

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

Coordenação de Engenharia Química/CCET

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC



TALITA DE CASSIA PIMENTEL SANTOS

**ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DAS FIBRAS DO
COCO VERDE (*Cocus nucifera* (L.))**

São Luís

2018

TALITA DE CASSIA PIMENTEL SANTOS

**ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DAS FIBRAS DO
COCO VERDE (*Cocus nucifera (L.)*)**

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 de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Harvey Alexander Villa Vélez

São Luís

2018

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

Santos, Talita de Cassia Pimentel.

ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DAS FIBRAS DO COCO VERDE
Cocus nucifera L / Talita de Cassia Pimentel Santos. -
2018.

49 p.

Orientador(a): Harvey Alexander Villa Vélez.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química,
Universidade Federal do Maranhão, SÃO LUIS, 2018.

1. Camada fina. 2. Cinética de secagem. 3. Fibras de
coco verde. 4. Modelagem matemática. 5. Simulação. I.
Villa Vélez, Harvey Alexander. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

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

Prof. Dr. ROMILDO MARTINS SAMPAIO
COEQ/CCET/UFMA

Prof. PAULO HENRIQUE DA SILVA LEITE COELHO
COEQ/CCET/UFMA

10 de Julho de 2018

Dedico este trabalho ao meu pai Antônio Luís e minha mãe Ana Lourdes que sempre ensinaram-me sobre a importância da educação e apoiaram-me no decorrer da graduação.

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui registrado, minha total gratidão a todos envolvidos, direta ou indiretamente, no comprimento de mais uma etapa de minha vida. Primeiramente agradeço à Deus, pois estou certa de que sem ele nada disso seria possível, pelas oportunidades concedidas, pelos momentos bons e ruins vivenciados e pelas vitórias alcançadas no decorrer da caminhada, situações que moldaram-me e tornaram-me o ser humano que hoje sou.

Agradeço também à Universidade Federal do Maranhão (UFMA), instituição que abriu as portas e muito me ensinou, por meio de seus integrantes. Pois além de conhecimentos teóricos, aprendi a importância de ser a minha melhor versão, tanto como profissional quanto como pessoa.

Agradeço aos meus pais Ana Lourdes e Antônio Luis, aos meus irmãos Taiza Santos, Amália Maria, Igor Carvalho e Saulo Felipe por todo suporte e amor dado, por acreditarem em meus sonhos e lutarem comigo para que estes se tornassem realidade. Verdadeiramente tenho a convicção de que sem vocês nada do que estou vivenciando seria possível. Sou extremamente grata e orgulhosa da família da qual faço parte e amo todos vocês.

Sou grata também aos meus professores, pelos ensinamentos compartilhados e por ajudarem-me como profissional. Em especial agradeço aos professores Harvey Villa-Velez e a Audirene Amorim que me orientaram enquanto discente, tornando-se dois grandes amigos. Obrigada por me aceitarem enquanto aluna de iniciação, abrindo as portas do laboratório de pesquisa, por me ouvirem sempre que necessário e me auxiliar sempre que possível, agradeço de todo o meu coração por tudo, os levarei para vida como referência de pessoas e profissionais. Deixo registrado aqui a grande estima e afeto que tenho por vocês e mais uma vez meu muito obrigada.

Agradeço também aos meus parceiros de laboratório Miqueias Adebai, Everton Holanda e Nilton Mafra que estiveram comigo durante a realização dos experimentos.

Aos meus amigos de curso Nariete Jadna, Valkerline Pires, Renata Avelar, Larissa Machado e Estefânia Barros com quem compartilhei momentos felizes e outros nem tanto e que sempre estiveram ao meu lado, ajudando-me como puderam a enfrentar os desafios da graduação. Meu muito obrigado, saibam que vocês são presente mais maravilhoso que a UFMA me deu. Amo muito vocês.

Agradeço ainda os meus amigos William Kleber, Kátia Mamos, Viviane Azevedo, Gecinda Dias e Nilson que sempre torceram por mim, vibraram com as minhas vitórias e

apoiaram-me nas derrotas. Agradeço pelos incentivos, orações, carinho, cuidado, amor e força que deram-me. É uma grande honra tê-los em minha vida e poder compartilha-la com vocês.

Sou grata a todos e muito mais a Deus, por ter colocado em meu caminho pessoas nas quais posso chamar de amigos, algo raro nos dias de hoje. A todos meu muito obrigado e desejo de estar sempre ao lado de vocês.

"Não te mandei eu? Sê forte e corajoso; não temas, nem te espantes, porque o SENHOR, teu Deus, é contigo por onde quer que andares."

Josué 1:9.

SANTOS, TALITA DE CASSIA PIMENTEL. **Estudo da Cinética de Secagem das Fibras do Coco Verde (*Cocos nucifera* (L.))**. 2018. 49 pág. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

RESUMO

O *Cocos nucifera* L., coco, coco-da-bahia ou coco-da-praia, como é popularmente conhecido, é o fruto do coqueiro, árvore perene de origem asiática cultivada em 90 países para produção de óleo e outros subprodutos. No Brasil esse mercado apresenta uma peculiaridade; consumo do fruto para o aproveitamento da água. Com isso surge um grande problema, uma vez que as cascas, principal resíduo gerado, são um material de difícil decomposição que não apresenta valor comercial e correspondem cerca de 80 a 85 % do fruto. A inexistência de tecnologias para o aproveitamento desse material, já que o elevado teor de umidade inviabiliza a aplicação das técnicas já conhecidas para o tratamento do resíduo de coco seco, agrava essa situação, principalmente no meio urbano onde o descarte é feito em aterros sanitários. Assim, o presente trabalho teve como objetivo o estudo da secagem das fibras do coco verde em três temperaturas de 30, 45 e 60 °C. Para isto, fibras de coco foram cortadas e posicionadas em bandejas onde foram desidratadas ao longo do tempo usando um secador convectivo com temperatura e umidade relativa controlada. Realizou-se o estudo matemático com a aplicação dos modelos em camada fina de Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Lewis, Page, Aproximação por Difusão, Midilli, Logarítmico, Wang and Sing e Dois Termos. Os modelos foram ajustados pelo software MATLAB R2013a. A análise estatística comprovou que os modelos de Midilli e Page foram os que apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais, com o erro médio relativo (*MRE*) abaixo de 9 % e coeficiente de correlação quadrático ajustado (R^2_{adj}) próximo de 1. Com respeito ao tempo de secagem e percentual de evaporado, o ensaio realizado na temperatura de 60 °C mostrou-se mais eficiente. Observou-se ainda o aumento dos coeficientes difusivos com a temperatura e uma energia de ativação de magnitude 65,17 kJ/mol para o sistema.

Palavras-chave: *Fibras de coco verde, Cinética de secagem, Modelagem matemática, Camada fina, Simulação.*

SANTOS, TALITA DE CASSIA PIMENTEL. **Study of the Kinetics of the Drying of the Green Coconut Fibers (*Cocos Nucifera* (L.))**. 2018. 49 p. Completion Of The Chemical Engineering Course At The Center Of Exact Sciences And Technology Of The Federal University Of Maranhão, São Luís, 2018.

ABSTRACT

Cocos nucifera L., coconut, coconut palm or coconut-baia is a perennial plant with origin from Asian and cultivated in 90 countries for oil production and other by-products. In Brazil, this market has a peculiarity; their consumption is only for water. This presents a great problem, since the husks, the main residue generated, are a difficult material to decomposition that does not present a commercial value and correspond from 80 to 85% of the fruit. The lack of technologies for the using of this material, since the high moisture content precludes the application of known techniques to treatment of the dry coconut waste, aggravate this situation, especially in the urban environment where the disposal is made in landfills. Thus, the present work aims to study the drying of green coconut fibers at three temperatures 30, 45 and 60 °C. For this, the samples were dried using a convective dryer with temperature and relative humidity controlled. The mathematical modelling was carried out using the thin-layer models of Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Lewis, Page, Diffusion Approximation, Midilli, Logarithmic, Wang and Sing and Two Terms. The models were adjusted by the MATLAB software R2013a. The statistical analysis shows the Midilli and Page models as the best fitting results of the experimental data, with the relative mean error (*MRE*) below 9% and adjusted quadratic correlation coefficient (R^2_{adj}) close to 1. With respect to the drying time and water evaporated, the test performed at the temperature of 60 °C proven to be more efficient. It was also observed the increase of the diffusion coefficients with temperature and an activation energy of magnitude 65.17 kJ/mol for the system.

Key words: *Green coconut fibers, Dry kinetics, Mathematical modeling, Thin layer, Simulatio*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva genérica de secagem em condições constantes.....	24
Figura 2 - (A) desidratador de alimentos; (B) Termo-higrômetro; (C) Balança analítica.....	28
Figura 3- Amostras acomodadas em bandeja central do equipamento.....	29
Figura 4- Curva das taxas de secagem em função da umidade do material para a temperatura de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C.....	34
Figura 5- Modelagem das curva de secagem para o modelo de Midilli (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.....	38
Figura 6- Modelagem das curva de secagem para o modelo de Page (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.....	38
Figura 7- Ajuste linear do inverso da temperatura em função do logaritmo natural de D_{ef}	39
Figura 8- Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Weibull (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.....	46
Figura 9- Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Peleg (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.....	46
Figura 10- Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Henderson-Pabis (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.....	47
Figura 11- Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Lewis (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.....	47
Figura 12- Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Aproximação por difusão (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.....	48

- Figura 13- Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Logarítmico (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais..... 48
- Figura 14- Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Wang and Sing (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais..... 49
- Figura 15- Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Dois Termos (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais..... 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Dados de conteúdo de umidade das fibras de coco verde.....	32
Tabela 2 -	Condições iniciais obtidas nos experimentos de secagem.....	32
Tabela 3 -	Valores de umidade X (kg/kg, b.s.) e desvio padrão (Sd) obtidos com dados experimentais para os ensaios realizados nas temperaturas de 30, 45 e 60°C.....	33
Tabela 4 -	Quantidade de água perdida durante a secagem nas temperaturas de 30, 45 e 60°C.....	34
Tabela 5 -	Parâmetros estimados dos modelos de camada fina empregados nas temperaturas de 30, 45 e 60°C.....	36
Tabela 6 -	Avaliação estatística dos modelos de camada fina empregados nas temperaturas de 30, 45 e 60°C.....	37
Tabela 7 -	Coefficientes de difusão (D) e determinação (R^2) para a secagem realizada nas temperaturas de 30, 45 e 60°C.....	39

LISTA DE SÍMBOLOS

dX/dt	Taxa de secagem ($\text{kg kg}^{-1}\text{h}^{-1}$).
h	Coefficiente de transferência de massa ($\text{W (m}^2\text{)}^{-1}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).
T_{amb}	Temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$).
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido.
A	Área da superfície exposta (m^2).
λ	Calor de vaporização (J mol^{-1}).
W	Conteúdo de umidade adimensional.
X	Conteúdo de umidade no tempo t (kg/kg , b.s).
X_0	Umidade inicial (kg/kg , b.s).
X_{eq}	Umidade de equilíbrio (kg/kg , b.s).
W_{bu}	Percentual de umidade em base úmida.
$m_{úmida}$	Massa úmida.
m_{seca}	Massa após a secagem.
X_{ss}	Quantidade de sólidos secos.
$M_{amostra}$	Massa inicial da amostra.
$\%X_{evaporado}$	Percentual de líquido evaporado
k	Constante de velocidade de secagem (s^{-1}), para os modelos de Weibull, Lewis e Page.
k_1	Constante de velocidade de secagem (s^{-1}), para os modelos Peleg, Henderson-Pabis, Aproximação por difusão, Midilli, Logarítmico, Wang and Sing e Dois Termos.
k_2	Constante de velocidade de secagem (s^{-1}), para os modelos Peleg, Henderson-Pabis, Aproximação por difusão, Midilli, Logarítmico, Wang and Sing e Dois Termos.
k_3	Constante de velocidade de secagem (s^{-1}), para os modelos de Aproximação por difusão, Midilli, Logarítmico e Dois Termos.
k_4	Constante de velocidade de secagem (s^{-1}) do modelo Dois termos.
N	Constante do modelo de Page.
D_{ef}	Coefficiente de difusão efetivo ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).
D_0	Fator pré exponencial ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).
E_A	Energia de ativação para difusão (J mol^{-1}),

T	Temperatura (K).
R	Constante dos gases ideais ($\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$).
X^*	Conteúdo de umidade teóricos (kg/kg, b.s.).
R^2	Coefficiente de correlação quadrático.
b	Número de parâmetros nos modelos.
n	Número de pontos experimentais usados na análise de regressão.

