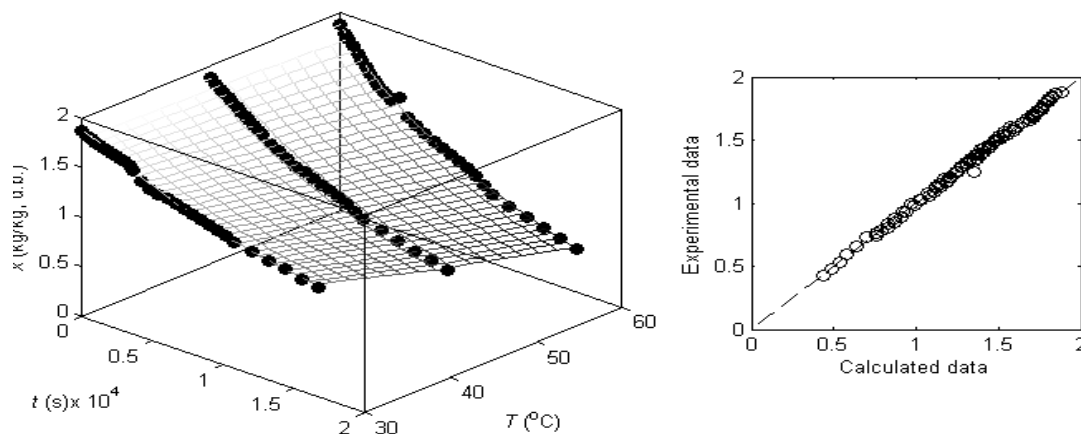
Os ensaios ocorreram nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C, com variação de  $\pm 2,5^\circ\text{C}$ . As Figuras 10, 11 e 12 mostram os conteúdos de umidade experimental  $X$ , dados em base seca (b.s), em diferentes composições de secagem para os sistemas espumantes. A umidade relativa do ar seco, variando de 10- 40%, 10 – 38,7% e 10 – 37,8%, e a espessura das amostras, de  $0,935 \pm 0,198\text{cm}$ ,  $1,035 \pm 0,298 \text{ cm}$  e  $1,29 \pm 0,168 \text{ cm}$ , foram determinadas nos procedimentos experimentais para as concentrações de 10%, 20% e 30%, respectivamente.

Os resultados da Figura 10 mostraram para a concentração de 10% de polpa valores de  $X$  entre 1,883 – 1,119kg/kg, 1,883 – 0,760kg/kg e 1,883 – 0,488kg/kg correspondentes aos tempos de 0 – 21600 s e temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C, respectivamente. Na Figura 11 para a concentração de 20%, os valores de  $X$  foram entre 1,675 – 1,073kg/kg, 1,675 – 1,073kg/kg e 1,675 – 0,361kg/kg, foram obtidos nos tempos de 0 – 16200 s e temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C, respectivamente.

Já na Figura 12 para a concentração de 30%, os valores de  $X$  foram entre 1,886 – 1,376kg/kg, 1,886 – 1,202kg/kg e 1,886 – 0,760kg/kg, foram obtidos nos tempos de 0 – 16200 s e temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C, respectivamente. Todos os experimentos mostraram um período de taxa decrescente. O tempo para alcançar o equilíbrio foi de 15000s, 9600s e 8400s para 10% de polpa, 12000s, 9000s e 7800s para 20% e 12000s, 8400s e 7800s para 30%, correspondentes às temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C, respectivamente.

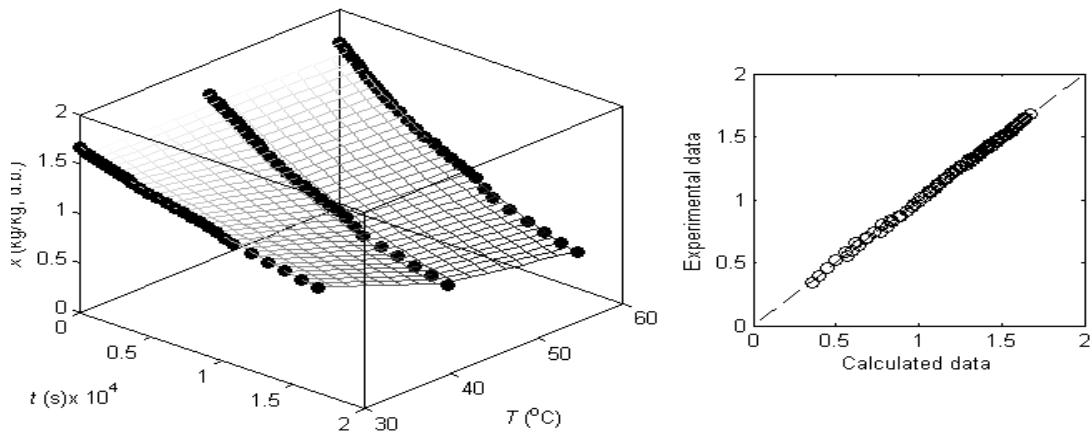
Na Figura 10, 11 e 12, encontram-se representadas graficamente as curvas de secagem em camada de espuma da polpa de coco verde *in natura* nos modelos de Midilli, visto que este apresentou um melhor ajuste, descrevendo com maior precisão os dados experimentais da cinética de secagem nos três níveis de temperatura e quantidade de polpa.

Figura 10 - Curvas de secagem do sistema espumante de coco verde nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C simuladas pelo modelo Midilli na concentração de 10% de polpa.



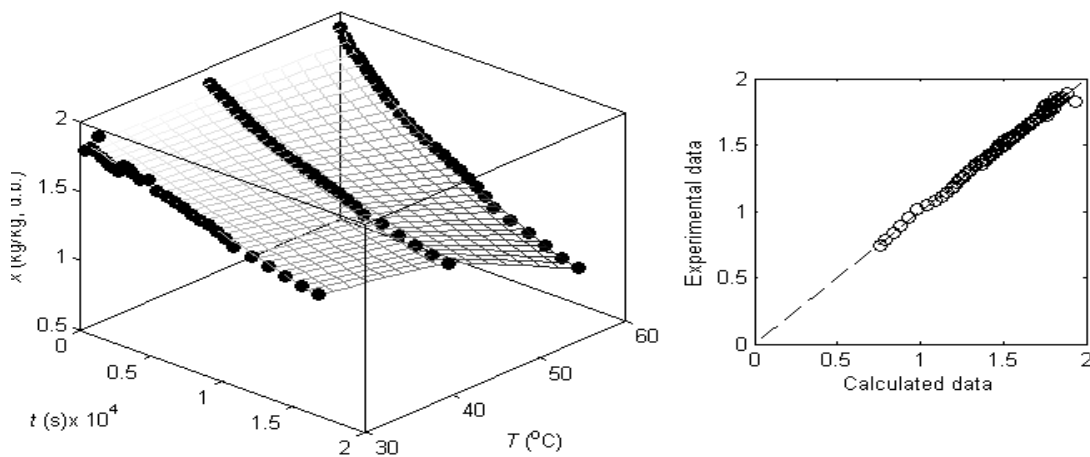
Fonte: (Autor, 2020).

