

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM DE RESÍDUO DE *STERCULIA STRIATA* (CHICHÁ)

Amanda da Silva Santos¹
Mario Gabriel Belo Marinho Silva²
Leon Carvalho Vieira Cavalcante³
Tertuliano Ferreira Moreno⁴
Dayana de Gusmão Coêlho⁵

RESUMO

Em face da grande diversidade de espécies nativas do Brasil, é necessário reconhecer as potencialidades da nossa flora, seja no campo energético, da saúde ou, até mesmo, alimentício. Com isso em mente, o trabalho em questão traz como instrumento de estudo as sementes do chichá (*Sterculia striata*), provenientes de uma árvore nativa do cerrado brasileiro que se adaptou muito bem ao clima da cidade de Maceió. Já existem trabalhos envolvendo esta oleaginosa que comprovam o seu potencial quanto aos nutrientes e à quantidade de óleo presentes em sua estrutura, justificando o valor agregado a esta matéria-prima ainda pouco aproveitada no cenário industrial. Com base no que foi exposto até o momento, o presente projeto tem como objetivos a obtenção de propriedades termodinâmicas para os processos de secagem e extração do óleo das sementes de chichá (*Sterculia striata*) coletadas em Maceió, visando a encontrar as condições que tornem possível a otimização dos mesmos. O estudo envolvendo a cinética de secagem foi executado para a obtenção das propriedades termodinâmicas relacionadas ao processo, levando-se em consideração parâmetros apresentados na literatura existente. Além disso, observamos o comportamento das amostras ao longo do tempo e em diferentes temperaturas com a finalidade de desenvolver métodos que representem de forma confiável o processo em questão.

Palavras-chave: Secagem, Modelagem, *Sterculia striata*, Óleo vegetal.

INTRODUÇÃO

A modelagem matemática de processos permite o estudo e avaliação prévia das condições às quais o processo é submetido. Além disso, artifícios computacionais têm sido cada vez mais implementados para realizar a simulação a fim de conter os custos associados a

¹Graduanda em engenharia química da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, amandassamanda70@gmail.com;

²Graduado em Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, mariogabriel_18@hotmail.com;

³Graduando em Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, leon.cavalcante@ctec.ufal.br;

⁴Graduando em Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, tertuliano.f.m@gmail.com;

⁵Professora orientadora: Engenharia Química, Centro de Tecnologia - UFAL, dayana.coelho@ctec.ufal.br.

desperdícios nas linhas de produção.

Basicamente, para realizar uma simulação é necessário saber qual o processo (unidades de operação) será estudado, definir o problema a ser solucionado, quais as teorias e leis fundamentais que serão aplicadas, fazer o equacionamento do problema, levar em consideração todos os pontos mais relevantes e que influenciam no processo, fazer a simulação matemática e computacional para obter a solução e, posteriormente, validar a resposta (SECCHI, 1995).

Sterculia striata é uma noz nativa do Brasil e tem como teor de macronutrientes em sua composição: lipídios (28,6%), proteína (22,5%) e carboidratos (45,8%). Ademais, é relatado na literatura que a Chichá também apresenta na sua constituição ácidos graxos ciclopropenoídicos (CHAVES *et al.*, 2004). O óleo de Chichá tem sido aplicado na produção de biodiesel, visto que, pelo menos, até 40% do peso da semente corresponde ao óleo (m/m) (GOMES *et al.*, 2015).

O teor de umidade de equilíbrio é um aspecto muito importante e relevante para o processo de secagem de grãos. É a partir dele que se pode ter controle da quantidade de umidade mínima para as condições de secagem determinadas. Esse aspecto sofre a influência de fatores ambientais (umidade e temperatura) e fatores que são relacionados a origem e composição do grão (espécie, variedade e grau de maturidade) (TONELLO *et al.*, 2013).