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO	III
DEDICATÓRIA	IV
AGRADECIMENTOS	V
EPÍGRAFE	VII
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
SUMÁRIO	XV
1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo geral	19
2.1 Objetivos específicos	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Resíduos da indústria de água de coco	21
3.1.1 BENEFICIAMENTOS DO COCO VERDE	21
3.2 Secagem de alimentos	22
3.2.1 CINÉTICA DE SECAGEM	23
3.3 Modelagem matemática da cinética de secagem	25
3.3.1 PERÍODO A TAXA CONSTANTE	25
3.3.2 PERÍODO A TAXA DECRESCENTE	25
3.3.3 MODELOS MATEMÁTICOS	26
4 MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 Matéria prima	28
4.2 Experimentos de secagem	28
4.3 Determinação da umidade da amostra.....	29
4.4. Modelagem matemática.....	30
4.5 Determinação do coeficiente de difusão efetivo e da energia de ativação	31
4.6 Análise estatística	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 Secagem das fibra de coco verde.....	32
5.2 Ajuste dos dados de secagem das fibras de coco verde aos modelos matemáticos.....	35

6 CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS.....	41
APÊNDICE A – AJUSTES DAS CURVAS DE SECAGEM AOS MODELOS	46
CINÉTICOS DE CAMADA FINA.....	46

1 INTRODUÇÃO

O *Cocos nucifera L.* ou coco, como é popularmente conhecido, é o fruto do coqueiro, planta de clima tropical da família Palmae e de origem asiática com grande utilização no Brasil devido à variedade de produtos e subprodutos que podem ser obtidos. Ele é constituído por um epicarpo ou exocarpo, parte externa, seguido de um mesocarpo, região fibrosa, endocarpo, região rígida, copra, polpa, embrião e água de coco. Os três últimos constituem cerca de 20% a 15% do fruto e apresentam valor comercial, sendo a polpa utilizada principalmente para extração de óleo, produção do leite e do coco ralado e a água para consumo *in natura* (SEBRAE, 2018)

O consumo do fruto imaturo para o aproveitamento da água é uma peculiaridade da indústria brasileira, que segundo Carrijo, Liz e Makishima (2002) corresponde a 1,4% do mercado de refrigerantes. Por esta razão, o resíduo do processamento - a casca - tornou-se um problema ambiental deste setor, por ser um material de difícil decomposição, apresentar alta umidade (cerca de 85%) e fibra com características que impossibilitam as aplicações usualmente empregadas para as cascas do coco seco, as quais são utilizadas no beneficiamento de fibras para substrato agrícola, combustível para caldeiras, manufatura de cordoalha, tapetes, estofamentos e capachos (CEMPRE, 1998; ROSA et al, 2001).

Um destino alternativo para esses resíduos devido a facilidade de produção, baixo custo e alta produtividade, é a obtenção de substratos agrícolas para produção de mudas ou em cultivos sem o uso de solo, visto que as fibras provenientes das cascas do coco verde são praticamente inertes e altamente porosas (CARRIJO; LIZ; MAKISHIMA, 2002). Outras alternativas que têm se mostrado viáveis são a confecção de fibras aplicadas como matéria prima de outros produtos, utilização da casca como cobertura morta para proteção do solo, produção de briquetes aplicado como fonte energética e produção de adsorvente aplicados na bioremediação do solo e biosorção de metais pesados (MATTOS et al, 2018).

O processamento da casca do coco verde é feito por meio de uma série de operações dentre as quais destaca-se a secagem, que segundo Singh et al. (2006) e Castell-Palou et al. (2011) é o método mais antigo empregado na conservação de alimentos com o objetivo de diminuir o teor de umidade e conseqüentemente a atividade de água ocasionando a estabilização biológica. Quando empregada como etapa intermediária, atua como facilitador das posteriores.

Compreender o processo de secagem é de suma importância não só para assegurar a qualidade do produto como também para determinar a quantidade de energia necessária para evaporar a água do produto. Os estudos experimentais atrelados à modelagem matemática são

ferramentas fundamentais, já que trazem uma visão matemática e física para a compreensão do complexo processo de secagem que envolve as trocas simultâneas de calor e massa entre o material e o ar (BARATI, 2011). Assim muitos estudos foram desenvolvidos no decorrer dos anos com o objetivo de compreender os diferentes aspectos do processo e com isso diversos modelos propostos para descrever a secagem de alimentos e resíduos orgânicos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é estudar as cinéticas secagem das fibras do coco verde.

2.1 Objetivos específicos

- Determinar as cinéticas de secagem para as temperaturas de 30, 45 e 60 °C.
- Modelar as cinéticas de secagem através do ajuste aos modelos de camada fina.
- Determinar o coeficiente difusivo no processo de secagem das fibras de coco verde.
- Calcular a energia de ativação para difusão na secagem das fibras de coco verde.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Coco (*Cocos nucifera L.*), Coco-da-baía ou Coco-da-praia como é conhecido é o fruto de uma planta perene de origem asiática e clima tropical cultivada em cerca de 90 países. O coqueiro foi introduzido no Brasil por volta de 1553 pelos portugueses, sendo inicialmente cultivado no litoral da Bahia e posteriormente espalhando-se pelo litoral nordestino (FERRAZ et al., 2009; SEBRAE, 2018).

Com a adaptação desta planta da família Arecaceae (Palmae) ao solo arenoso do litoral brasileiro, surgiu uma diversificada cadeia produtiva no país, sendo as variedades do tipo gigante (*Typica Nar.*) e anão (*Nana Griff*) de maior relevância (SIQUEIRA; ARAGÃO; TUPINAMBÁ, 2002). A utilização desta variedade se dá por uma peculiaridade da produção brasileira que consome o fruto imaturo para o aproveitamento de sua água, diferentemente dos demais países onde preferencialmente fabrica-se óleo e outros sub produtos por meio do fruto maduro (ROSA et al.,2001).

O coqueiro de tipo anão tem sido estudado em programas de melhoramento genético para o aproveitamento da água, isto porque esta espécie floresce cedo, cerca de 4 anos após o plantio e apresenta vida produtiva de aproximadamente 40 anos. Os frutos em geral são pequenos, provenientes da autopolinização (SIQUEIRA; ARAGÃO; TUPINAMBÁ, 2002).

Segundo a Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais (SEAPA-MG) o Brasil apresentou uma produção 1754,4 mil toneladas de coco em 2016, oriunda de uma plantação com área de 234,7 mil hectares onde os estados do nordeste destacam-se como maiores cultivadores. Ainda de acordo com a SEAPA-MG, aproximadamente 0,069% dessa produção é destinada ao mercado externo. Observa-se que o Brasil consome a maior parte do que produz sendo, uma parcela na forma in natura.

Comparando-se os anos de 2004 e 2008 registrou-se um aumento de 56,4% em milhões de litros de água de coco consumida no país, que posteriormente alcançou a marca de 116,4 milhões de litros em 2012, representando um crescimento de 33,5% se comparando ao ano de 2008. Apesar disso o consumo desse produto ainda é pequeno se comparado com os outros produtos pertencentes ao segmento de bebidas como os refrigerantes e os néctares (MARTINS; JESUS JÚNIOR, 2014).

3.1 Resíduos da indústria de água de coco

Um grande problema desse mercado diz respeito aos resíduos gerados, já que a casca, material de difícil decomposição e que representa aproximadamente 80 a 85% do peso bruto do fruto, não apresenta valor comercial e é descartada na maioria das vezes em aterros sanitários nos grandes centros urbanos (ROSA et al., 2001).

O resíduo da indústria de água de coco é constituído de cinco partes, iniciando pelo epicarpo ou exocarpo, componente mais externo que constitui a epiderme, seguido pelo mesocarpo, porção mais espessa e fibrosa, endocarpo, camada fibrosa que apresenta uma certa rigidez que acentua-se a medida que o fruto vai atingindo o estado de maturação, copra, polpa do fruto e embrião (MATTOS et al., 2018).

Na indústria esse resíduo do fruto maduro apresenta vasta aplicabilidade devido às tecnologias existentes que propiciam seu beneficiamento, diferente do fruto imaturo que apresenta alto teor de umidade, cerca de 85%, e fibras com características que impossibilitam a utilização das técnicas de tratamento existentes. Outro fator que gera o desinteresse da indústria no beneficiamento das fibras do coco verde é o fato do material obtido não apresentar as mesmas características das fibras de coco maduro que possui estrutura física com alta porosidade, alto potencial de retenção de umidade e biodegradável (ROSA et al., 2001).

3.1.1 BENEFICIAMENTOS DO COCO VERDE

Estudos vem sendo realizados para determinar um processo de tratamento do resíduo que resulte em material com valor agregado e aplicabilidade industrial. Assim pode-se destacar como viável a utilização da casca do coco verde como substrato agrícola, após a extração da umidade e sais solúveis por meio da compressão mecânica e a fabricação de fibras, já que estas possuem características como baixa densidade, grande percentual de alongamento e valores pequenos de resistência à tração e de módulo de elasticidade, possibilitando uma vasta aplicação que vai desde confecção de compósitos até utilização em misturas asfálticas (MATTOS et al., 2018).

É importante ressaltar que as pesquisas apontam que as propriedades do produto obtido está diretamente ligado às operações aplicadas durante o beneficiamento do resíduo, assim o estudo aprofundando de cada etapa a fim de definir as melhores condições torna-se algo crucial para o sucesso do processo como um todo (ROSA et al., 2001; MATTOS et al., 2018).

O processamento da casca do coco verde se dá por uma série de operações unitárias organizadas de acordo com o produto final desejado cujas etapas bases consistem em dilaceração, moagem, prensagem e seleção. No entanto, a operação de secagem é comumente aplicada quando se trata dessa matéria prima, seja como estágio inicial ou final, já que o material a ser tratado apresenta diversas origens e pode apresentar microrganismos que se não erradicados causa a contaminação do produto final. Sendo assim, o tratamento térmico é aplicado tanto para inativação destes quanto para redução do teor de umidade (MATTOS et al., 2018).

3.2 Secagem de alimentos

A secagem é o método de conservação de alimentos mais antigo, consistindo em uma operação unitária responsável pela remoção de líquido de um material sólido, desidratação, por meio de evaporação ou centrifugação a uma temperatura inferior a de ebulição da água (CLESTINO, 2010)

Apesar de algumas propriedades nutricionais dos alimentos serem degradadas com a secagem, ela apresenta muitas vantagens como a concentração do valor alimentício devido à perda de água, o prolongamento da vida útil do material, a facilidade no transporte e comercialização do produto já que esse torna-se mais leve, compacto e com suas qualidades prolongadas e inalteradas após seco, além de ser um processo economicamente viável que permite diminuir os custos de armazenagem do produto (CARNEJO; NOGUEIRA; WILBERG, 2003; CELESTINO, 2010).

Existem dois métodos utilizados para realização da secagem, o natural e o artificial. No primeiro, a remoção de água do alimento é feita por meio da exposição da matéria prima às radiações solares. No segundo, este processo se dá pelo emprego de equipamentos. Sendo necessário em ambos, condições determinadas de temperatura, umidade relativa e velocidade de ar para que o produto atinja a qualidade desejada. Por ser um processo mais rápido e com maior controle das condições de operação e contaminação que o natural, além de não depender das condições climática, a secagem artificial é o método mais aplicado industrialmente (CARNEJO; NOGUEIRA; WILBERG, 2003).