Figura 11 - Curvas de secagem do sistema espumante de coco verde nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C simuladas pelo modelo Midilli na concentração de 20% de polpa.



Fonte: (Autor, 2020).

Figura 12 - Curvas de secagem do sistema espumante de coco verde nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C simuladas pelo modelo Midilli na concentração de 30% de polpa.



Fonte: (Autor, 2020).

Constatou-se que a proporção de 20% (m/m) apresentou melhor resultados de retirada de água do material, ou seja, um material visivelmente mais seco e que apresentou uma melhor representação gráfica do processo. A análise dessas curvas revela que à medida que a temperatura aumenta o tempo de secagem diminui e as curvas na temperatura de 60 °C apresentaram um ângulo mais acentuado do que as curvas de 45 °C e, por sua vez, mais acentuado que as curvas de 30 °C.

Além disso, em todas as curvas apresentadas, é possível observar a mesma tendência de comportamento das taxas de secagem: em um primeiro momento, a quantidade de água no

material diminui em taxa constante e, em seguida, essa taxa passa a ser decrescente, até que o material atinge a umidade de equilíbrio, quando a taxa é nula (OLIVEIRA, 2019).

Comparando as curvas de secagem, facilmente percebe-se essa influência da temperatura no tempo de secagem. Esse comportamento é similar às observações realizadas por (MACHADO, 2019) e (ARAUJO, 2019) ao estudarem a secagem em camada de espuma de polpa de caju e goiaba, respectivamente. Em ambos os estudos, constatou-se que as espumas secaram mais rapidamente no início do processo do que no final e que o comportamento da secagem é semelhante e condizente com o tempo de secagem em cada temperatura, que apresentou comportamento esperado e inversamente proporcional à temperatura do processo, ou seja, menores temperaturas implicaram em secagens mais longas.

As Tabelas 3, 4 e 5 exibem os resultados dos parâmetros da modelagem empregando modelos de camada fina nas diferentes concentrações e temperaturas do estudo.

Tabela 3: Parâmetros estimados para os modelos a concentração de 10% nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C.

Modelos	Parâmetros	Temperatura °C		
		30	45	60
<b>Weibull</b>	$k_1$	20463	11267	6908,9
	$MRE$	1,2367	0,9460	4,7794
	$R^2$	0,9910	0,9983	0,9876
	$MSE$	0,0179	0,0113	0,0347
<b>Peleg</b>	$k_1$	12515	7536,4	4931,5
	$k_2$	0,5383	0,4290	0,4043
	$R^2$	0,9928	0,9984	0,9953
	$MSE$	0,0155	0,8928	2,1202
	$MRE$	1,0087	0,0108	0,0217
<b>Henderson-PabiS</b>	$k_1$	0,9908	0,9974	1,0053
	$k_2$	$4,770 \times 10^{-5}$	$8,835 \times 10^{-5}$	$1,457 \times 10^{-5}$
	$R^2$	0,9905	0,9983	0,9868
	$MSE$	0,0176	0,0114	0,0354
	$MRE$	1,2026	0,9667	4,7961
<b>Logaritmico</b>	$k_1$	0,7631	1,0411	1,1908
	$k_2$	$7,239 \times 10^{-5}$	$8,139 \times 10^{-5}$	$9,771 \times 10^{-5}$
	$k_3$	0,3482	-0,0701	-0,3197
	$R^2$	0,9931	0,9984	0,9945
	$MSE$	0,0148	0,0106	0,0243
	$MRE$	0,9504	0,8680	2,1959
<b>WangSing</b>	$k_1$	1,178E-09	2,080E-09	3,304E-09
	$k_2$	$-5,104 \times 10^{-5}$	$-8,05 \times 10^{-5}$	$-1,124 \times 10^{-5}$
	$R^2$	0,9938	0,9977	0,9906
	$MSE$	0,0140	0,0150	0,0414
	$MRE$	0,9066	1,1772	3,9137

<b>Lewis</b>	$k_1$	$4,886 \times 10^{-5}$	$8,875 \times 10^{-5}$	$1,447 \times 10^{-5}$
	$R^2$	0,9910	0,9983	0,9876
	$MSE$	0,0179	0,0113	0,0347
	$MRE$	1,2367	0,9460	4,7794
<b>Page</b>	$k_1$	$8,761 \times 10^{-5}$	$8,561 \times 10^{-5}$	$8,335 \times 10^{-5}$
	$k_2$	0,9360	1,0040	1,0630
	$R^2$	0,9918	0,9983	0,9876
	$MSE$	0,0166	0,0111	0,0381
	$MRE$	1,1009	0,9221	4,6504
<b>Midilli</b>	$k_1$	$3,599 \times 10^{-5}$	$1,148 \times 10^{-5}$	$4,299 \times 10^{-4}$
	$k_2$	1,0692	0,9632	0,8407
	$k_3$	$1,453 \times 10^{-5}$	$-3,88 \times 10^{-6}$	$-1,934 \times 10^{-5}$
	$R^2$	0,9938	0,9984	0,9962
	$MSE$	0,0141	0,0107	0,0172
	$MRE$	0,9106	0,8786	1,6625
<b>DoisTerm</b>	$k_1$	0,0104	$3,120 \times 10^{-3}$	$-6,42 \times 10^{-3}$
	$k_2$	0,9937	0,9937	0,9937
	$k_3$	0,9896	0,9969	1,0065
	$k_4$	$4,754 \times 10^{-5}$	$8,828 \times 10^{-5}$	$1,460 \times 10^{-5}$
	$R^2$	0,9899	0,9982	0,9858
	$MSE$	0,0172	0,0113	0,0354
<b>AproDif</b>	$k_1$	0,9966	0,9916	1,0285
	$k_2$	$5,206 \times 10^{-5}$	$8,835 \times 10^{-5}$	$1,490 \times 10^{-4}$
	$k_3$	-3,7045	1,0007	3,1091
	$R^2$	0,9934	0,9982	0,9863
	$MSE$	0,0141	0,0114	0,0370
	$MRE$	0,9083	0,9667	4,8047

Fonte: (Autor, 2020).

Tabela 4: Parâmetros estimados para os modelos a concentração de 20% nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C.