Por ser um grão que possui grande teor de óleo, a *Sterculia striata* apresenta grande potencial para aplicações de finalidade industrial. Assim, o trabalho teve como principal objetivo a secagem da amêndoa de Chichá para avaliar quais as melhores condições de temperatura e tamanho da matéria-prima para o processo de secagem para otimizar o processo de extração do óleo.

METODOLOGIA

O trabalho foi executado seguindo quatro etapas sendo elas de caracterização da amostra, análise dos dados de secagem e modelagem matemática para descrever o comportamento experimental observado, baseando-se no planejamento experimental.

1. DETERMINAÇÃO DO TAMANHO MÉDIO DAS AMOSTRAS

Para a determinação do tamanho médio das amostras, realizou-se 20 medições utilizando um paquímetro analógico universal. As dimensões analisadas neste experimento

foram o comprimento e o diâmetro das sementes de chichá inteiras e particionadas em 1/2 e 1/4 do seu tamanho.

2. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO

Na determinação da umidade de equilíbrio, adotamos o método estático semelhante ao apresentado em Silva (2013). Fazendo uso de algumas soluções salinas supersaturadas nas temperaturas de 30°C, 50°C e 70°C, juntamente com seus respectivos valores de umidade relativa do ar UR ou atividade de água (a_w), o procedimento se deu da seguinte forma: com as sementes particionadas em 1/4 do seu tamanho e submetidas à estufa a 60°C por 24h, 5,0000g das mesmas foram suspensas sobre as soluções supersaturadas de NaCl, KCl e KI (sem contato físico com o líquido) e, todo o sistema, acomodado em recipientes hermeticamente fechados, como na Figura 1. Em seguida, os frascos foram levados à estufa nas temperaturas supracitadas, fazendo-se medições periódicas até que as massas das amostras permanecessem constantes. O experimento ocorreu em duplicata e o teor de umidade de equilíbrio foi obtido em base seca.

Figura 1 - Sistemas utilizados para a determinação da umidade de equilíbrio.



Fonte: AUTORES, 2019.

Os valores das atividades de água das soluções utilizadas neste experimento estão apresentados na Tabela 1. Após a realização dos ensaios descritos, os resultados foram submetidos a ajustes matemáticos utilizando os modelos apresentados na Tabela 1. Por meio da definição dos parâmetros de cada modelo pudemos avaliar a relação entre os dados observados e os preditos, bem como verificar qual foi o mais adequado para prever os resultados experimentais da umidade de equilíbrio.

Tabela 1 - Umidade relativa (UR) ou Atividade de água a_w das soluções salinas saturadas em função das temperaturas estudadas.

SAL	UR ou a_w (%)		
	30°C	50°C	70°C
LiCl	11,28	11,10	10,75
MgCl ₂	32,44	30,54	27,77
K ₂ CO ₃	43,17	43,20	43,23
Mg(NO ₃) ₂	51,40	45,44	39,47
KI	67,89	64,49	61,93
NaCl	75,09	74,43	75,06
KCl	83,62	81,20	79,49

Fonte: GREENSPAN, 1977.

3. CINÉTICA DE SECAGEM

O estudo da cinética de secagem das sementes de Chichá foi feito por meio de uma balança analisadora de umidade MARCONI ID 50, analisando os ensaios em duplicata nas temperaturas de 50°C e 70°C, semelhantes às temperaturas utilizadas no estudo da umidade de equilíbrio, e com as amostras particionadas em 1/4 e 1/2 do tamanho original das sementes. Desta forma, 5,000g das amostras foram levados à balança de secagem, nos tamanhos médios e temperaturas citados anteriormente, até que não houvesse mais variação na sua massa, indicando que o processo de remoção de umidade chegou ao fim. A temperatura de 30°C não foi avaliada por conta da limitação do equipamento utilizado, cuja temperatura mínima atingida foi de 50°C.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA

A metodologia utilizada para a avaliação estatística dos resultados obtidos com as análises da cinética de secagem das sementes de Chichá foi o ajuste por meio de modelos matemáticos. Após a determinação das variáveis de análise do experimento em questão, apresentadas na Tabela 2, foi possível a criação da matriz contendo o plano experimental utilizado para esta análise.