Os alimentos são constituídos de água livre, que está presente nos espaços intersticiais e entres os poros dos alimentos, e água ligada ou de hidratação, associada quimicamente a outras substâncias do alimento. Durante a operação de secagem ocorre a remoção da água livre, conhecida como atividade de água (A_w) que equivale relação com a pressão de vapor parcial da

água e a pressão de vapor da água saturada a mesma temperatura, por meio da fase gasosa insaturada (CARNEJO; NOGUEIRA; WILBERG, 2003). Essa evaporação da umidade excessiva geralmente é ocasionada por convecção forçada de ar quente e durante a operação ocorre as transferências simultâneas de calor e massa entre o ar de secagem e o produto (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999).

A secagem busca diminuir o conteúdo de água, parâmetro expresso em base seca. Porém, isso não é suficiente para prever a estabilidade do alimento sendo necessário a utilização dos valores de atividade de água responsável por quantificar a água mínima necessária para o crescimento de microrganismos e as reações que podem alterar suas propriedades (CELESTINO, 2010).

3.2.1 CINÉTICA DE SECAGEM

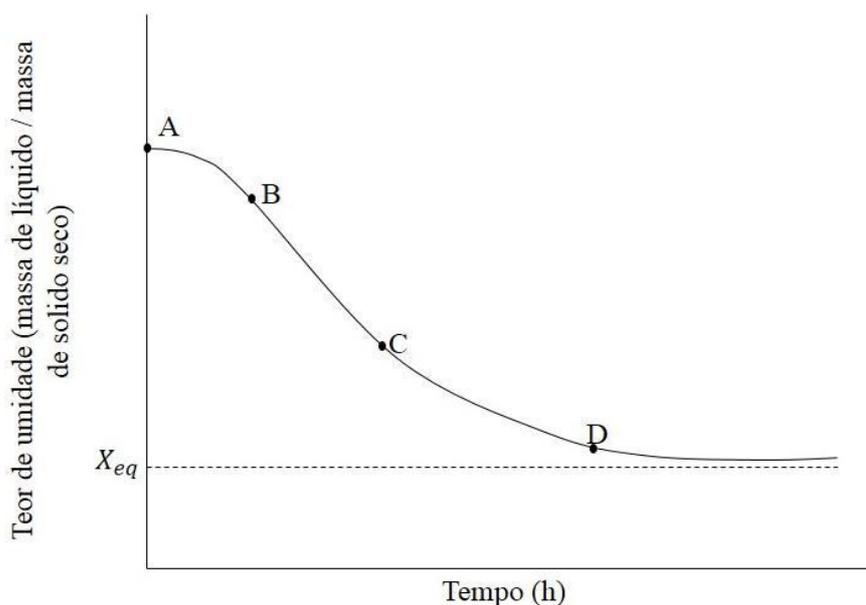
Nesse contexto o estudo da velocidade de perda de umidade pelo alimento é feito pela cinética de secagem (CELESTINO, 2010). O processo é dividido em duas etapas principais, onde a primeira apresenta velocidade constante, devido a elevada diferença de temperatura entre o bulbo seco do ar e da matéria prima, e a segunda é caracterizada pela queda da velocidade de secagem. Estes estágios podem ser explicados porque paralelo a diferença de temperatura existente no sistema, há também uma distinção entre a pressão de vapor da água no ar e no sólido que por sua vez determina a velocidade com que o vapor de água formado no alimento é absorvido no ar (GAVA, 1984).

A Figura 1 ilustra uma curva genérica de secagem. O primeiro estágio pode ser observado no segmento BC e o segundo a partir do ponto D. Ao analisar a curva, nota-se ainda a presença de dois estágios intermediários representados pelos trechos AB, onde ocorre um ajuste da temperatura do sólido com a do ar, sendo possível a ocorrência de uma taxa crescente ou decrescente; e CD, neste a superfície do sólido vai empobrecendo gradativamente em umidade (MARCINKOWSKI, 2006).

Assim, as transferências de calor e de massa ocorrem até o instante em que o ar possa absorver o vapor de água produzido no interior da matéria prima. Após isso, o sistema entra em estado de equilíbrio, as pressões de vapor se igualam, finalizando assim o processo de secagem. Nesse ponto do ensaio determina-se a umidade de equilíbrio ou o teor mínimo de umidade (CELESTINO, 2010). Além dos citados anteriormente outros fatores que influenciam a cinética

de secagem são a quantidade de matéria prima alimentada, a velocidade de alimentação do ar, a área superficial, a massa e a espessura da amostra (GAVA, 1984).

Figura 1- Curva genérica de secagem em condições constantes.



Fonte: MARCINKOWSKI (2006).

É importante ressaltar que não existe uma teoria de secagem única para todos os alimentos, porque o mecanismo de secagem está diretamente ligado com a estrutura de cada material e as condições de operação. Deste modo, torna-se necessário o estudo de cada caso para compreender o fenômeno de secagem com a matéria prima desejada (MARCINKOWSKI, 2006)

O estudo da cinética de secagem é realizado pela comportamento do conteúdo de umidade do alimento no decorrer do processo definido em dois períodos distintos denominados de períodos de taxas constante, onde predominam as transferências da superfície do material com o ar de secagem, e decrescente, caracterizado pelas transferências internas (PARK, 2007). A visualização de todas as etapas do processo de secagem é feita por meio das curvas de umidade versus tempo de secagem, construídos com dados referentes à retirada e pesagem da amostra de tempos em tempos no decorrer do experimento até que não seja mais observada uma variação na massa. Estas informações são o ponto inicial de compreensão do processo e serão utilizados posteriormente para determinação do teor de umidade calculado em base seca ou úmida (CELESTINO, 2010).

3.3 Modelagem matemática da cinética de secagem

Uma grande preocupação da engenharia é com a eficiência dos processos, o que não é diferente na secagem. Para isso busca-se sempre otimizar as condições de operação, no caso da secagem, por meio do estudo dos fenômenos não-lineares dos transportes interconectados de calor e massa, sendo a modelagem matemática uma ferramenta bastante apropriada, já que ela disponibiliza as informações necessárias para escolha das melhores condições, tanto de operação quanto de dimensionamento de equipamentos (VEGA-GÁLVEZ et al., 2010).

3.3.1 PERÍODO A TAXA CONSTANTE

Como já mencionado neste trabalho, no período de taxa constante as transferências de calor e massa ocorrem na interface ar-produto e acabam por fixar a velocidade desta etapa do processo. Como nessa fase há um equilíbrio de temperatura entre o ar de secagem e superfície do material, que por sua vez encontra-se úmida, despreza-se as transferências por condução e radiação e as equações são propostas tomando como base o efeito de condutância de superfície já que ao redor do material forma-se uma fina camada em escoamento laminar, denominada camada limite (PARK, 2007; VILLA-VÉLEZ, 2011).

A determinação do período de taxa constante pode ser feito pela Equação (1):

$$\frac{dX}{dt} = \frac{hA(T_{amb} - T_{bu})}{\lambda} \quad (1)$$

onde: dX/dt é a taxa de secagem, h é o coeficiente de transferência de calor ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), T_{amb} é a temperatura ambiente ($^\circ C$), T_{bu} é a temperatura de bulbo úmido, A é a área da superfície exposta (m^2) e λ é o calor latente de vaporização (J/mol) (HALL, 2006; VILLA-VÉLEZ, 2011).

3.3.2 PERÍODO A TAXA DECRESCENTE

Quando trata-se das transferências internas, a complexidade do fenômeno leva os estudiosos a utilizarem dois métodos de análise: as teorias que se baseiam nas leis físicas para explica o mecanismos de transferência de água e as equações empíricas formuladas utilizando grupos físicos adimensionais tendo como base as condições externas (VILLA-VÉLEZ, 2011).

Assim, duas teorias destacam-se quando se fala do período de taxa decrescente, a teoria difusional, baseada exclusivamente na lei de Fick, abordando que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água levando em conta que a difusividade da água é constante, o produto é homogêneo, as dimensões do produto permanecem constantes ao longo do tempo, a superfície do produto se põe imediatamente em equilíbrio com o ar de secagem e o conteúdo de umidade do material tende para a umidade de equilíbrio. A segunda teoria, denominada de capilar, considera o movimento capilar da água líquida dentro dos sistemas simples, constituídos de tubos capilares, e porosos, baseando-se no princípio de que em tubos capilares a ascensão da água, por meio da pressão de sucção, é proporcional a tensão superficial da água e inversamente proporcional ao seu raio, admitindo-se assim que a tensão capilar é associada ao teor de água (PARK, 2007).

3.3.3 MODELOS MATEMÁTICOS

No decorrer dos anos muitos modelos foram propostos pra o estudo da secagem de alimentos, dentre os quais pode-se citar os modelos de Lewis, Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Midili, Aproximação diferencial e Page entre outros. Esses modelos utilizam como variável de estudo a umidade adimensional (W), que representa a quantidade de água livre removida em um intervalo de tempo pela capacidade total de água a ser removida em função do tempo. Isso acontece porque nesses sistemas é comum que ocorra uma alteração nas umidades iniciais ao longo de todos os ensaios (MARCINKOWSKI, 2006). Esta variável é definida pela Equação (2):

$$W = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (2)$$

onde: X é a umidade do produto, X_0 a umidade inicial e X_{eq} a umidade de equilíbrio.

Os modelos teóricos levam em consideração que variação da taxa de secagem ocorre de modo decrescente ao longo do processo, além de não desconsiderarem no estudo os fenômenos de transporte de calor e massa no interior do material tendo como como parâmetros de análise as condições externas como temperatura e umidade relativa do ar de secagem (RESENDE et al., 2008; SILVA, et al, 2014)

Apesar de suas restrições, os modelos semi-empíricos e empíricos mostram-se satisfatórios para descrever os processos de secagem de produtos agrícolas. No entanto, quando se trata de explicar o processo difusivo, muitos pesquisadores optam pela aplicação da teoria

da difusão líquida, segunda lei de Fick, por ela estabelecer relação entre o coeficiente de concentração do meio e o coeficiente difusivo, possibilitando assim o cálculo do coeficiente de difusão efetiva. Essas são então relacionadas ao mecanismo e as taxas de movimentação da água no interior dos alimentos, que por sua vez, são responsáveis pela qualidade do alimento após o processo de secagem (RESENDE et al., 2008).

4 MATERIAL E MÉTODOS

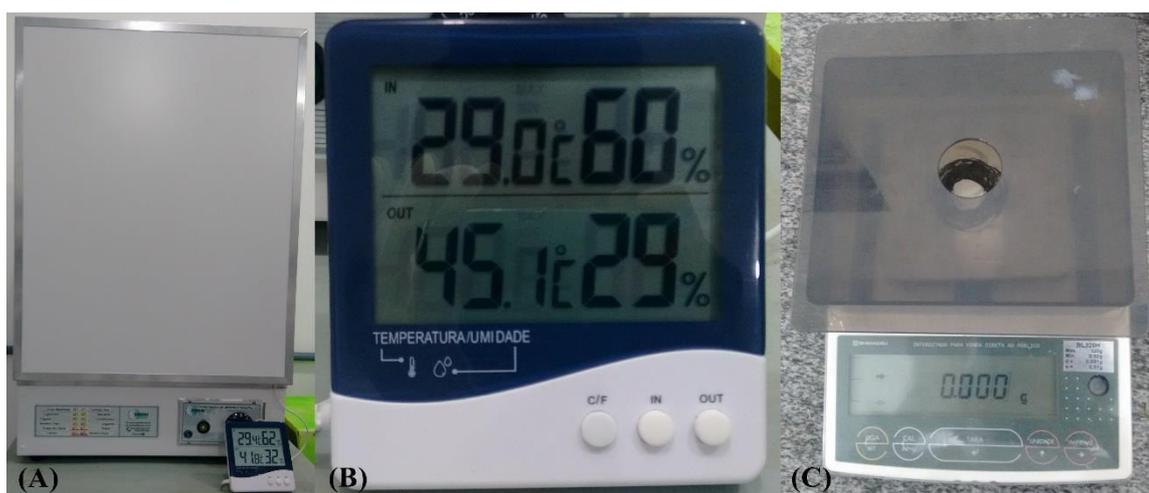
4.1 Matéria prima

Os resíduos de coco (*Cocos nucifera L.*) foram adquiridos no comércio da cidade de São Luís – MA. Para o experimento removeu-se o epicarpo e, logo após, retirou-se o mesocarpo com cortes paralelos seguidos de transversais a direção das fibras para obtenção de lâminas, posteriormente acomodadas em cadinhos de alumínio circulares, de tamanho de 19 cm de diâmetro por 1,9 cm de altura. As amostras foram inicialmente pesadas e em seguida realizou-se a determinação da altura das camadas em seis pontos distintos de cada amostra.