Modelos	Parâmetros	Temperatura °C		
		30	45	60
<b>Weibull</b>	$k_1$	26469	10311	7804,9
	$MRE$	0,7271	2,8080	7,3197
	$R^2$	0,9981	0,9959	0,9852
	$MSE$	0,0103	0,0261	0,0470
<b>Peleg</b>	$k_1$	18709	8569,7	7033,3
	$k_2$	0,5433	0,3682	0,3322
	$R^2$	0,9973	0,9980	0,9985
	$MSE$	0,0081	0,0125	0,0114
	$MRE$	0,5787	1,2887	1,4891
<b>Henderson-PabiS</b>	$k_1$	0,9876	1,0280	1,0398
	$k_2$	$3,629 \times 10^{-5}$	$1,013 \times 10^{-4}$	$1,351 \times 10^{-4}$
	$R^2$	0,9980	0,9948	0,9815
	$MSE$	0,0055	0,0213	0,0431
	$MRE$	0,4112	2,2803	6,6929



<b>Logaritmico</b>	$k_1$	0,9984	1,2297	1,4598
	$k_2$	$3,577 \times 10^{-5}$	$7,222 \times 10^{-5}$	$6,884 \times 10^{-5}$
	$k_3$	-0,0144	-0,2927	-0,6173
	$R^2$	0,9979	0,9984	0,9984
	$MSE$	0,0055	0,0110	0,0124
	$MRE$	0,4096	1,1186	1,5050
<b>WangSing</b>	$k_1$	$6,706 \times 10^{-10}$	$1,876 \times 10^{-9}$	$2,284 \times 10^{-9}$
	$k_2$	$-3,843 \times 10^{-5}$	$-8,18 \times 10^{-5}$	$-9,748 \times 10^{-5}$
	$R^2$	0,9971	0,9986	0,9978
	$MSE$	0,0094	0,0093	0,0167
	$MRE$	0,6622	0,9098	1,8019
<b>Lewis</b>	$k_1$	$4,886 \times 10^{-5}$	$9,698 \times 10^{-5}$	$1,281 \times 10^{-4}$
	$R^2$	0,9981	0,9959	0,9852
	$MSE$	0,0103	0,0261	0,0470
	$MRE$	0,7271	2,8080	7,3197
<b>Page</b>	$k_1$	$6,694 \times 10^{-5}$	$2,996 \times 10^{-5}$	$2,040 \times 10^{-5}$
	$k_2$	0,9377	1,1312	1,2077
	$R^2$	0,9975	0,9981	0,9892
	$MSE$	0,0068	0,0111	0,0339
	$MRE$	0,5002	1,1778	4,9008
<b>Midilli</b>	$k_1$	$1,698 \times 10^{-4}$	$4,681 \times 10^{-5}$	$1,402 \times 10^{-4}$
	$k_2$	0,7825	1,0701	0,9459
	$k_3$	$-1,384 \times 10^{-5}$	$-4,97 \times 10^{-6}$	$-2,086 \times 10^{-5}$
	$R^2$	0,9981	0,9985	0,9985
	$MSE$	0,0056	0,0096	0,0106
	$MRE$	0,4280	0,9994	1,4591
<b>DoisTerm</b>	$k_1$	0,0137	-0,0333	-0,0486
	$k_2$	0,9937	0,9937	0,9937
	$k_3$	0,9860	1,0332	1,0485
	$k_4$	$3,611 \times 10^{-5}$	$1,021 \times 10^{-4}$	$1,367 \times 10^{-4}$
	$R^2$	0,9982	0,9949	0,9807
	$MSE$	0,0047	0,0197	0,0423
	$MRE$	0,3683	2,1455	6,5756
<b>AproDif</b>	$k_1$	0,9482	1,0499	1,0346
	$k_2$	$3,629 \times 10^{-5}$	$8,567 \times 10^{-5}$	$1,068 \times 10^{-4}$
	$k_3$	1,0001	-0,7195	-1,1138
	$R^2$	0,9979	0,9982	0,9980
	$MSE$	0,0055	0,0116	0,0126
	$MRE$	0,4112	1,1779	1,7391

Fonte: (Autor, 2020).

Tabela 5: Parâmetros estimados para os modelos a concentração de 30% nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C.

Modelos	Parâmetros	Temperatura °C		
		30	45	60
<b>Weibull</b>	$k_1$	28118	16404	7414,9
	$MRE$	1,3762	0,8660	3,1068
	$R^2$	0,9582	0,9979	0,9855

	<i>MSE</i>	0,0238	0,0132	0,0319
<b>Peleg</b>	$k_1$	26983	12633	7250,4
	$k_2$	0,2935	0,6906	0,4596
	$R^2$	0,9601	0,9986	0,9976
	<i>MSE</i>	0,0214	0,0062	0,0148
	<i>MRE</i>	1,2336	0,4266	1,1811
<b>Henderson-PabiS</b>	$k_1$	0,9977	0,9799	1,0114
	$k_2$	$3,530 \times 10^{-5}$	$5,824 \times 10^{-5}$	$1,369 \times 10^{-4}$
	$R^2$	0,9568	0,9974	0,9841
	<i>MSE</i>	0,0239	0,0081	0,0324
	<i>MRE</i>	1,3844	0,5391	3,0965
<b>Logaritmico</b>	$k_1$	4,5807	0,8454	1,3401
	$k_2$	$6,279 \times 10^{-6}$	$7,46 \times 10^{-5}$	$7,628 \times 10^{-5}$
	$k_3$	-4,0480	0,1622	-0,4205
	$R^2$	0,9598	0,9986	0,9977
	<i>MSE</i>	0,0100	0,0059	0,0116
	<i>MRE</i>	1,1570	0,4020	0,9335
<b>WangSing</b>	$k_1$	$2,902 \times 10^{-10}$	$1,552 \times 10^{-9}$	$3,304 \times 10^{-9}$
	$k_2$	$-3,263 \times 10^{-5}$	$-6,18 \times 10^{-5}$	$-1,124 \times 10^{-4}$
	$R^2$	0,9602	0,9976	0,9953
	<i>MSE</i>	0,0214	0,0106	0,0255
	<i>MRE</i>	1,2292	0,6786	1,9250
<b>Lewis</b>	$k_1$	$3,55 \times 10^{-5}$	$6,095 \times 10^{-5}$	$1,348 \times 10^{-4}$
	$R^2$	0,9582	0,9979	0,9855
	<i>MSE</i>	0,0238	0,0132	0,0319
	<i>MRE</i>	1,3762	0,8660	3,1068
<b>Page</b>	$k_1$	$2,111 \times 10^{-5}$	$1,411 \times 10^{-5}$	$4,98 \times 10^{-5}$
	$k_2$	1,0567	0,9076	1,1128
	$R^2$	0,9593	0,9989	0,9873
	<i>MSE</i>	0,0222	0,0044	0,0304
	<i>MRE</i>	1,2722	0,3187	2,7468
<b>Midilli</b>	$k_1$	$1,894 \times 10^{-2}$	$1,416 \times 10^{-4}$	$4,159 \times 10^{-4}$
	$k_2$	$5,01 \times 10^{-7}$	0,90715	0,8241
	$k_3$	$-3,07 \times 10^{-5}$	$-3,67 \times 10^{-8}$	$-2,012 \times 10^{-5}$
	$R^2$	0,9602	0,9988	0,9986
	<i>MSE</i>	0,0190	0,0044	0,0090
	<i>MRE</i>	1,1038	0,3186	0,7910
<b>DoisTerm</b>	$k_1$	0,0029	0,0233	-0,0135
	$k_2$	0,9937	0,9937	0,9937
	$k_3$	0,9974	0,9769	1,0139
	$k_4$	$3,526 \times 10^{-5}$	$5,78 \times 10^{-5}$	$1,374 \times 10^{-4}$
	$R^2$	0,9534	0,9978	0,9829
	<i>MSE</i>	0,0238	0,0071	0,0320
	<i>MRE</i>	1,3798	0,4835	3,0699
<b>AproDif</b>	$k_1$	0,9799	0,94879	-0,2086
	$k_2$	$3,53 \times 10^{-5}$	$5,489 \times 10^{-5}$	$4,483 \times 10^{-7}$
	$k_3$	1,0016	8,1807	178,72
	$R^2$	0,9552	0,9988	0,9977
	<i>MSE</i>	0,0239	0,0045	0,0563