Tabela 2 - Parâmetros avaliados na cinética de secagem das sementes de chichá.

FATORES	NÍVEIS	
	-1	+1
Tamanho	1/4	1/2
Temperatura (°C)	50	70

Fonte: AUTORES, 2019.

Apesar de o planejamento de experimentos não ter sido o método de análise estatística escolhido para este experimento, utilizaram-se seus princípios para garantir que existisse interação entre todos os fatores analisados, fornecendo maior variabilidade nos resultados. A Tabela 3 traz a matriz de planejamento fatorial (2^2) e, desta forma, foi possível a avaliação dos fatores que mais influenciam na cinética de secagem das sementes de Chichá, bem como a interação entre eles. Foram necessários 8 ensaios experimentais, levando em consideração as duplicatas, compreendendo todas as combinações possíveis.

Os dados obtidos com os experimentos foram submetidos a ajustes matemáticos, foram avaliados nos modelos a relação existente entre os dados observados e os preditos pelos ajustes, assim como a significância dos seus respectivos parâmetros em função da temperatura no decorrer do processo.

Tabela 3 - Matriz de planejamento fatorial completo.

ENSAIOS	X ₁	X ₂
	TAMANHO	TEMPERATURA (°C)
01	-1 (1/4)	-1 (50)
02	1 (1/2)	-1 (50)
03	-1 (1/4)	1 (70)
04	1 (1/2)	1 (70)

Fonte: AUTORES, 2019.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Tabela 4, podemos ver que os diâmetros médios das amostras utilizadas nas análises foram 0,510cm ($\pm 0,0546$) e 0,437cm ($\pm 0,0428$), correspondendo a aproximadamente 1/2 e 1/4 do tamanho total das sementes, respectivamente.

Tabela 4 - Tamanho médio das sementes de chichá utilizadas no experimento.

TAMANHO	COMPRIMENTO MÉDIO (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)
1/1	2,144 ± 0,169	1,213 ± 0,0648
1/2	1,696 ± 0,150	0,510 ± 0,0546
1/4	0,940 ± 0,153	0,437 ± 0,0428

Fonte: AUTORES, 2019.

A Tabela 5 apresenta os resultados da umidade de equilíbrio dos frutos do Chichá para as diferentes atividades de água e temperaturas.

Tabela 5 - Umidade de equilíbrio das sementes de chichá utilizadas no experimento.

T = 30 °C		T = 50 °C		T = 70 °C	
aw (adm)	X _{s,e} (adm)	aw (adm)	X _{s,e} (adm)	aw (adm)	X _{s,e} (adm)
0,6789	0,0196±0,0004	0,6449	0,0121±0,0009	0,6193	0,0115±0,0087
0,7509	0,0329±0,0011	0,7443	0,0368±0,0006	0,7506	0,0352±0,0004
0,8362	0,0636±0,0008	0,8120	0,0558±0,0003	0,7949	0,0411±0,0010

Fonte: Autores, 2019.

Vários modelos foram ajustados aos dados da Tabela 5, sendo que os modelos de Caurie e GAB apresentaram resultados mais adequados nos ajustes aos dados experimentais. Na Tabela 6 são apresentados os valores dos parâmetros da equação da reta obtida no ajuste linear dos dados reais versus os preditos pelos modelos.