4.2 Experimentos de secagem

Para o experimento utilizou-se um desidratador de bandejas com circulação de ar forçado (modelo PE14, Pardal, Brasil). A determinação das massas foram feitas por uma balança de precisão 10^{-3} g (modelo BL320H, SHIMADZU, Japão). O controle da temperatura e umidade interna do sistema experimental foi realizado por um termo-higrômetro (modelo 7664, INCOTERM, Brasil). A Figura 2 ilustra os equipamentos utilizados no decorrer das práticas.

Figura 2- (A) desidratador de alimentos; (B) Termo-higrômetro; (C) Balança analítica.



Fonte: Próprio autor (2018).

Iniciou-se a prática com a determinação das massas dos cadinhos vazios. Após a preparação das amostras, descrito no item anterior, pesou-os novamente, sendo esse o peso inicial do experimento; em seguida acomodou-os na bandeja central do equipamento,

conforme mostra a Figura 3, e iniciou-se à desidratação. Esse procedimento foi aplicado para as temperaturas de 30, 45 e 60 °C. No decorrer do experimento pesou-se as amostras em intervalos de tempo de 5, 10 e 20 minutos sendo coletados 12 pontos para o primeiro intervalo, 10 para o segundo e no terceiro realizou-se pesagem até observar variação mínima entre massas obtidas em três momentos consecutivos.

Figura 3 - Amostras acomodadas em bandeja central do equipamento



Fonte: Próprio autor (2018).

4.3 Determinação da umidade da amostra

Para esta etapa do experimento determinou-se a umidade inicial do produto pelo método de estufa a 105 °C, (BRASIL, 2009) por 24 h, assegurando o peso constante. Empregou-se a Equação (3) para determinação do conteúdo de umidade em base úmida do material.

$$W_{bu} (\%) = 100 \left(\frac{m_{úmida} - m_{seca}}{m_{úmida}} \right) \quad (3)$$

onde: W_{bu} é a umidade em base úmida em percentual, $m_{úmida}$ é a massa da mostra úmida e m_{seca} massa da amostra após a secagem.

Aplicou-se este resultado para o cálculo da composição centesimal das fibras de cada amostra, conforme descrita na Equação (4).

$$X_{ss} = M_{amostra} \left(1 - \left(\frac{W_{bu} (\%)}{100} \right) \right) \quad (4)$$

onde: W_{bu} é a umidade em base úmida em percentual, X_{ss} é a quantidade de sólidos secos da amostra e $M_{amostra}$ massa inicial da amostra no experimento de secagem

Efetou-se a determinação da água evaporada no decorrer do experimento de secagem por meio da Equação (5).

$$A_{evaporado} = \frac{X_o - X_e}{X_0} \quad \text{Eq. (5)}$$

onde: $A_{\text{evaporado}}$ é quantidade de líquido evaporado, X_0 é a conteúdo de umidade inicial (kg/kg, b.s.) e X_e é o conteúdo de umidade no equilíbrio (kg/kg, b.s.).

4.4. Modelagem matemática

Para o estudo das cinéticas de secagem das fibras de coco, utilizou-se os modelos empíricos em camada fina de Weibull (Equação (6)), Peleg (Equação (7)), Henderson-Pabis (Equação (8)), Lewis (Equação (9)), Page (Equação (10)), Aproximação por Difusão (Equação (11)), Midilli (Equação (12)), Logarítmico (Equação (3)), Wang and Sing (Equação (14)) e Dois Termos (Equação (15)).

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp\left(-\frac{t}{k}\right) \quad (6)$$

$$X = X_0 - \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (7)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) k_1 \exp(-k_2 t) \quad (8)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-kt) \quad (9)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-kt^N) \quad (10)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) k_1 \exp(-k_2 t) + (1 - k_1) \exp(-k_2 k_3 t) \quad (11)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-k_1 t^{k_2}) + k_3 t \quad (12)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) k_1 \exp(-k_2 t) + k_3 \quad (13)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) (k_1 t^2 + k_2 t + 1) \quad (14)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) (k_1 \exp(-k_2 t) + k_3 \exp(-k_4 t)) \quad (15)$$

onde: X é o conteúdo de umidade no tempo t (kg/kg, b.s), X_0 é a umidade inicial (kg/kg, b.s), X_e é a umidade de equilíbrio (kg/kg, b.s), k , k_1 , k_2 , k , k_3 e k_4 são as constantes de velocidade de secagem (s^{-1}), N coeficiente do modelo de Page (KALEEMULLAH ; KAILAPPAN, 2006; GONÇALVES et al., 2016).

A modelagem matemática dos modelos testados foi realizada por meio do software interativo MATLAB versão R2013a, tendo como objetivo a determinação das constantes e obtenção de curvas teóricas de cada modelo nas temperatura de 30, 45 e 60 °C. Para isso implantou-se algoritmos tendo como dados de entrada os encontrados experimentalmente.

4.5 Determinação do coeficiente de difusão efetivo e da energia de ativação

Para o cálculo dos coeficientes difusivo utilizou-se a resolução da segunda lei de Fick para placa plana, desenvolvida por CRANK (1975), conforme mostra a Equação (16). Para isso aplicou-se o comando `fminsearch` no software interativo MATLAB versão R2013a, utilizando os dados de tempo (s), X (kg/kg, b.s.) e espessura média obtidos experimentalmente para cada temperatura.

$$W = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left\{ -D_{ef} (2n+1)^2 \frac{\pi^2 t}{4L^2} \right\} \quad (16)$$

onde: D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo (m^2/s), t tempo (s), L espessura do produto (m) e n número de termos do modelo.

A energia de ativação foi obtida por meio da linearização da relação tipo Arrhenius, que descreve a dependência da D_{ef} com a temperatura conforme mostra a Equação (17).

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_0) - \frac{E_A}{RT} \quad (17)$$

onde: D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo, D_0 coeficiente de difusão máximo, E_A energia de ativação para difusão (J/mol), T temperatura (K) e R constante dos gases ideais (J/Kmol).

4.6 Análise estatística

A análise estatística foi realizada tendo como parâmetros o erro médio relativo (MRE , Equação (18)) e o coeficiente de correlação quadrático ajustado (R_{adj}^2 , Equação (19)). Esse estudo teve como intuito a avaliação da proximidade entre os valores experimentais e os calculados pelos modelos além determinar a eficiência de cada modelo na simulação e descrição do processo (VILLA-VÉLEZ et al., 2015). O modelo com MRE inferior a 15% foi considerado adequado na simulação (SABLANI et al., 2002).

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X - X^*|}{X} \quad (18)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \left(\frac{b-1}{b-2} \right) (1 - R^2) \quad (19)$$

onde: X representa os dados experimentais, X^* os dados calculados pelo modelo na regressão, R^2 o coeficiente de correlação quadrático, b o número de parâmetros no modelo e n o número de pontos experimentais usados na análise de regressão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Secagem das fibra de coco verde

Através da realização do experimento para determinação do conteúdo de umidade conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Dados de conteúdo de umidade das fibras de coco verde.

Amostra	Massa inicial	Massa final	W_{bu} (%)
1	7,013	4,388	87,94
2	6,965	4,392	88,11
3	7,229	4,427	88,72
	Média		88,26

Fonte: Próprio autor (2018).

Por meio da Tabela 1, constatou-se que as fibras de coco verde são constituídas de 88,3% de água, o que permite determinar a quantidade de sólidos secos, das amostras submetidas aos experimentos de secagem. Os ensaios ocorreram nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C com uma variação de ± 2 °C e os dados de umidade relativa, quantidade de sólidos secos, massa inicial e espessura média para cada temperatura estão expressos na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições iniciais obtidas nos experimentos de secagem.

Temperatura (°C)	30	45	50
M_{amostra} (g)	22,10	22,05	14,74
UR (%)	47,57	18,86	10,00
X_{ss} (g)	2,59	2,59	1,73
L (cm)	0,47	0,51	0,54

Fonte: Próprio autor (2018).

A Tabela 3 apresenta os resultados de umidade para cada tempo X (kg/kg, b.s) e desvio padrão, calculados a partir das massas pesadas no decorrer do experimento e da quantidade de sólido secos presentes em cada amostra presentes na Tabela 2.

Através dos dados da Tabela 3, verificou-se que a maior perda de água das amostras foi no intervalo de 0 a 6000 segundos e que o menor tempo de secagem bem como a maior perda de água sucedeu na temperatura de 60 °C. Isto ocorre pois a capacidade de remoção de líquido que o ar apresenta está ligada a temperatura e umidade relativa do processo, já que o aumento da temperatura resulta na elevação da taxa de remoção de água do produto, fazendo

com que haja um maior gradiente de pressão de vapor da água entre o produto e o ar, reduzindo assim o tempo de secagem (CELESTINO, 2010; QUEIROZ et al., 2013; SOUSA et al., 2016).

Tabela 3 - Valores de umidade X (kg/kg, b.s.) e desvio padrão (Sd) obtidos com dados experimentais para os ensaios realizados nas temperaturas de 30, 45 e 60°C.