<i>MRE</i>	1,3844	0,3270	4,3018
------------	--------	--------	--------

Fonte: (Autor, 2020).

Para todos os modelos empregados ocorreu um aumento do erro médio relativo com a temperatura, provavelmente devido ao efeito causado com o aumento da temperatura no tempo gasto pelo sistema para entrar em equilíbrio, esse efeito foi similar ao observado por (Santos, 2018) ao estudar a cinética de secagem das fibras de coco verde. Do mesmo modo os valores das constantes aumentam com a elevação da temperatura, e esse comportamento foi observado por (Alexandre et al., 2006) ao estudar a cinética secagem em camada de espuma da polpa de pitanga. Os dados experimentais na temperatura de 60 °C produziu uma tendência não linear, causando uma baixa precisão nos modelos ajustados, devido ao aumento de energia térmica no experimento.

Entre todos esses modelos, alguns tiveram uma avaliação estatística satisfatória. Para a concentração de 10%, os modelos de Midilli (com  $R^2 = 0,998$ ,  $MRE < 0,878\%$  e  $MSE < 0,010$ ) e Logaritmico (com  $R^2 > 0,998$ ,  $MRE < 0,868\%$  e  $MSE < 0,010$ ) foram os melhores modelos que se ajustaram aos valores experimentais. Por outro lado, os modelos de WangSing, Logaritmico, Peleg, Midilli, Dois termos e Aproximação por difusão mostraram os melhores resultados de ajuste para a concentração de 20%, sendo o modelo de Midilli o que teve melhor precisão estatística, com  $R^2 > 0,998$ ,  $MRE < 0,428\%$  e  $MSE < 0,005$ .

Já para a concentração de 30%, os modelos de Page (com  $R^2 = 0,998$ ,  $MRE < 0,318\%$  e  $mse < 0,004$ ) e Midilli (com  $R^2 > 0,998$ ,  $MRE < 0,318\%$  e  $MSE < 0,004$ ) foram os melhores modelos que se ajustaram aos valores experimentais. Verifica-se que o modelo de Midilli, evidenciou, em geral, o melhor ajuste, descrevendo com maior precisão os dados experimentais da cinética de secagem nos três níveis de temperatura e quantidade de polpa, apresentando um maior coeficiente de determinação (0,998) e menor erro médio relativo (0,004%).

Em estudos realizados por (Silva et al., 2008) e (Severo, 2016) que trabalhando com a desidratação da polpa de tamarindo e banana pelo método de secagem em camada de espuma respectivamente, observaram que os modelos de Page, Henderson-Pabis e Midilli também representaram satisfatoriamente os dados experimentais da secagem da polpa de tamarindo e banana formulada, com os melhores ajustes revelados pelo modelo de Midilli.

### 5.3 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

Os dados de umidade de equilíbrio com a atividade de água ( $a_w$ ), determinada pelas diferentes concentrações de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), obtidos através das isotermas de adsorção nas temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C para a polpa de coco verde em sistema espumante de 20%(m/m) de polpa estão apresentados na Tabela 6, na qual cada valor de umidade de equilíbrio representa a média da triplicata realizada. Pode-se observar que com o aumento da temperatura, ocorreu a diminuição da umidade de equilíbrio em um mesmo valor de atividade de água, indicando que a polpa de coco se torna menos higroscópica nessas condições (IGLESIAS; CHIRIFE, 1995).

Verifica-se que para uma temperatura constante as umidades de equilíbrio ( $X_e$ ) elevaram com o aumento da atividade de água ( $a_w$ ). Tal comportamento é similar ao reportado por (ALEXANDRE; FIGUEIRÊDO; QUEIROZ, 2007) ao estudar a umidade de equilíbrio em pitanga em pó em função da atividade de água. Onde também se observa que, a umidade de equilíbrio diminui à medida, que a temperatura aumenta com uma atividade de água constante, indicando baixa higroscopicidade por parte do produto. Resultados semelhantes foram obtidos para a casca da banana (VÁQUIRO; VILLA-VÉLEZ; DÍAZ-MORENO; TELIS-ROMERO, 2012) e para a casca do maracujá (REGINA; DANTAS, 2006)

Tabela 6 - Umidade de equilíbrio para o sistema espumante da polpa de coco verde em função da temperatura e da atividade de água.

Temperatura °C					
30		45		60	
$a_w$	$X_e$	$a_w$	$X_e$	$a_w$	$X_e$
0,005	2,969	0,008	1,764	0,010	1,980
0,047	3,068	0,054	1,785	0,062	2,170
0,168	3,136	0,183	1,932	0,199	2,460
0,357	3,224	0,377	2,045	0,396	2,675
0,571	3,278	0,585	2,295	0,599	2,719
0,755	3,353	0,762	2,849	0,769	2,782

Fonte: Autor (2020).

#### 5.4 Modelagem matemática das isotermas

Na Tabela 7 são mostrados os valores dos parâmetros calculados para os ajustes, além do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do erro relativo médio (MSE) para as temperaturas de 30, 45 e 60°C.

Tabela 7: Parâmetros estimados para os modelos nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C.