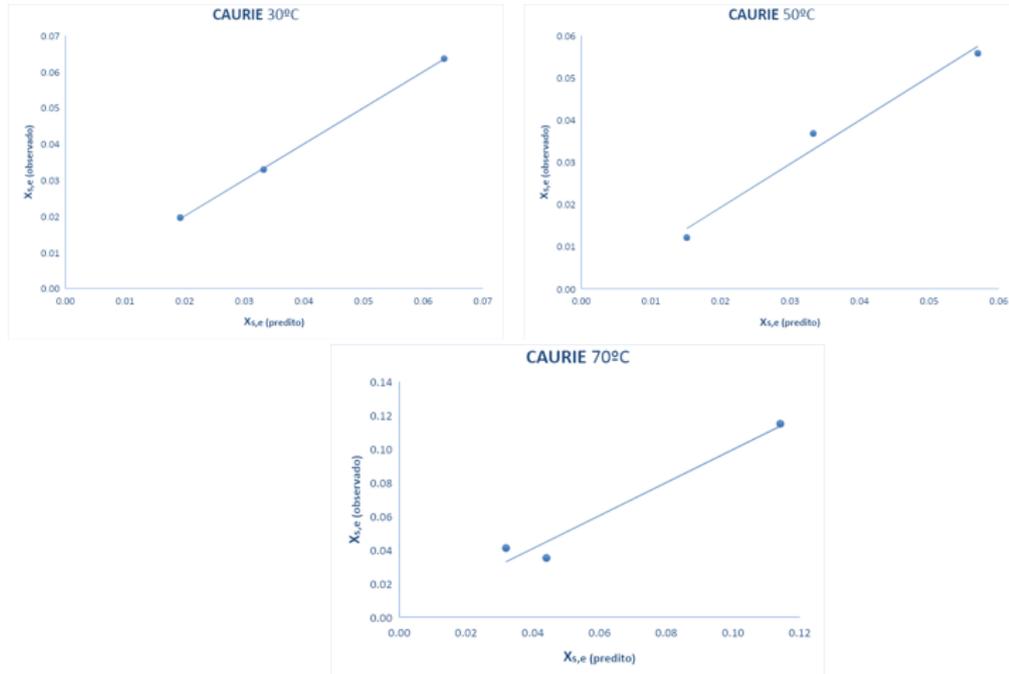
Tabela 6 - Parâmetros dos modelos de isotermas de sorção.

MODELO	TEMPERATURA (°C)	R ²	COEFICIENTE ANGULAR DA RETA	COEFICIENTE LINEAR DA RETA
Caurie	30	0,9998	0,9976	0,0001
	50	0,9774	1,0329	0,0014
	70	0,9593	0,9817	0,0015
GAB	30	0,9996	0,9954	0,0002
	50	0,9634	1,0568	0,0024
	70	0,9135	-14,367	0,9549

Fonte: Autores, 2019.

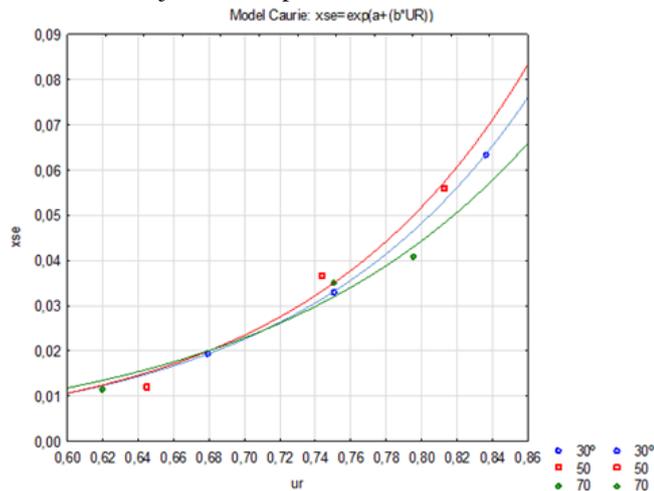
Na Tabela 6 observa-se que todas as modelagens foram adequadas, pois nos gráficos de dispersão foi verificado que os dados se apresentaram na forma de uma reta coincidente com a diagonal e os valores de R² foram muito próximos da unidade, com exceção dos dados a 70°C ajustados pelo modelo de GAB. Entretanto, os resultados mostram que o modelo de Caurie foi o que representou o processo de modo mais adequado dentre os modelos investigados. Os gráficos referentes a este modelo são mostrados nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 - Dados Observados vs Dados Preditos pelo modelo de Caurie a 30°C, 50°C e 70°C.