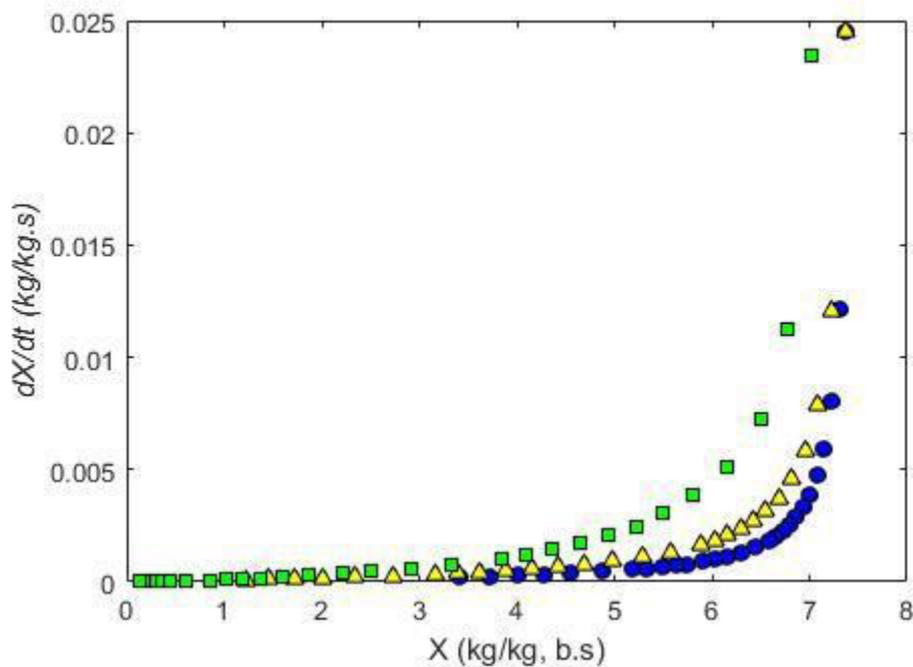
t (s)	X (kg/kg, b.s.)			Sd		
	30°C	45°C	60°C	30°C	45°C	60°C
0	7,518657	7,518657	7,518657	$1,03 \times 10^{-15}$	$8,88 \times 10^{-16}$	$5,13 \times 10^{-16}$
300	7,364213	7,363541	7,028953	0,053386	0,042833	0,205925
600	7,299003	7,23674	6,777055	0,0536	0,074855	0,229076
900	7,218443	7,081207	6,505502	0,056184	0,110273	0,250306
1200	7,15247	6,953796	6,157038	0,055391	0,144808	0,292138
1500	7,075489	6,811414	5,795283	0,058077	0,167135	0,424985
1800	7,003702	6,682616	5,501197	0,064562	0,192176	0,407518
2100	6,931476	6,547924	5,230941	0,073338	0,224106	0,46429
2400	6,864512	6,422059	4,936713	0,076823	0,253321	0,516106
2700	6,795735	6,302479	4,6572	0,082755	0,276224	0,565827
3000	6,730576	6,161011	4,363699	0,092663	0,319925	0,631736
3300	6,656006	6,029887	4,09624	0,098882	0,349305	0,677867
3600	6,590807	5,880931	3,840922	0,105096	0,38063	0,724469
4200	6,444854	5,584673	3,332365	0,118666	0,443931	0,810869
4800	6,30636	5,28906	2,909631	0,132693	0,513236	0,866956
5400	6,159692	4,988135	2,50594	0,15737	0,578911	0,886916
6000	6,034331	4,695392	2,221481	0,169147	0,63923	0,983734
6600	5,908966	4,420415	1,856466	0,188656	0,700289	0,870246
7200	5,747257	4,15086	1,600362	0,208677	0,746984	0,84071
7800	5,638908	3,888174	1,374672	0,228242	0,801156	0,807914
8400	5,494076	3,620035	1,177687	0,23328	0,843877	0,774287
9000	5,329063	3,388815	1,011225	0,245021	0,874325	0,73297
9600	5,189661	3,15537	0,850842	0,262316	0,902898	0,677668
10800	4,87553	2,734907	0,616563	0,293099	0,934954	0,558937
12000	4,555023	2,336102	0,450617	0,318441	0,939812	0,450551
13200	4,27057	2,01496	0,317841	0,350779	0,924372	0,338292
14400	4,003555	1,719565	0,234447	0,332829	0,890634	0,253799
15600	3,715157	1,453453	0,172727	0,384255	0,851187	0,178215
16800	3,418315	1,231093	0,127623	0,427626	0,798604	0,11563

Fonte: Próprio autor (2018).

Na Figura 4 observa-se o comportamento da taxa de secagem (dX/dt) em função da umidade das fibras X (kg/kg, b.s.). Analisando as curvas de taxa, nota-se a inexistência do período de taxa constante mostrando que o processo de secagem das fibras está ocorrendo a um período de taxa decrescente, comprando as curvas é possível afirmar que a temperatura de 60°C apresentou maior transferência de calor e massa no decorrer do experimento. Segundo Marcinkowski (2006), no período de taxa decrescente a perda de líquido ocorre

preferencialmente devido à evaporação da água na superfície do sólido, o transporte desse líquido do interior para o exterior, no caso de materiais fibrosos, se dá por sua difusão através do sólido.

Figura 4 – Curvas das taxas de secagem em função da umidade do material para a temperatura de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C.



Fonte: Próprio autor (2018).

Calculou-se a quantidade de água evaporado no decorrer de cada ensaio para os dados experimentais por meio da Equação (5). Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 4.

Por meio dos valores encontrados, pode-se constatar que o processo de secagem é bastante eficiente nas fibras de coco verde, pois apresenta uma grande capacidade de remoção de líquido do material, principalmente na temperatura de 60 °C onde evaporou-se 98,3 % da água. Lacerda (2017) observou que para mesma matéria prima, nas temperaturas de 60 e 80 °C por 600 min, o percentual de evaporado é de 94,06 e 99,98 % respectivamente.

Tabela 4 – Quantidade de água perdida durante a secagem nas temperaturas de 30, 45 e 60°C.

Água evaporada			
T (°C)	30	45	60
Água evaporada (kg/kg, b.s.)	4,10	6,29	7,39
Água evaporada (%)	54,5	83,6	98,3

Fonte: Próprio autor (2018).

É importante ressaltar que a não realização do experimento em temperaturas superior a 60°C, o que comprovaria uma retirada maior de líquido do material como mostra trabalhos realizados na mesma linha, ocorreu devido às limitações do equipamento utilizado para os ensaios.

5.2 Ajuste dos dados de secagem das fibras de coco verde aos modelos matemáticos

Para o ajuste matemático dos dados de secagem foram empregados os modelos empíricos de camada fina de Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Lewis, Page, Aproximação por difusão, Midilli, Logarítmico, Wang and Sing e Dois termos, descritos no item 4.4. Para isto utilizou-se as umidades iniciais (X_0), umidades de equilíbrio (X_e), os tempos (t) e os desvios (Sd) obtidas experimentalmente para cada temperatura, dispostos na Tabela 3, como dados de entrada, obtendo como resposta os valores das constantes para cada modelo e os dados estatísticos de ajustes dos modelos ao sistema experimental em cada temperatura.

Os parâmetros obtidos na modelagem matemática bem como a avaliação estatística para cada temperatura encontram-se expressos nas Tabelas 5 e 6 respectivamente.

Por meio da Tabela 6 é possível afirmar que os modelos de Midilli e de Page foram os melhores na descrição do sistema experimental, sendo o primeiro o de melhor ajuste, por apresentarem simultaneamente um coeficiente de determinação ajustável mais próximo de 1 e erro médio relativo abaixo de 10 %. Resultados semelhantes foram encontrados por Lacerda (2017), realizando o experimento com mesocarpo de coco verde nas temperaturas de 60 e 80 °C, e Sarmiento (2017) utilizando a mesma matéria prima na temperatura de 70 °C por 6h.

Segundo Moscon et al. (2017) os modelos de Page e Midilli também foram considerados satisfatórios para descrever a secagem de grãos de quinoa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.

O modelo de Page foi considerado adequado também nas cinéticas de secagem da massa fibrosa de mandioca a 55 e 65 °C e da cascas do umbu-cajá em 60, 70 e 80 °C (CASTIGLIONI et al., 2013; LIMA et al., 2017).

Com respeito as constantes k , que retrata o efeito das condições operacionais do experimento de secagem (GONELI et al., 2009), e do coeficiente n , relacionado à resistência interna do material à secagem (LIMA et al., 2017; PEREZ et al., 2013; GUEDES; FARIA, 2000), obtidas para os modelos de Midilli e Page, presentes na Tabela 5, não observou-se um comportamento definido com o aumento da temperatura.

Tabela 5- Parâmetros estimados dos modelos de camada fina empregados nas temperaturas de 30, 45 e 60°C.

Modelos	Parâmetros	Temperaturas (°C)		
		30	45	60
Weibull	k	24034	11273	4852,3
Peleg	k_1	3935,1	1883,3	637,38
	k_2	0,011464	0,041217	0,089183
Henderson-Pabis	k_1	1,0117	1,0522	1,0451
	k_2	$4,303 \times 10^{-05}$	$9,656 \times 10^{-05}$	0,000218
Logaritmico	k_1	19,703	1,6245	1,0982
	k_2	$1,662 \times 10^{-06}$	$4,724 \times 10^{-05}$	0,000184
	k_3	-138,29	-4,4924	-0,55406
Wang and Sing	k_1	$9,143 \times 10^{-11}$	$1,103 \times 10^{-09}$	$5,74 \times 10^{-09}$
	k_2	$-3,432 \times 10^{-05}$	$-7,041 \times 10^{-05}$	-0,000152
Lewis	k	$4,161 \times 10^{-05}$	$8,871 \times 10^{-05}$	0,000206
Page	k	$1,046 \times 10^{-05}$	$7,22 \times 10^{-06}$	$4,25 \times 10^{-05}$
	N	1,1503	1,2791	1,1867
Midilli	k_1	0,009582	$1,17 \times 10^{-05}$	$5,46 \times 10^{-05}$
	k_1	$1,006 \times 10^{-08}$	1,2129	1,1538
	k_3	-0,0002384	$-3,004 \times 10^{-05}$	$-1,02 \times 10^{-05}$
Dois termos	k_1	-0,013219	-0,061646	-0,060395
	k_2	0,99379	0,99379	0,99379
	k_3	1,0132	1,0616	1,0604
	k_4	$4,321 \times 10^{-05}$	$9,799 \times 10^{-05}$	0,000222
Aproximação por difusão	k_1	1,0039	1,0543	1,0448
	k_2	$3,865 \times 10^{-05}$	$9,687 \times 10^{-05}$	0,000207
	k_3	-7,9018	976,81	-0,62947

Fonte: Próprio autor (2018).

Tabela 6 - Avaliação estatística dos modelos de camada fina empregados nas temperaturas de 30, 45 e 60°C.

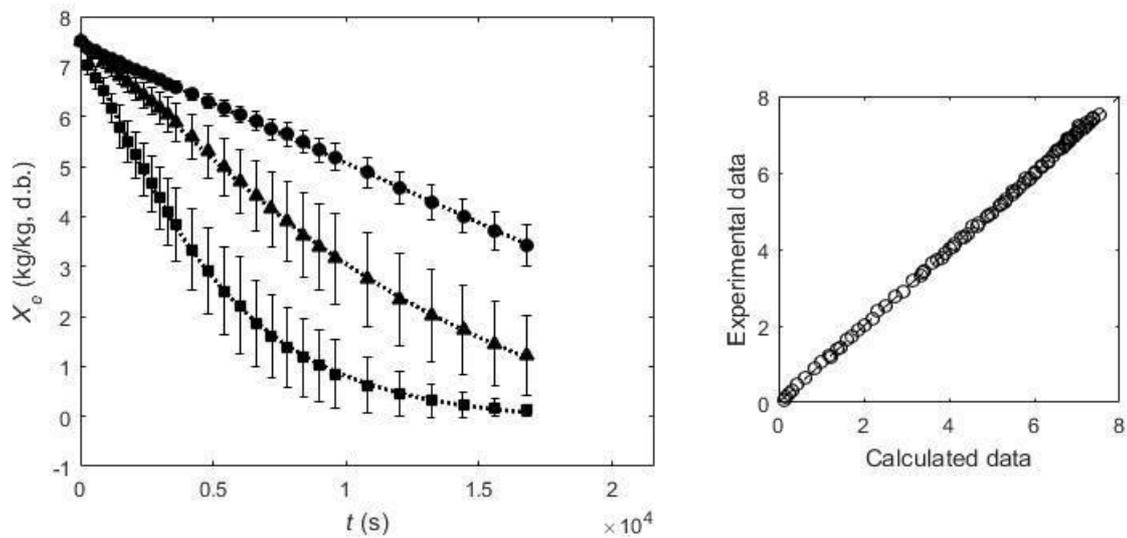
Modelos	Parâmetros Estatísticos	Temperaturas (°C)		
		30	45	60
Weibull	R^2_{adj}	0,989	0,990	0,996
	MRE (%)	2,065	8,199	28,936
Peleg	R^2_{adj}	0,999	0,997	0,992
	MRE (%)	0,585	2,745	31,441
Henderson-Pabis	R^2_{adj}	0,988	0,986	0,994
	MRE (%)	1,967	6,174	23,893
Logaritmico	R^2_{adj}	0,999	0,998	0,997
	MRE (%)	0,389	2,087	13,048
Wang and Sing	R^2_{adj}	0,999	0,998	0,995
	MRE (%)	0,585	2,122	27,800
Lewis	R^2_{adj}	0,989	0,990	0,996
	MRE (%)	2,065	8,190	28,937
Page	R^2_{adj}	0,995	0,999	0,999
	MRE (%)	1,249	1,307	8,359
Midilli	R^2_{adj}	0,999	0,999	0,999
	MRE (%)	0,297	0,886	3,743
Dois Termos	R^2_{adj}	0,987	0,987	0,9947
	MRE (%)	1,923	5,789	22,214
Aproximação por difusão	R^2_{adj}	0,998	0,986	0,996
	MRE (%)	0,772	6,103	12,704

Fonte: Próprio Autor (2018).