Modelos	Parâmetros	Temperatura °C		
		30	45	60
GAB	$X_m$	3,079	2,714	2,332
	$C_g$	$4,5 \times 10^4$	$1,4 \times 10^3$	$2,3 \times 10^3$
	$K_g$	0,110	0,499	0,235
	$R^2$	0,989	0,939	0,890
	MSE	0,008	0,065	0,062
BET	$X_m$	1,294	0,973	0,905
	$C_b$	$4,9 \times 10^{13}$	$1,3 \times 10^{13}$	$4,7 \times 10^{12}$
	$R^2$	0,663	0,987	0,439
	MSE	1,393	0,697	1,027
Langmuir	$X_m$	3,226	2,631	2,226
	C	$2,0 \times 10^3$	$3,9 \times 10^2$	$2,7 \times 10^2$
	$R^2$	0,473	0,070	0,621
	MSE	0,068	0,263	0,143
Henderson	a	27,685	10,885	13,728
	b	$2,5 \times 10^{-5}$	$6,5 \times 10^{-5}$	$7,8 \times 10^{-5}$
	$R^2$	0,955	0,626	0,972
	MSE	0,072	0,185	0,035
Halsey	a	$1,6 \times 10^{12}$	78,436	$3,2 \times 10^3$
	b	24,196	56,797	8,842
	$R^2$	0,979	0,905	0,844
	MSE	0,015	0,089	0,096
IgleChi	a	3,083	1,808	2,282
	b	0,102	0,330	0,189
	$R^2$	0,663	0,987	0,439
	MSE	0,059	0,036	0,186
Caurie	a	1,153	1,854	1,468
	b	-0,201	-0,419	-0,290
	$R^2$	0,912	0,923	0,781
	MSE	0,029	0,081	0,107
Oswin	a	3,262	2,634	2,346
	b	0,019	0,084	0,062
	$R^2$	0,979	0,962	0,953
	MSE	0,013	0,061	0,046

ChungPfof.	a	3,315	2,445	2,808
	b	0,072	0,177	0,192
	$R^2$	0,900	0,468	0,955
	MSE	0,031	0,212	0,047

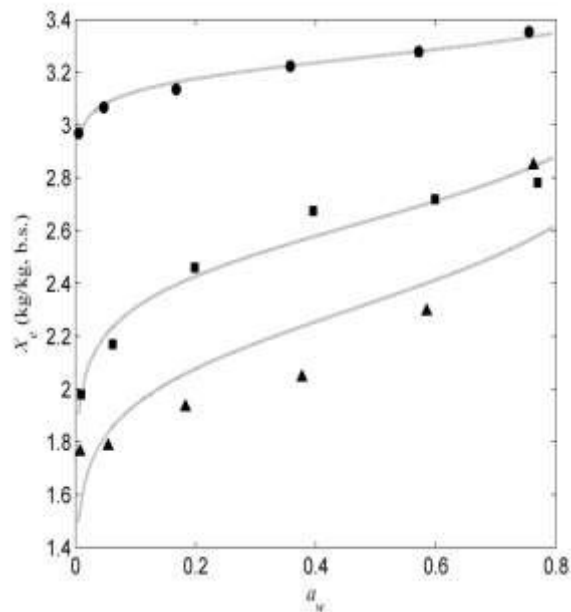
Fonte: Autor (2020).

Nota-se que para todos os modelos os valores do erro médio relativo (MSE) foram inferiores a 10%, estando de acordo com o proposto por (LEWICKI, 2009). Os modelos de Oswin e GAB apresentaram os melhores coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e também menores erros médios relativos quando comparados com os demais. No entanto, verifica-se que o modelo de Oswin, evidenciou, em geral, o melhor ajuste, descrevendo com maior precisão as isotermas de adsorção, apresentando um maior coeficiente de determinação (0,979) e menor erro percentual (0,0013%).

Pode-se ressaltar na Tabela 7 que para os modelos teóricos, os valores obtidos para umidade na monocamada ( $X_m$ ) se mostraram coerentes já que diminuíram com o aumento da temperatura. Já para os modelos empíricos essa diminuição dos valores das constantes foi observada apenas no modelo de Oswin. No qual apresentou os melhores resultados dos ajustes estatísticos. Estes valores são importantes para saber as condições estáveis de conservação do material, pois indicam a quantidade de água que está fortemente adsorvida nos sítios do mesmo.

A Figura 13 apresenta os ajustes dos resultados experimentais através do modelo de Oswin. As curvas obtidas são consideradas isotermas do tipo III típicas de alimentos ricos em componentes solúveis, tais como café, maçã, banana, abacaxi e soluções com alto teor de açúcares, de acordo com a classificação de (BRUNAUER; DEMING; DEMING; TELLER, 1940).

Figura 13 - Valores experimentais da umidade de equilíbrio do albúmen do coco verde em função da atividade de água às temperaturas de 30 °C (●), 45 (■) e 60 (▲) calculados pelo modelo de Oswin.



Fonte: Autor (2020).

Os modelos de ajuste de isoterma são necessários para determinar a umidade da monocamada ( $X_m$ ), indicando a quantidade de água que está fortemente adsorvida em locais específicos do alimento fazendo com que este esteja no seu estado mais estável. Abaixo desse valor, ocorre maior taxa de oxidação de gorduras e acima acarreta reações de Maillard bem como a estimulação das atividades enzimáticas e microbiológicas (NUNES, 2017).

### 5.5 Determinação da entalpia de sorção da água

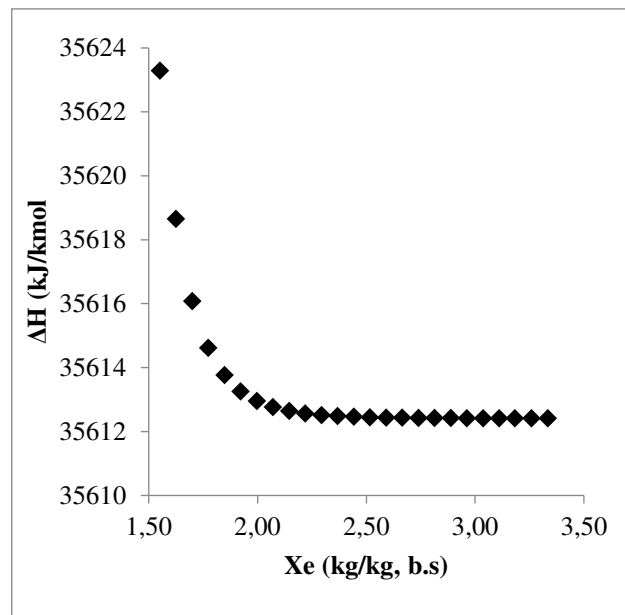
Para o cálculo do calor isostérico de sorção em função da umidade foram utilizados os dados das isoterma de adsorção da polpa de coco e utilizado o melhor modelo que se ajustou aos dados, no caso, o modelo de Oswin. Os valores da Entalpia de sorção, para a polpa na faixa de umidade de 1,550 a 3,333 (%b.s.), variaram de 35623,294 a 35612,419 kJ/mol. Resultados semelhantes foram obtidos para o polpa do coco verde de (LAVOYER; GABAS; OLIVEIRA; TELIS-ROMERO, 2013b), a polpa de Baru de (DE OLIVEIRA; RESENDE; COSTA; JÚNIOR *et al.*, 2017) e a polpa de cajá (CAVALCANTE; PLÁCIDO; DE OLIVEIRA; DE FREITAS *et al.*, 2018).