Fonte: AUTORES, 2019.

Figura 3 - Curvas de ajuste feitas pelo modelo de Caurie a 30°C, 50°C e 70°C.

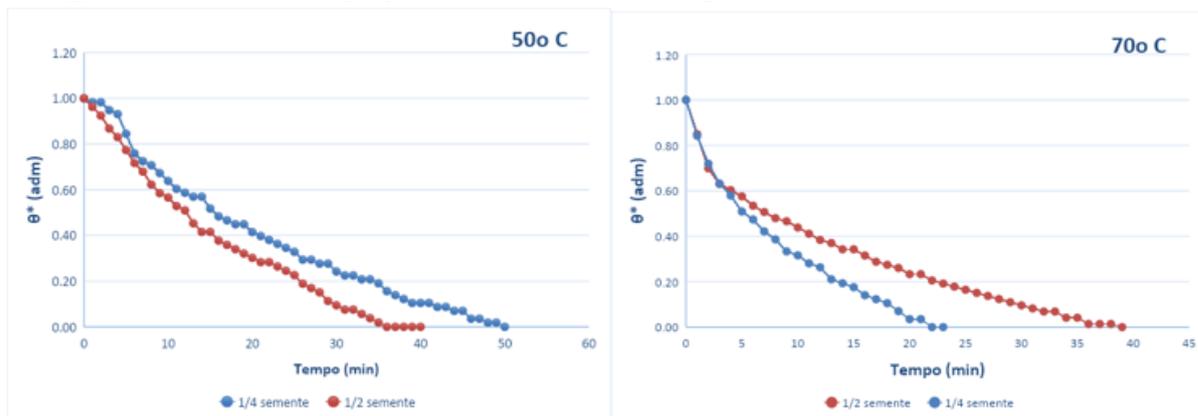


Fonte: AUTORES, 2019.

A Figura 2 mostra os ajustes feitos pelo modelo que melhor descreveu o processo de determinação de umidade de equilíbrio nas temperaturas estudadas, revelando que a 30°C os resultados foram mais condizentes com a linha de tendência estimada para eles. No que diz respeito à cinética de secagem das sementes do chichá, a metodologia adotada forneceu os

dados suficientes para a construção dos isoterma de dessorção correspondentes às temperaturas de 50°C e 70°C, apresentadas nas Figura 3. Os gráficos trazem o tempo como variável independente e a razão de umidade, como a variável dependente.

Figura 4 - Isotermas de sorção para avaliar a cinética de secagem das sementes do chichá a 50°C e 70°C.

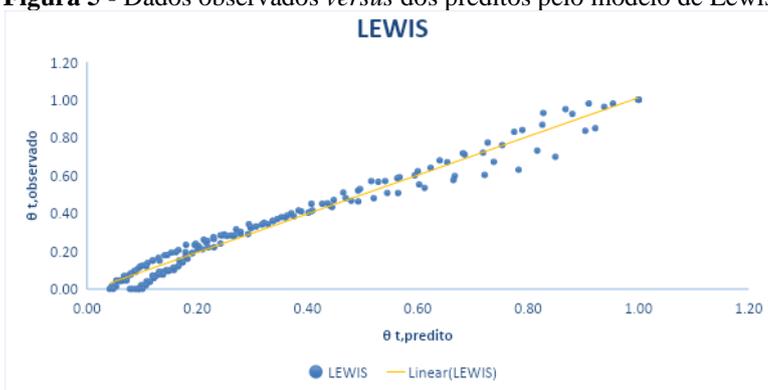


Fonte: AUTORES, 2019.