Na tabela 6 observa-se que para todos os modelos ocorreu o aumento do erro médio relativo com a temperatura, provavelmente devido ao tempo gasto pelo sistema para atingir o estado de equilíbrio diminuir a medida que a temperatura aumenta, como já mencionado no decorrer deste trabalho, gerando curvas experimentais mais acentuadas conforme a temperatura foi elevada, como pode-se observar nas figuras 5 e 6, fazendo com que os modelos ajustem-se mais facilmente nas temperaturas menores.

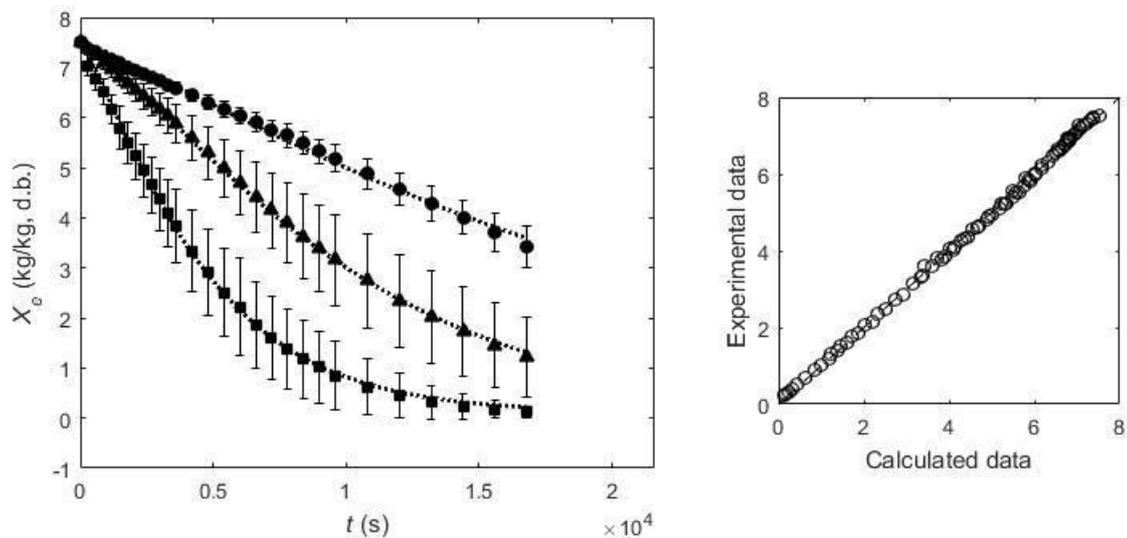
As figuras 5 e 6 mostram os ajustes dos modelos de Midilli e Page respectivamente as curvas experimentais, bem como as barras de desvios para os coletados, tem-se ainda os gráficos de resíduos entre os dados experimentais e calculados, comprovando a aplicabilidade dos mesmos ao sistema estudado. As curvas de ajustes para os demais modelos abordados encontram-se no apêndice A.

Figura 5 – Ajuste das curvas de secagem para ao modelo de Midilli (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.



Fonte: Próprio autor (2018).

Figura 6 - Ajuste das curvas de secagem para ao modelo de Page (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.



Fonte: Próprio autor (2018).

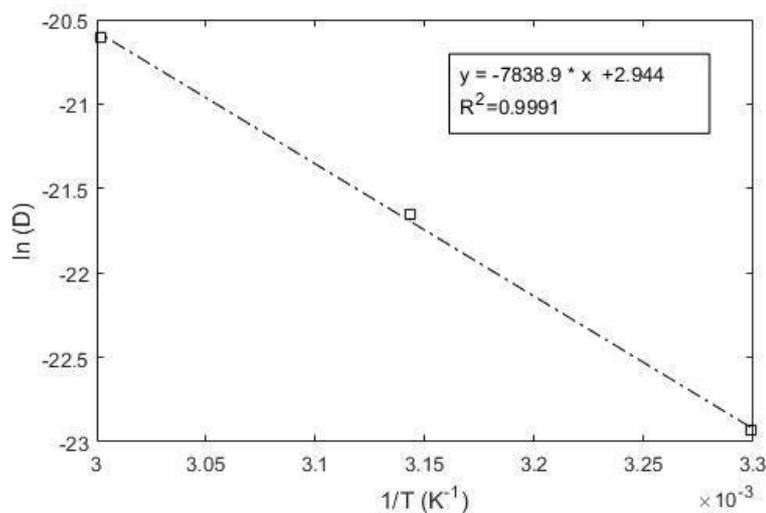
A determinação do coeficiente de difusão e da energia de ativação foi realizada conforme descrito no item 4.5. Os resultados obtidos nesta etapa encontram-se dispostos na Tabela 7, sendo que esses valores foram usados para o cálculo da energia de ativação do sistema, como mostra a Figura 7.

Tabela 7 - Coeficientes de difusão (D) e determinação (R^2) para a secagem realizada nas temperaturas de 30, 45 e 60°C.

T (°C)	D (m ² s ⁻¹)	R^2	ln (D)	1/T (K ⁻¹)
30	$1,10 \times 10^{-10}$	0,936	-22,93	0,0033
45	$3,95 \times 10^{-10}$	0,959	-21,65	0,0031
60	$1,12 \times 10^{-09}$	0,981	-20,60	0,0030

Fonte: Próprio autor (2018).

Figura 7 – Ajuste linear do inverso da temperatura em função do logaritmo natural de D_{ef} .



Por meio da Tabela 5 é possível observar o aumento do coeficiente difusivo efetivo com a temperatura, comportamento também observado por Botelho et al. (2015) para grãos de sorgo, Rodovalho et al. (2015) para grão de pimenta bode e Gomes et al. (2017) para as folhas de capim cidreira. De acordo com Corrêa et al. (2010), a elevação da temperatura diminui a pressão do líquido e sua resistência à evaporação, facilitando a difusão das moléculas no material.

Segundo Kashaninejad (2007), a energia de ativação do processo difusivo é a energia mínima necessária para iniciá-lo. Na difusão da água durante a secagem das fibras de coco verde, a energia foi determinada pela comparação da equação contida na Figura 7 e a Equação (16), considerando a constante dos gases (R) igual a 8,314 J/mol/K, obtendo-se uma energia de ativação de 65,17 kJ/mol. Este resultado encontra-se em conformidade com a literatura, pois, de acordo com Zogzas et al. (1996) para secagem de produtos agrícolas os valores podem variar de 12,7 a 110 kJ/mol.

6 CONCLUSÕES

Conforme mencionado no decorrer deste trabalho, apesar do elevado teor de água presente nas fibras de coco verde, cerca de 88,26 %, a secagem mostrou-se uma opção bastante viável de tratamento deste resíduo, devido ao baixo tempo de processo, aproximadamente 4 horas, e elevada eliminação da água presente no material, cerca de 98,3 %. Isto quando realizada na temperatura de 60 °C e umidade relativa de aproximadamente 10 %. Com o estudo da cinética nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C, verificou-se que a redução no teor de água ocorre em um período de taxa decrescente com a evaporação do líquido acontecendo principalmente na superfície do material. O ajuste aos modelos matemáticos indicou que os modelos em camada fina de Midilli e Page são os mais adequados para descrever o processo, por apresentarem um coeficiente de correlação quadrática ajustada (R^2_{adj}) e um erro médio relativo (MRE) próximo de 1 e menor que 9% respectivamente. Estes resultados foram condizentes com outros trabalhos descritos na literatura.

Com os dados experimentais, calculou-se ainda, os coeficientes de difusividade efetiva para a secagem das fibras de coco verde constando-se o seu aumento com a temperatura. Com o valor de energia de ativação obtido a partir dos coeficientes difusivos verificou-se que a mesma encontra-se dentro do esperado para produtos agrícolas.

Desta forma, o presente trabalho possibilita a realização de estudos mais aprofundados da secagem das fibras de coco verde, de forma a conhecer as propriedades termodinâmica e analisar outras variáveis que possam influenciar no processo, como a velocidade do ar e a espessura do material, possibilitando assim a apresentação de um sistema de tratamento que propicie sua reutilização.

REFERÊNCIAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. **Comparação de Modelos Matemáticos Para Descrição da Cinética de Secagem em Camada Fina de Sementes de Feijão**. Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental. Campina Grande, v.3, n.3, p.349-353, 1999.
- BARATI, E; ESFAHANI, J.A. **A New Solution Approach For Simultaneous Heat And Mass Transfer During Convective Drying Of Mango**. Journal Of Food Engineering 102, p. 302–309. 2011.
- BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Regras Para Análise de Sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: Mapa/ACS, 2009. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946_regras_analise__sementes.pdf>. Acesso em: Maio de 2018.
- BOTELHO, F. M.; GARCIA, T. R. B.; VIANA, J. L.; BOTELHO, S. de C., C.; SOUSA, A. M. B. DE. **Cinética de Secagem e Determinação do Coeficiente de Difusão Efetivo de Grãos de Sorgo**. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.14, n.2, p. 260-272, 2015.
- CARRIJO, O.A.; LIZ, R.S.; MAKISHIMA, N. **Fibra da Casca do Coco Verde Como Substrato Agrícola**. Horticultura Brasileira, Brasília, v. 20, n. 4, p. 533-535. 2002.
- CASTELL-PALOU, A.; SIMAL, S. **Heat Pump Drying Kinetics Of A Pressed Type Cheese**. LWT - Food Science and Technology 44, p.489-494. 2011.
- CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A. DA; CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR, M. S. **Modelagem Matemática do Processo de Secagem da Massa Fibrosa de Mandioca**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.17, n.9, p.987–994, 2013.
- CELESTINO, S. M. C. **Princípios de Secagem de Alimentos**. – Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010. 51 p.— (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, ISSN online 2176-5081; 276).
- CEMPRE. **Perfil de Recicladora de Fibras de Coco**. São Paulo, 1998. 35p. (Reciclagem & Negócio: Fibra de Coco).
- CORNEJO, F. E. P.; NOGUEIRA, R. I.; WILBERG, V. C. **Secagem Como Método de Conservação de Frutas**. Dezembro, 2003. Disponível em:<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/415605/1/2003DOC0054.pdf>>. Acesso em: Abril de 2018.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. **Modelagem Matemática e Determinação das Propriedades Termodinâmicas do Café (Coffea arabica L.) Durante o Processo de Secagem.** Revista Ceres, Viçosa, v. 57, n.5, p. 595-601, 2010.

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

FERRAZ, L. G. B.; ARAGÃO, W. M.; SÁ, V. A. L.; ANUNCIÇÃO FILHO, C. J.; SANTOS, V. F.; FERRAZ, E. B.; NASCIMENTOS, J. C. B. **Cultivadores de Coqueiro Recomendadas Pela IPA Para a Zona da Mata de Pernambuco.** 2009. Disponível em: <http://www.ipa.br/pdf/folder_coqueiro.pdf>. Acesso em: Abril de 2018.

GAVA, A. J. **Princípios da Tecnologia de Alimentos.** São Paulo. Nobel, 1984.

GOMES, N. H. F.; SILVA NETO, H. C. DA; ALVES, J. J. L.; RODOVALHO, R. S.; SOUSA, C. M. **Cinética de Secagem de Folhas de *Cymbopogon Citratus*.** ENGEVISTA, V. 19, n.2, p. 328-338, Maio 2017

GONÇALVES, J. Q.; SILVA, M. A. P. DA; PLÁCIDO, G. R.; CALIARI, M.; SILVA, R. M.; MOURA, L. C.; SOUZA, D. G. **Secagem da Casca e Polpa da Banana Verde (*Musa Acuminata*): Propriedades Físicas e Funcionais da Farinha.** Global. Science Technology. Rio Verde, v.09, n.03, p.62 - 72, set/dez. 2016.