O valor do calor de dessorção, ou seja, da energia necessária para remover água do produto, diminuiu com o aumento do conteúdo de umidade, como já esperado para produtos agrícolas. Esse comportamento indica a presença de fortes interações entre a água e os

compostos da polpa, uma vez que o calor isostérico representa a energia necessária para retirar a água dos alimentos (LAVOYER; GABAS; OLIVEIRA; TELIS-ROMERO, 2013b).

A relação entre o calor isostérico e o teor de umidade do sistema espumante pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 - Entalpia de sorção do albúmen em função da umidade de equilíbrio.



Fonte: Autor (2020).

O comportamento da curva está compatível com o esperado: quanto maior o teor de umidade das amostras, menores serão os valores de calor isostérico de sorção. Esse comportamento é explicado por (SHIVHARE; ARORA; AHMED; RAGHAVAN, 2004), visto que em baixos teores de umidade ocorre uma forte interação entre o produto e a água presente nele, sendo necessário elevado valor de energia para retirar a água contida na amostra. Esta propriedade pode ser utilizada para estimar o requerimento de energia do processo de desidratação do alimento até seu valor de umidade da monocamada ou para obtenção de uma determinada umidade final desejada (AMBROS, 2013).



## 6 CONCLUSÕES

A cinética de secagem pelo método em camada de espuma apresentou resultados coerentes com o esperado para a metodologia, bem como, quanto aos três estágios de secagem em três etapas básicas: período de indução/estabilização, período de taxa constante e período de taxa decrescente. Além disso, o processo foi influenciado pela temperatura, ocorrendo à secagem em menor tempo na temperatura mais elevada e com maior concentração de polpa.

Para a concentração de 10%, os modelos de Midilli e Logaritmico representaram, satisfatoriamente, os dados experimentais da secagem da polpa de coco verde em sistema espumante. Por outro lado, os modelos de WangSing, Logaritmico, Peleg, Midilli, Dois termos e Aproximação por difusão mostraram os melhores resultados de ajuste para a concentração de 20%, sendo o modelo de Midilli o que teve melhor precisão estatística. Já para a concentração de 30%, os modelos de e Midilli foram os melhores modelos que se ajustaram.

Constata-se que a proporção de 20% (m/m) apresentou melhores resultados de retirada de água livre do material e o modelo de Midilli, evidenciou, em geral, o melhor ajuste, descrevendo com maior precisão os dados experimentais da cinética de secagem nos três níveis de temperatura e quantidade de polpa, apresentando um maior coeficiente de determinação (0,998) e menor erro médio relativo (0,004%).

As isotermas de dessorção de coco verde *in natura* em sistema espumante obtidas pelo método gravimétrico estático apresentaram comportamento característico das isotermas obtidas para produtos alimentícios. Observou-se que o aumento da temperatura influencia na redução da umidade de equilíbrio. O modelo de Oswin foi o que melhor se ajustou para todas as temperaturas estudadas, com elevado valor para  $R^2$  ( $>0,96$ ) e baixo valor de MSE ( $<10\%$ ). As curvas das isotermas de adsorção para o sistema espumante foram do tipo III, típicas de alimentos ricos em componentes solúveis, e os valores de umidade de equilíbrio diminuíram com o aumento da temperatura em um mesmo valor de atividade de água, indicando que a polpa de coco vai se tornando menos higroscópica.

A equação de *Clausius-Clapeyron* se mostrou adequada para previsão do calor de dessorção, pois verificou-se que quando há menor quantidade de água no material mais calor é necessário para remover esta água, como já esperado. Todas as análises em conjunto facilitam futuros trabalhos com a polpa de coco verde e dão um ponto de partida para o entendimento do comportamento desta matéria-prima tão pouco estudada em processos de secagem.

## REFERÊNCIAS

- ABALONE, R.; GASTÓN, A.; CASSINERA, A.; LARA, M. Thin layer drying of amaranth seeds. **Biosystems Engineering**, 93, n. 2, p. 179-188, 2006.
- ALEXANDRE, H. V.; FIGUEIRÊDO, R. d.; QUEIROZ, A. d. M. Isotermas de adsorção de umidade da pitanga em pó. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, 7, n. 1, p. 11-20, 2007.
- ALEXANDRE, H. V.; FIGUEIRÊDO, R. d.; QUEIROZ, A. d. M. Cinética de secagem da polpa de pitanga formulada. In: **congresso brasileiro de engenharia agrícola**. 2006.
- ALPIZAR-REYES, E.; CARRILLO-NAVAS, H.; ROMERO-ROMERO, R.; VARELA-GUERRERO, V. *et al.* Thermodynamic sorption properties and glass transition temperature of tamarind seed mucilage (*Tamarindus indica* L.). **Food and Bioproducts Processing**, 101, p. 166-176, 2017.
- AMBROS, L. F. Isotermas de sorção de farinha de jabuticaba: determinação experimental e avaliação de modelos matemáticos. 2013.
- ANDRADE, R. D.; LEMUS, R.; PEREZ, C. E. Models of sorption isotherms for food: uses and limitations. **Vitae**, 18, n. 3, p. 325-334, 2011.
- ARAGÃO, W.; RIBEIRO, F.; MELO, M. d. V. Cultivares de coqueiro para a produção de coco seco: coqueiro Gigante vs híbridos. **Fundamentos tecnológicos para a revitalização das áreas cultivadas com coqueiro gigante no nordeste do Brasil**. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, p. 37-60, 2009.
- ARAÚJO, C. d. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; SARAIVA, S. H. *et al.* Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos. **Brazilian Journal of Food Technology**, 20, 2017.
- ARAUJO, L. B. **Secagem de polpa de goiaba pelo método de camada de espuma**. 2019. -, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- ARAÚJO NETO, J. C. d.; FERNANDES, F. Y. B.; PIMENTEL, J. C. M.; VASCONCELOS, V. R. *et al.* Nutritional value of whole coconut, coconut powder, and coconut fiber treated with sodium hydroxide for sheep. **Ciência e Agrotecnologia**, 40, n. 4, p. 475-483, 2016.
- AVHAD, M.; MARCHETTI, J. Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. **Industrial Crops and Products**, 91, p. 76-87, 2016.
- BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; JUNQUEIRA, M. S.; RAMOS, A. M. *et al.* Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 19, n. 12, p. 1203-1208, 2015.
- BELL, L. N.; LABUZA, T. P. **Moisture sorption: practical aspects of isotherm measurement and use**. 2000. 1891127187.

BOERI, C. N.; DA SILVA, F. J. N.; FERREIRA, J. A. Otimização dos parâmetros de secagem para minimização do custo energético num secador convectivo de alimentos. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, 1, n. 1, 2013.