De acordo com as isotermas de dessorção apresentadas, pode-se observar que as amostras submetidas à secagem a 50°C demoraram mais tempo para atingir uma massa considerada constante, comparando às submetidas a secagem a 70°C. Além disso, a diferença no tamanho das amostras foi mais relevante na secagem com a temperatura maior, uma vez que as amostras particionadas em 1/4 do seu tamanho, com um diâmetro médio de 0,437cm ($\pm 0,0428$) levaram, aproximadamente, metade do tempo que as sementes particionadas ao meio para atingir o equilíbrio.

As isotermas da Figura 4 revelam apenas as zonas de adaptação da matéria-prima e de secagem a uma taxa constante, suprimindo as etapas correspondentes à umidade crítica (a partir da taxa decrescente até a umidade de equilíbrio). Após as análises das isotermas, partiu-se direto para a modelagem matemática da cinética de secagem das sementes. Os modelos que forneceram um melhor resultado no tratamento dos dados foram o de Lewis, o de Henderson and Pabis e o Logarithmic, cujos ajustes terão seus resultados apresentados logo a seguir.

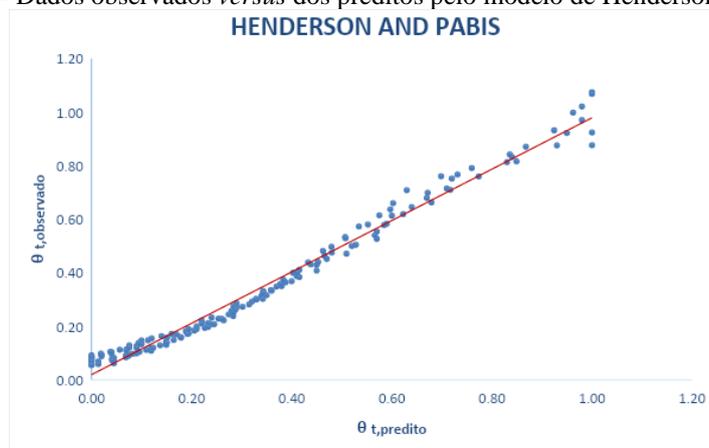
Figura 5 - Dados observados *versus* dos preditos pelo modelo de Lewis.



Fonte: AUTORES, 2021.

Analisando os valores do coeficiente, na Figura 5, podemos ver que o ajuste realizado pelo modelo de Lewis não apresentou um bom desempenho, tendo em vista que o valor deste parâmetro ficou relativamente distante da unidade. O gráfico construído na Figura 5 com todos os dados observados e simulados pelo modelo de Lewis no forneceu um $R^2=0,9728$ e coeficientes angular e linear, respectivamente, de 1,022 e 0,0116.

Figura 6 - Dados observados *versus* dos preditos pelo modelo de Henderson and Pabis.



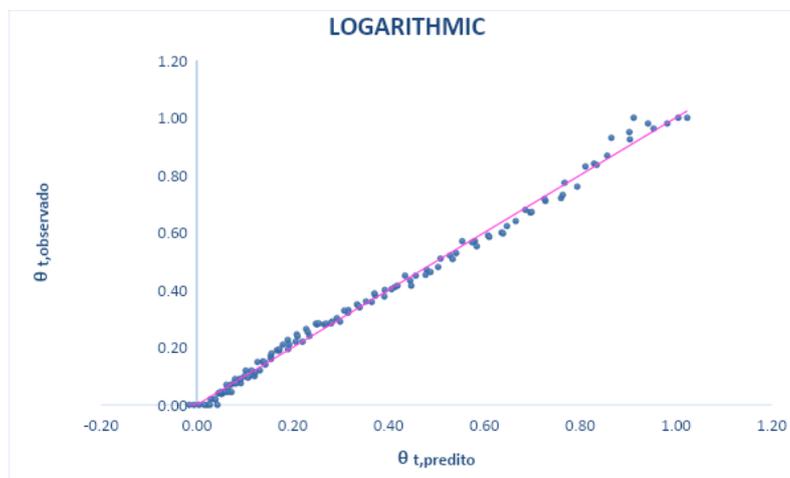
Fonte: AUTORES, 2019.