GONELI, A. L. D.; CORREA, P.; AFONSO JUNIOR, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H. **Cinética de Secagem dos Grãos de Café Descascados em Camada Delgada.** Revista Brasileira de Armazenamento, v.1, n.11, p.64-73, 2009.

GUEDES, A. M. M.; FARIA, L. J. G. **Determinação da Constante de Secagem de Furculum (*Bixa orellana L.*) em Secador Convectivo de Leito Fixo.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.2, n.1, p.73-86, 2000.

KALEEMULLAH, S.; KAILAPPAN, R. **Modelling of thin-layer kinetics of red chillies.** J. Food Eng., v. 76, p. 531-537, 2006.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. **Thin Layer Drying Characteristics and Modeling of Pistachio Nuts.** Journal of Food Engineering, Essex, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

LACERDA, K. D. R. **Estudo da Secagem do Mesocarpo do Coco Verde (*Cocos nucifera*) e sua Utilização como Adsorvente do Corante Azul Cassafix CA-2G**. Dissertação mestrado. Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2017.

LIMA, A. R. C. DE; SANTOS, F. S. DOS; SILVA, R. M. DA; LEITE, D. D. F.; FIGUEIREDO, R. M. F. DE. **Modelagem Matemática da Cinética de Secagem da Casca de Umbu-Cajá**. Revista Brasileira de Agrotecnologia. v. 7, n. 2, p. 97 – 103, 2017.

MATTOS, A. L. A.; ROSA, M. DE F; CRISÓSTOMO, L. A.; BEZERRA, F. C.; CORREIA, D.; VERAS, L. DE G. C. **Beneficiamento da Casca de Coco Verde**. Disponível em: <http://www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo_3830.pdf>. Acesso em: Março de 2018.

MARTINS, C. ROBERTO; JESUS JÚNIOR, L. A. **Produção e Comercialização de Coco no Brasil Frente ao Comércio Internacional: Panorama 2014**. Agosto, 2014. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/122994/1/Producao-e-comercializacao-Doc-184.pdf>>. Acesso em: Março de 2018.

MARCINKOWSKI, E. de A. **Estudo da Cinética de Secagem, Curvas de Sorção e Predição de Propriedades Termodinâmicas da Proteína Texturizada de Soja**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

MOSCON, E. S.; MARTIN, S.; SPEHAR, C. R.; DEVILLA, I. A.; RODOLFO JUNIOR, F. **Cinética de Secagem de Grãos de Quinoa (*Chenopodium Quinoa W.*)**. Revista Engenharia na Agricultura. V.25, n.04, p.318-328, 2017.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. G. de; PARK, K. J. B. **Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem**. Campinas. Março, 2007. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgWqEAI/conceitos-processo-secagem>>. Acesso em: Maio de 2018.

QUEIROZ, A.J.M.; FIGUEIREDO, R.M.F.; DIÓGENES, A.M.G. **Secagem de Farinha de Sementes Residuais de Abóbora**. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil. VII Congresso Iberico de Agroingenieria Y Ciencias Hortícolas, Madrid, 2013.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. **Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*)**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 10, n. 1 p. 17-28, 2008.

RODOVALHO, R. S.; SILVA, H. W. DA; SILVA, I. L.; ROSSETTO, C. A. V. **Cinética de Secagem dos Grãos de Pimenta Bode**. Global. Science and Technology, Rio Verde, v.08, n.02, p.128 – 142, 2015.

ROSA, M. DE F.; ABREU, F. A. P. DE; FURTADO, Â. A. L.; BRÍGIDO, A. K. L.; NORÕES, E. R. DE V. **Processo Agroindustrial: Obtenção de Pó de Casca de Coco Verde**. Dez. 2001. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/425163/1/ct61.pdf>>. Acesso em: Março de 2018.

SABLANI, S. S.; BAIK, O. D.; MARCOTTE, M. Neural networks for predicting thermal conductivity of bakery products. *J. Food Eng.*, v. 52, p. 299-304, 2002.

SARMENTO, È. B. **Avaliação do Uso do Mesocarpo de “Coco Verde” Como Adsorvente de Íons de Cobre (Cu²⁺) Presentes em Águas Residuárias Industriais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2017.

SEBRAE. **O Cultivo e o Mercado do Coco Verde**. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-cultivo-e-o-mercado-do-coco-verde,3aba9e665b182410VgnVCM100000b272010aRCRD>>. Acesso em: Março de 2018.

SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DE MINAS GERAIS - SEAPA-MG. **Coco**. Fevereiro, 2017. Disponível em: <http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Agricultura/2017/Fev/perfil_coco_fev_2017.pdf>. Acesso em: Abril de 2018.

SILVA, L.M. de M.; SOUSA, F. C. de; SOUSA, E. P. de; MATA, C.; DUARTE, M. E. M. **Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu**. *Brazilian Journal of Food Technology*. v. 17, n. 4, p. 310-318. Campinas. out./dez, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/bjft/v17n4/1981-6723-bjft-17-4-310.pdf>>. Acesso em: Maio de 2018.

SINGH, S., RAINA, C. S., BAWA, A. S., & SAXENA, D. C. **Effect Of Pretreatments On Drying And Rehydration Kinetics And Color Of Sweet Potato Slices**. *Drying Technology* 24, p. 1487e1494. 2006.

SIQUEIRA, L. A.; ARAGÃO, W. M.; TUPINAMBÁ, E. A. **A Introdução do Coqueiro no Brasil: Importância histórica de Agronômica**. 2002. Disponível em: <<http://www.cpatc.embrapa.br/download/Documentos47.pdf>>. Acesso em: Março de 2018.

SOUSA, F. T.; SILVA, M. A. P. da; OLIVEIRA, D. E. C.; PLÁCIDO, G. R.; CAGNIN, C.; MOURA, L. C.; SOUZA, D. G.; CALARI, M.; LIMA, M. S. **Modelagem Matemática da Secagem e Propriedades Físicas e Funcionais do Bagaço de Malte**. *Global Science and Technology*, Rio Verde, v.09, n.03, p.51 - 61, 2016.

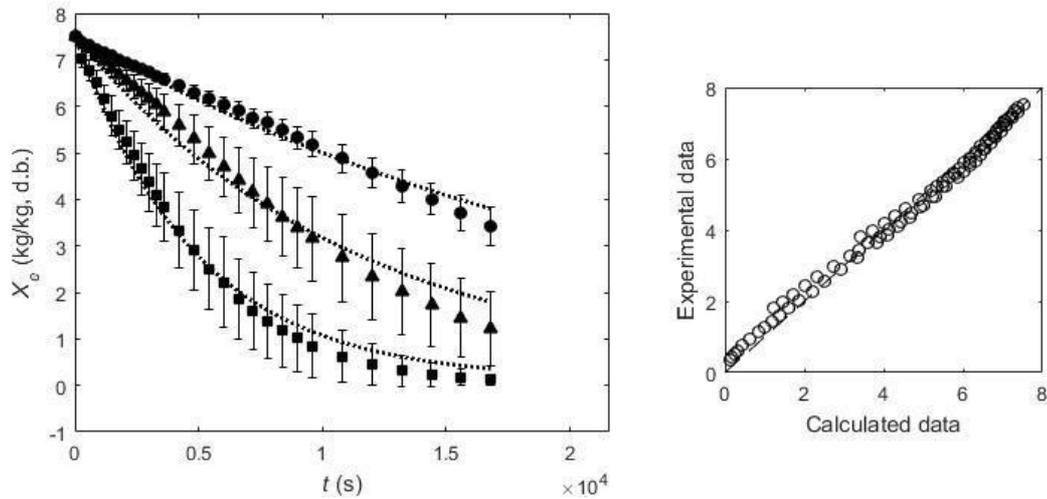
VILLA-VÉLEZ, H. A.; VÁQUIRO, H. A.; LOPES-FILHO, J. F.; TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J. **Study of the specific heat capacity of biomass from banana waste for application in the second-generation ethanol industry.** Environ. Prog. Sustain. Energy, v. 34, n. 4, p. 1221-1228, 2015.

VILLA-VÉLEZ, H.A. **Aplicações de Secagem Para o Aproveitamento de Resíduos da Banana, Visando Sua Aplicação na Indústria.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. São José do Rio Preto, 2011. Disponível em: <http://200.145.6.238/bitstream/handle/11449/90754/villavelez_ha_me_sjrp.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: Maio de 2018.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOSKOURIS, D. **Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs.** Drying Technology, New York, v. 14, n. 10, p. 2225 - 2253, 1996.

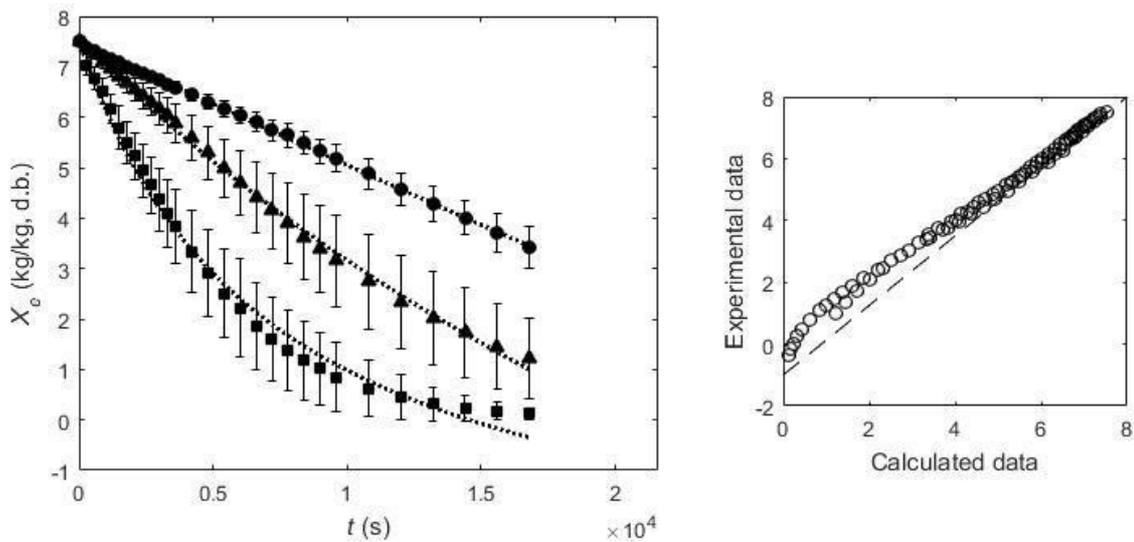
APÊNDICE A – AJUSTES DAS CURVAS DE SECAGEM AOS MODELOS CINÉTICOS DE CAMADA FINA.

Figura 8 – Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Weibull (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.