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

CANO-HIGUITA, D. M.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; TELIS-ROMERO, J.; VÁQUIRO, H. A. *et al.* Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: A thermodynamic approach. **Food and Bioproducts Processing**, 93, p. 19-28, 2015.

CARVALHO, M. S. **Cinética de secagem, conservação e propriedades físico-químicas de amêndoas de macaúba**. 2018. 74 f. - Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa.

CASSINI, A. S.; MARCZAK, L. D. F.; NOREÑA, C. P. Z. Determinação das isotermas de adsorção da proteína texturizada vegetal. **Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering -- ABCM**, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 29 - Dec. 03, 2004

CASTILLO, M.; MARTÍNEZ, E.; GONZÁLEZ, H.; PACIN, A. *et al.* Study of mathematical models applied to sorption isotherms of Argentinean black bean varieties. **Journal of Food Engineering**, 60, n. 4, p. 343-348, 2003.

CAVALCANTE, M. D.; PLÁCIDO, G. R.; DE OLIVEIRA, D. E.; DE FREITAS, B. S. *et al.* Isotherms and isostatic heat of foam-mat dried yellow mombin pulp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 22, n. 6, p. 436-441, 2018.

CHAN, E.; ELEVITCH, C. R. Cocos nucifera (coconut). **Species profiles for Pacific Island agroforestry**, 2, p. 1-27, 2006.

CHAVES, T. H.; RESENDE, O.; DE OLIVEIRA, D. E. C.; DE SOUZA SMANIOTTO, T. A. *et al.* Isothermas e calor isostérico das sementes de pinhão-mansô. **Revista engenharia na agricultura-reveng**, 23, n. 1, p. 9-18, 2015.

CORRÊA, I. C. M. **Propriedades termodinâmicas de dessorção de água de farelo de soja**. 2011. 52 f. -, Monografia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CUENCA, M. A. G. Importância econômica do coqueiro. **A cultura do coqueiro no Brasil**, v. 2, p. 17-56, 1998.

CUENCA, M.A.G. Importância econômica da cocoicultura no Brasil. 2016. Disponível em: [https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemasdeproducao6\\_1ga1ceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-2&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaoId=7703&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicoId=7829](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=7703&p_r_p_-996514994_topicoId=7829). Acesso em: 16 dezembro. 2020.

DAMODARAN, P. KL; FENNEMA, OR **Química de Alimentos de Fennema**, 4ª Edição. Editora, Artmed SA, 2010.

DANTAS, S. C. d. M. **Desidratação de polpas de frutas pelo método foam-mat**. 2010. -, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

DE BRUIJN, J.; RIVAS, F.; RODRIGUEZ, Y.; LOYOLA, C. *et al.* Effect of vacuum microwave drying on the quality and storage stability of strawberries. **Journal of Food Processing and Preservation**, 40, n. 5, p. 1104-1115, 2016.

DE OLIVEIRA, D. E.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; JÚNIOR, F. *et al.* Hygroscopicity of baru (*Dipteryx alata* Vogel) fruit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 21, n. 4, p. 279-284, 2017.

DIAS, N. B.; SCHNEIDER, P. Z.; CHAVES, G. d. L. D.; CELESTE, W. C. Aproveitamento da casca de coco verde para uso energético. **Brazilian Journal of Production Engineering-BJPE**, p. 179-195, 2019.

DIONELLO, R. G.; BERBERT, P. A.; MOLINA, M. A. B. d.; PEREIRA, R. d. C. *et al.* Secagem de fatias de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação: cinética e avaliação de modelos. **Food Science and Technology**, 29, n. 1, p. 232-240, 2009.

FELLOWS, P. *Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática*. 2a edição, Artmed. **Porto Alegre**, p. 602, 2006.

FIGUEIRA, C. d. N. T. Avaliação da atividade antimicrobiana, citotóxica e capacidade sequestradora de radicais livres de extratos brutos do *Cocos nucifera* Linn. 2012.

FONTENELE, R. E. S.; AGROINDUSTRIAIS, C., 2005, **Cultura do coco no Brasil: caracterização do mercado atual e perspectivas futuras**. 20-23.

FOOD INGREDIENTS BRASIL. A desidratação na conservação dos alimentos. n. 38 – 2016. Disponível em: <[https://revistafi.com.br/upload\\_arquivos/201607/2016070041261001469734800.pdf](https://revistafi.com.br/upload_arquivos/201607/2016070041261001469734800.pdf)> Acesso em: 11 nov, 2020.

FRANCO, T. S. Desidratação de suco de yacon pelo método de camada de espuma. 2015.

GUIMARÃES, M. K. A.; DE FIGUEIRÊDO, R. M. F.; DE MELO QUEIROZ, A. J. Cinética de secagem em camada de espuma da polpa de manga cv. Keitt. **Revista Caatinga**, 30, n. 1, p. 172-180, 2017.

GURGEL, C. E. M. R. **Secagem da polpa de graviola (*Annona muricata* L.) em camada de espuma-desempenho do processo e características do produto**. 2014. -, Brasil.

IGLESIAS, H.; CHIRIFE, J. An alternative to the Guggenheim, Anderson and De Boer model for the mathematical description of moisture sorption isotherms of foods. **Food Research International**, 28, n. 3, p. 317-321, 1995.

INT, A. *Official methods of analysis of AOAC International*. : AOAC international Gaithersburg, MD 2007.

JODRAL, M.; GALLARDO, M.; SERRANO, S. El coco y sus aplicaciones. **Alimentaria: Revista de tecnología e higiene de los alimentos**, n. 313, p. 45-50, 2000.

KEEY, R. *Drying; Principles and Practice*. : Pergamon Press, Oxford 1972.

LAVOYER, F. C. G.; GABAS, A. L.; OLIVEIRA, W. P.; TELIS-ROMERO, J. Estudo das isotermas de adsorção da polpa de coco verde. **Food Science and Technology**, 33, n. 1, p. 68-74, 2013a.

LAVOYER, F. C. G.; GABAS, A. L.; OLIVEIRA, W. P.; TELIS-ROMERO, J. Study of adsorption isotherms of green coconut pulp. **Food Science and Technology**, 33, p. 68-74, 2013b.

LEDO, A. d. S.; CUNHA, A.; ARAGÃO, W.; TUPINAMBÁ, E. Efeito da sacarose e do manitol na conservação in vitro por crescimento lento de coqueiro anão. **Embrapa Tabuleiros Costeiros-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2007.

LEMUS, R. A.; PÉREZ, M.; ANDRÉS, A.; ROCO, T. *et al.* Kinetic study of dehydration and desorption isotherms of red alga Gracilaria. **LWT-Food Science and Technology**, 41, n. 9, p. 1592-1599, 2008.

LEWICKI, P. P. Data and models of water activity. II: Solid foods. **Food properties handbook**, 2, 2009.