De modo geral, os resultados do coeficiente de determinação para Henderson and Pabis não foram muito satisfatórios. A Figura 6 mostra a curva traçada com todos os dados obtidos experimentalmente, com os diferentes tamanhos médios e temperaturas estudadas *versus* os preditos pelo modelo de Henderson and Pabis. O ajuste feito por esse modelo forneceu dados mais confiáveis e coerentes com o que foi observado analiticamente com os experimentos, se comparado ao modelo de Lewis.

Esta afirmação se baseia no fato de o coeficiente de determinação $R^2=0,9832$, é um valor mais próximo da unidade comparado ao modelo de Lewis. Podemos ver o

comportamento de todos os dados observados, nos diferentes diâmetros médios e temperaturas, *versus* os preditos pelo modelo Logarithmic na Figura 7.

Figura 7 - Dados observados *versus* dos preditos pelo modelo de Logarithmic.

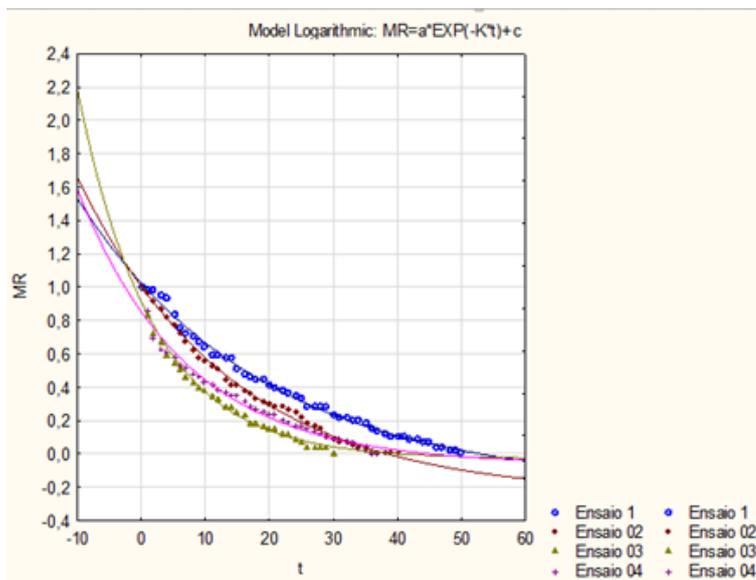


Fonte: AUTORES, 2019.

Diferente do que acontece nos modelos anteriores, o coeficiente de determinação R^2 apresenta valores bem mais próximos da unidade, sendo dois deles, correspondentes ao primeiro e ao segundo ensaio, os que possuem os maiores valores para esse parâmetro entre todos os modelos. Além disso, os valores dos coeficientes angulares e lineares de todas as retas de ajuste foram iguais a 1 e a 0, respectivamente, o que indica que elas coincidem com a diagonal principal do próprio gráfico, na qual os valores do eixo y se igualam ao seu correspondente no eixo x.

O gráfico da Figura 7 mostra que os dados ajustados pelo modelo Logarithmic seguem uma linha de tendência que coincide com a diagonal do gráfico, apresentando os coeficientes R^2 , linear e angular iguais, respectivamente, a 0,9943, 0,0000 e 1,0000, se consolidando como o melhor resultado entre os modelos avaliados neste trabalho. Este resultado já era esperado, pois o modelo Logarithmic possui um maior número de parâmetros em sua equação, se comparado aos dois anteriores, e podemos verificar os ajustes feitos por este modelo através da Figura 8.

Figura 8 - Ajustes matemáticos feitos pelo modelo Logarithmic.



Fonte: AUTORES, 2019.