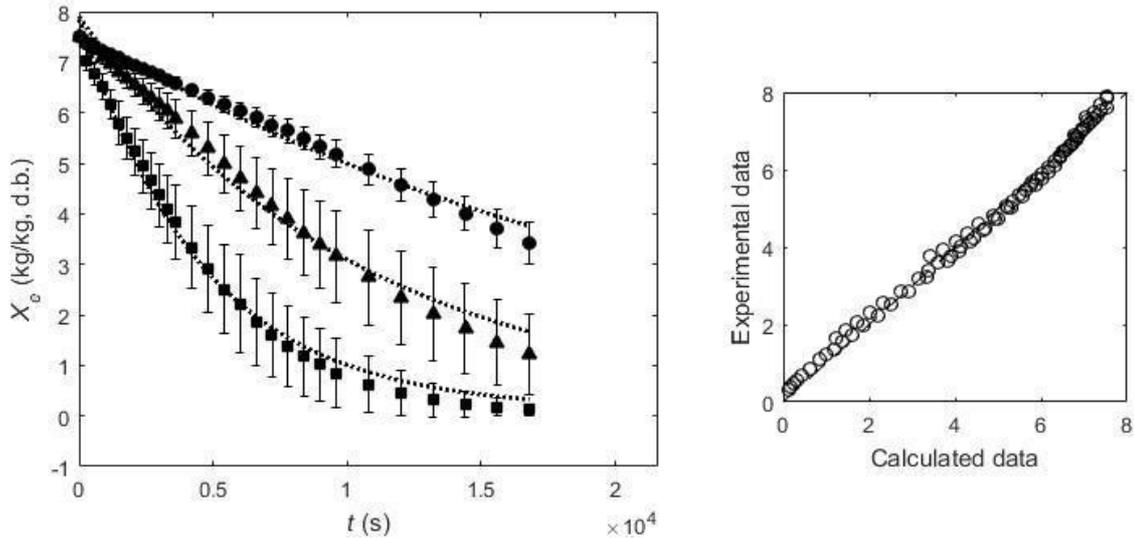
Fonte: Próprio autor (2018).

Figura 9 – Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Peleg (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.



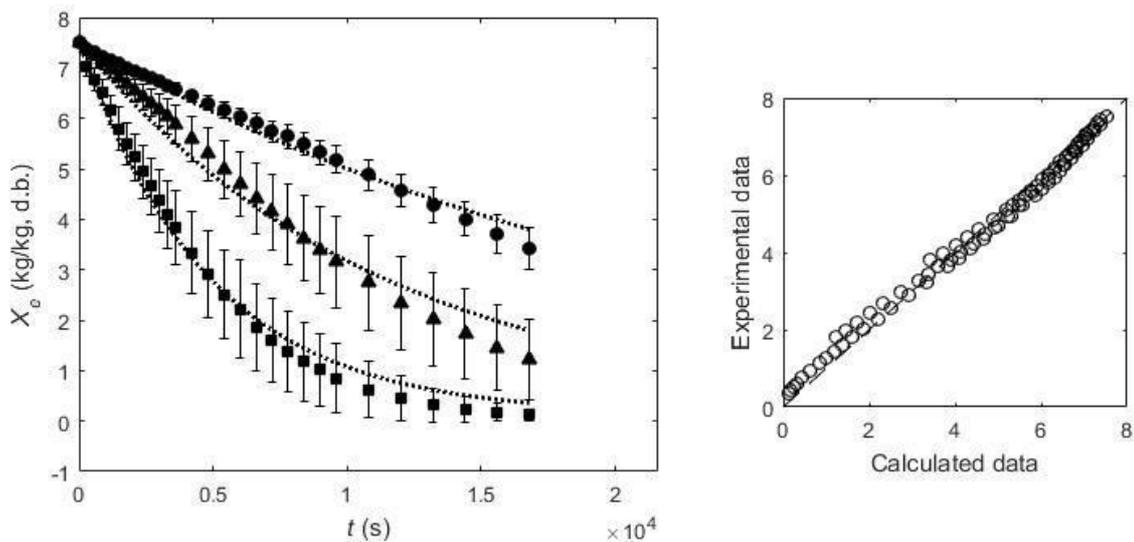
Fonte: Próprio autor (2018).

Figura 10 – Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Henderson-Pabis (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.



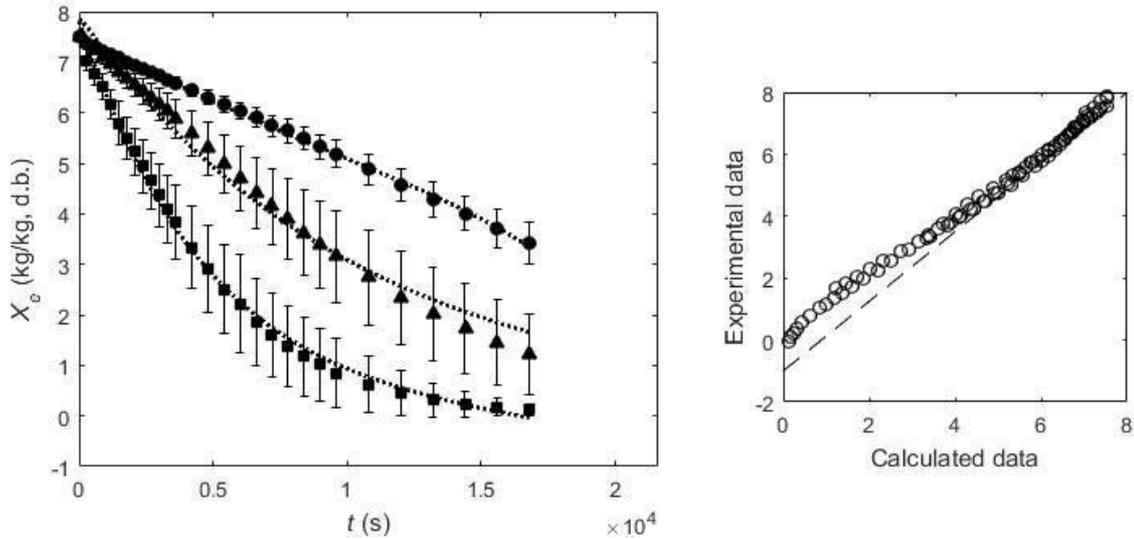
Fonte: Próprio autor (2018).

Figura 11 – Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Lewis (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.



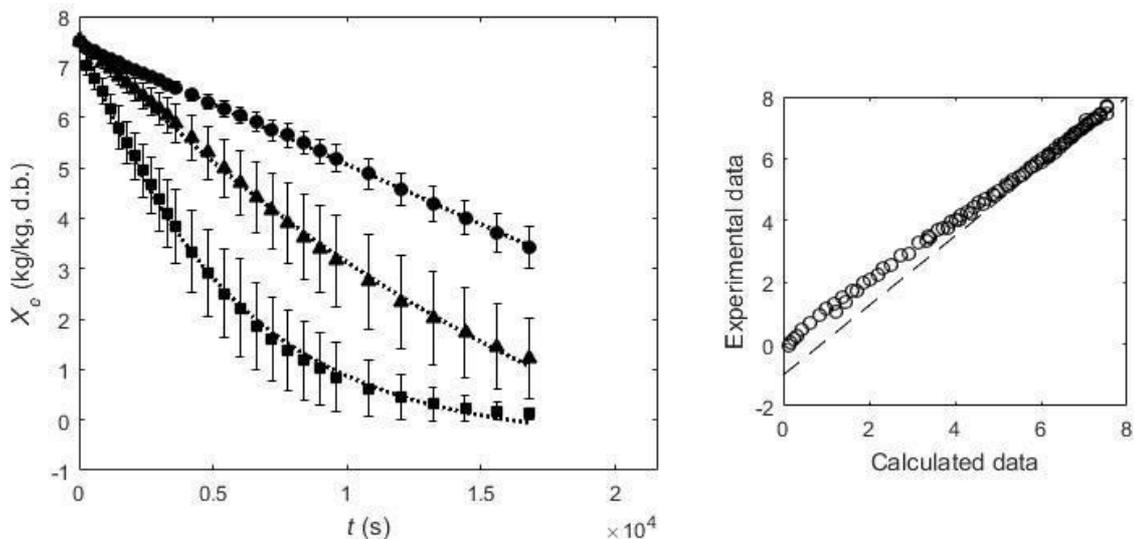
Fonte: Próprio autor (2018).

Figura 12 – Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Aproximação por difusão (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.



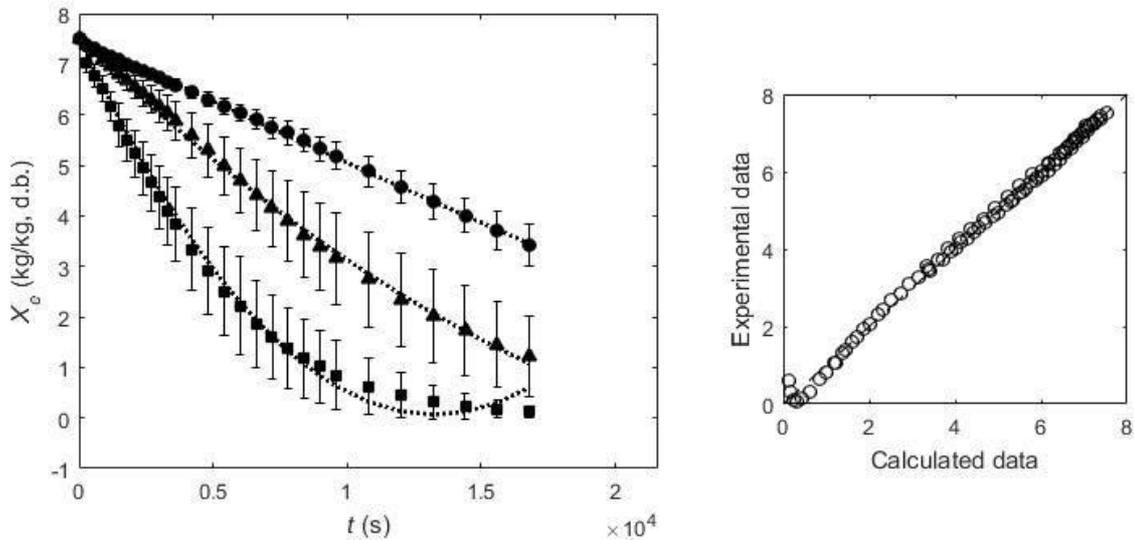
Fonte: Próprio autor (2018).

Figura 13 – Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Logarítmico (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.



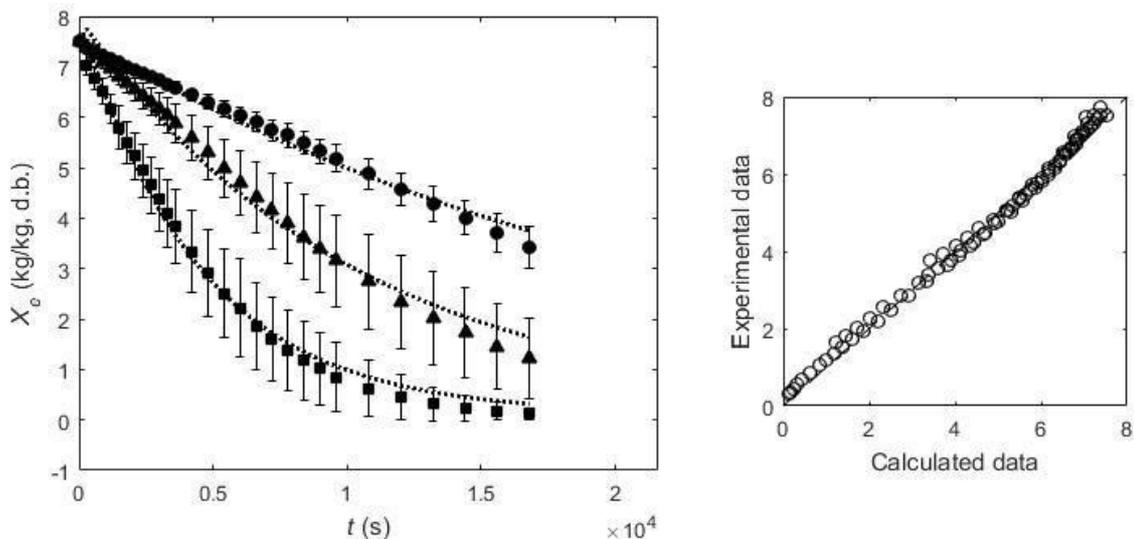
Fonte: Próprio autor (2018).

Figura 14 – Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Wang and Sing (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.



Fonte: Próprio autor (2018).

. Figura 15 – Ajuste das curvas de secagem para o modelo de Dois Termos (-) nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e gráfico dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.



Fonte: Próprio autor (2018).