LUIZ, M. R. Estudo teórico e experimental de secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum*). 2012.

MACHADO, A. K. T. **Secagem de caju (*Anacardium occidentale*) pelo método foam-mat com otimização prévia da espuma**. 2019. -, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MARTINS, C. R.; JESUS JR, L. Produção e comercialização de coco no Brasil frente ao comércio internacional: Panorama 2014. **Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, 53p**, 2014.

MATTOS, A. L. A.; ROSA, M.; CRISÓSTOMO, L. A.; BEZERRA, F. C. *et al.* Beneficiamento da casca de coco verde. **Embrapa Agroindústria Tropical**. Disponível em: <[http://www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo\\_3830.pdf](http://www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo_3830.pdf)>. Acesso em, 25, 2020.

MELONI, P. L. S. Desidratação de frutas e hortaliças. **Fortaleza: Instituto Frutal**, p. 87, 2003.

NUNES, M. A. Avaliação da estabilidade do pó de ovo de codorna liofilizado. 2017.

OCHOA-VELASCO, C. E.; CRUZ-GONZÁLEZ, M.; GUERRERO-BELTRÁN, J. Á. Ultraviolet-C light inactivation of *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium* in coconut (*Cocos nucifera* L.) milk. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 26, p. 199-204, 2014.

OLIVEIRA, A. G. P. d. **Secagem da polpa de coco verde pelo método de camada de espuma**. 2019. -, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C. Análises de materiais biológicos. **Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola**, 2006.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. d.; PARK, K. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. **Campinas: Unicamp**, 2007.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra bartlett (*Pyrus sp.*) com e sem desidratação osmótica. **Food Science and Technology**, 21, n. 1, p. 73-77, 2001.

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

PARRY, J. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 32, n. 1, p. 1-29, 1985.

REGINA, M. M. d. O. A.; DANTAS, N. C. J. P. Isotermas de dessorção da casca do maracujá (*Passiflora edulis Sims*): determinação experimental e avaliação de modelos matemáticos. **Ciência Rural**, 36, n. 5, 2006.

REINATO, C. H.; BORÉM, F. M.; VILELA, E. R.; CARVALHO, F. M. *et al.* Consumo de energia e custo de secagem de café cereja em propriedades agrícolas do sul de Minas Gerais. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, 6, n. 1, p. 112-116, 2002.

RIZVI, S. S. Thermodynamic properties of foods in dehydration. *In: Engineering properties of foods*: CRC Press, 2014. p. 261-348.

RONCHETI, E. **Estudo do processo de secagem em leite de espuma de cenoura, tomate, beterraba e morango**. 2014. -, Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre.

ROSA, M. d. F.; DE ABREU, F. Água-de-coco: métodos de conservação. **Embrapa Agroindústria Tropical-Documentos (INFOTECA-E)**, 2000.

SANGAMITHRA, A.; VENKATACHALAM, S.; JOHN, S. G.; KUPPUSWAMY, K. Foam mat drying of food materials: A review. **Journal of Food Processing and Preservation**, 39, n. 6, p. 3165-3174, 2015.

SANTOS TDCP. Estudo da Cinética de Secagem das Fibras do Coco Verde (*Cocos nucifera* (L.)). (Engineer). Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

SENHORAS, E. M. Oportunidades da cadeia agroindustrial do coco verde: do coco verde nada se perde, tudo se desfruta. **Revista Urutágua, Maringá**, n. 5, p. 08-11, 2004.

SEBRAE. Agronegócio: fruticultura. Boletim de inteligência. 2015. Disponível em: <<http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/bis/conteudoPublicacao.zhtml?id=5791>>. Acesso em: 26 agosto. 2020.

SHIVHARE, U.; ARORA, S.; AHMED, J.; RAGHAVAN, G. Moisture adsorption isotherms for mushroom. **LWT-Food Science and Technology**, 37, n. 1, p. 133-137, 2004.

SILVA, A. E. d.; SILVA, L. H. M. d.; PENA, R. d. S. Comportamento higroscópico do açaí e cupuaçu em pó. **Food Science and Technology**, 28, n. 4, p. 895-901, 2008.

SILVA, A. S.; GURJÃO, K. C. O.; ALMEIDA, F. A. C.; BRUNO, R. L. A.; PEREIRA, W. E. Desidratação da polpa de tamarindo pelo método de camada de espuma. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1899- 1905, 2008.

SILVA, M. M. d.; GOUVEIA, J. P. G. d.; ALMEIDA, F. d. A. C. Dessorção e calor isostérico em polpa de manga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 6, p. 123-127, 2002.

SINGH, R.; HELDMAN, D. Chapter 12-Dehydration Introduction to Food Engineering (pp. 675-710). : San Diego: Academic Press 2014.

SOARES, G. L. Aproveitamento da polpa de coco verde submetida ao congelamento rápido e lento. 2014.

SOARES, G. L.; DAIUTO, É. R.; DE MENDONÇA, V. Z.; VIETES, R. L. Caracterização físico-química de polpa de coco verde submetida ao congelamento lento e rápido. **Nativa**, 3, n. 3, p. 185-190, 2015.

SOARES, J.; DEMEKE, M. M.; VAN DE VELDE, M.; FOULQUIÉ-MORENO, M. R. *et al.* Fed-batch production of green coconut hydrolysates for high-gravity second-generation bioethanol fermentation with cellulosic yeast. **Bioresource technology**, 244, p. 234-242, 2017.

SOUZA, V. Efeito da liofilização e desidratação em leite de espuma sobre a qualidade do pó de polpa de cupuaçu (*theobroma grandiflorum*). **Itapetinga: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia**, 2011.

SPIESS, W.; WOLF, W. Results of the COST 90 project on water activity. **Physical properties of foods/edited by R. Jowitt... et al**, 1983.

TEIXEIRA, N. S.; TORREZAN, R.; FREITAS-SÁ, D. D. G. C.; PONTES, S. M. *et al.* Development of a fruit smoothie with solid albumen of green coconut. **Ciência Rural**, 49, n. 1, 2019.

TIMMERMANN, E. O.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? **Journal of food engineering**, 48, n. 1, p. 19-31, 2001.

VÁQUIRO, H. A.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; DÍAZ-MORENO, C.; TELIS-ROMERO, J. Isotermas de sorción y calor isostérico de sorción de raquis de banana. 2012.

VASCONCELOS, M. A. d. S.; MELO, F. A. B. d. Conservação de alimentos. 2016.

VILLA-VÉLEZ, H. A.; VÁQUIRO, H. A.; BON, J.; TELIS-ROMERO, J. Modelling thermodynamic properties of banana waste by analytical derivation of desorption isotherms. **International Journal of Food Engineering**, 2012.

WAUGHON, T.; PENA, R. d. S. Modelagem da secagem em camada delgada da fibra residual do abacaxi. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, 26, n. 2, p. 297-306, 2008.