A Tabela 7 mostra os parâmetros ajustados pelos três modelos utilizados para cada um dos ensaios experimentais.

Tabela 7 - Parâmetros dos modelos ajustados avaliados em função da temperatura.

ENSAIO	LEWIS	HENDERSON AND PABIS		LOGARITHMIC		
	K	K	A	K	A	C
01	0,047316	0,050964	1,073685	0,034952	1,213773	-0,19007
02	0,063877	0,068226	1,06787	0,041930	1,255335	-0,250286
03	0,101356	0,093120	0,923618	0,085556	0,9411330	-0,029263*
04	0,081748	0,070923	0,875876	0,05894	0,915692	-0,06382*

*Parâmetros não significativos

Fonte: AUTORES, 2019.

Analisando as constantes de secagem (K), vemos que houve uma certa variação de valores entre os modelos, representando a diferença nos métodos utilizados por cada um deles. Por outro lado, olhando para os quatro ensaios, percebe-se que a variação da constante de secagem foi bastante significativa entre eles também. O ensaio de número 03, realizado com as sementes particionadas em 1/4 do seu tamanho e temperatura de 70°C, apresentou os maiores valores para a constante de secagem em todos os modelos, chegando a dobrar de valor quando comparado ao ensaio de número 01 no ajuste feito pelo modelo de Lewis. O aumento da temperatura de operação teve mais influência em K do que a diminuição do tamanho médio das sementes, tendo como base a diferença entre o valor da constante de

secagem do ensaio 03 e os ensaios de número 01 (1/4 de semente e 50°C) e de número 02 (1/2 de semente e 70°).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, pode-se observar que o modelo de Lewis não apresentou os ajustes mais satisfatórios para os dados da cinética de secagem das sementes de chichá. Na etapa de secagem, os modelos que apresentaram resultados mais adequados nos ajustes aos dados experimentais foram o de Caurie e GAB. Além disso, para a isoterma na temperatura de 30°C, do modelo de Caurie, os resultados foram mais condizentes com a linha de tendência estimada. A diferença no tamanho das amostras foi mais relevante na etapa de secagem a com a maior temperatura. Os resultados do coeficiente de determinação para Henderson and Pabis não foram muito satisfatórios para o trabalho. Ademais, as sementes particionadas em 1/4 do seu tamanho e temperatura de 70°C, apresentaram os maiores valores para a constante de secagem em todos os modelos. Ademais, o trabalho proporcionou um estudo satisfatório sobre as melhores condições de temperatura e tamanho da amostra para a secagem e um posterior processo de extração de forma mais eficaz.

REFERÊNCIAS

- CHAVES, M. H.; BARBOSA, A. S.; MOITA, J. M.; PIMENTEL, S. A.; LAGO, J. H. G. 2004. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO ÓLEO DA AMÊNDOA DE *Sterculia striata* ST. HIL. ET NAUD. **Quim. Nova**, Vol. 27, No. 3, 404-408, 2004.
- GOMES, J.C.; PEITER, A.S.; PIMENTEL, W.R.O.; SOLETTI, J.I.; CARVALHO, S.H.V.; MEILI, L. Biodiesel production from *Sterculia striata* oil by ethyl transesterification method. **Industrial Crops and Products** 74 (2015) 767–772.
- GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standard*, n.81, p. 89–96, 1977.
- SECCHI, A. R. **Modelagem e Simulação de Processos**. 1995. 199f. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SILVA, B. G. Modelagem e simulação do processo de secagem dos frutos de Aroeira-vermelha (*Schinus terebinthifolius Raddi*). 2013. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA, Campinas – SP.
- TONELLO, T. U.; TONELLO, A. P.; LOZANO, C. S.; SILVA, D. M.; BORGHI, D. F. 2013. **Condições de umidade em diferentes temperaturas no processo de secagem da soja - PR**. VIII EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar. Editora CESUMAR. Maringá – Paraná – Brasil.