



MODELAGEM COM DIFUSIVIDADE EFETIVA VIA ANALOGIA DA LEI DE FICK NO PROCESSO DE SECAGEM DE SOJA

LUAN C. M. MAROSTEGAN¹, GUSTAVO D. MAIA², FABIO B. FREIRE², JOSÉ TEIXEIRA
FREIRE², MARCOS P. FELIZARDO^{3*}

¹ Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Engenharia

² Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química, Campus São Carlos

³Instituto Federal de Minas Gerais, Departamento de Mecânica, Campus Congonhas

*e-mail: marcos.felizardo@ifmg.edu.br

RESUMO - A secagem é uma operação unitária que viabiliza a retirada da umidade, prolongando o tempo de vida dos materiais. Por sua vez, modelos difusivos possibilitam prever a resistência à transferência de água dentro da matriz porosa à medida que as variáveis deste processo se alteram. Assim, por este trabalho se objetiva avaliar a cinética de secagem em leito fixo de grãos de soja do cultivar *Glycine max* (L.) Merrill, de modo a observar a variação do parâmetro difusivo durante esta operação. Para tal, foram levantados dados cinéticos correspondente a secagem deste grão em camada delgada na literatura; desenvolvidos os modelos e obtidas as difusividades efetivas constante e variável, sendo este segundo calculado por meio do método de ajustes sequenciais da solução analítica para a analogia da Lei de Fick da difusão, considerando resistência externa desprezível e geometria esférica. Os resultados demonstram que houve melhor ajuste estatístico do modelo, bem como das previsões fenomenológicas de transferência de massa durante a secagem para o parâmetro variável, obtendo uma previsão da energia de ativação de secagem ao longo do processo. Assim, demonstrou-se que a metodologia dos ajustes sequenciais é relevante para desenvolvimento do modelo de geometria utilizada neste trabalho.

INTRODUÇÃO

No Brasil, a soja começou a despertar interesse do governo e dos produtores agrícolas no final da década de 60, devido principalmente a dois fatores: surgia como uma opção de cultura na época do verão no sul do país e a demanda de subprodutos utilizado para a nutrição de aves e suínos. Já na década de 70, ocorreu um aumento no preço da soja, incentivando a expansão da produção pelo país através de pesquisas realizadas pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) em busca de tecnologias que permitissem a adaptação da cultura às condições brasileiras (MIRANDA, 2010).

Recentemente, em seu sétimo levantamento da safra de grãos 2020/2021, a Companhia Nacional de Abastecimento

(CONAB), confirma um acréscimo de área para plantio de soja em 4,1%, em comparação à safra anterior, chegando há 38,5 milhões de hectares destinados a esta cultura (CONAB, 2021).

Ainda neste documento, a CONAB estimou que a produção de soja para a safra 2020/2021 seja de 135,54 milhões de toneladas, o significa um aumento de 8,6% também em relação à safra anterior. A companhia relatou que esse aumento de produção é motivado pela alta dos preços internacionais, a forte demanda exportadora e aumento da demanda interna (CONAB, 2021).

Assim, o agronegócio se estabelece como base econômica tanto a nível nacional, como em importantes regiões para o setor. Neste cenário, Mato Grosso se destaca com grande relevância, sendo o agronegócio responsável por 50,5% do PIB estadual, com crescimento em mais de 100% na última década para a

produção de grãos, com destaque à soja. (LOURENÃ *et al.*, 2020).

Esta alta produtividade se dá diretamente por fatores como ampla extensão de terras disponíveis para o plantio, o número de propriedades com tamanho acima da média nacional e a adoção de tecnologia agrícola avançada associada às boas condições climáticas, possibilitando que, conforme estimativa para o ano de 2028, a produção de soja e milho somem 102,9 milhões de toneladas (LOURENÃ *et al.*, 2020).

No entanto, Leitão *et al.* (2020) mencionam o fato de que no Brasil 20% da produção anual de grãos seja perdida entre a colheita e o armazenamento. Segundo os autores, no que se refere ao armazenamento, as perdas podem chegar aproximadamente a 15%, causados por diversos fatores, como: pragas, qualidade dos grãos ou pelas instalações físicas das unidades armazenadoras que se encontram recorrentemente em péssima qualidade.

A secagem se apresenta, neste caso, como uma operação unitária que viabiliza a retirada de determinada quantidade de água destes grãos, evitando processos de deterioração química e microbiana, bem como a redução de seu peso e volume, o que propicia melhor armazenamento e diminuição dos custos relacionados a transporte (BARROZO *et al.*, 2014; DOTTO *et al.*, 2018; RUIVO, 2018).

Assim sendo, alguns aspectos fundamentais podem ser abordados a respeito da secagem. A partir da perspectiva de modelos difusivos, por exemplo, é possível prever o quanto há de resistência à remoção de água de um processo de secagem e o como isso se relaciona com as condições de operação, como o conteúdo de umidade e temperatura (ERBAY e ICIER, 2010; DOTTO *et al.*, 2018; RUIVO, 2018).

Por isso, objetivou-se através desse trabalho, avaliar a difusividade efetiva variável em comparação à difusividade efetiva constante para a secagem de grãos de soja, verificando as predições quanto aos fenômenos decorrentes de ambos os modelos desenvolvidos, a geometria selecionada e os efeitos de temperatura e umidade de ar nesta avaliação.

METODOLOGIA

No presente trabalho foram avaliados os métodos para obtenção da difusividade efetiva variável no processo de secagem da soja. Os dados para a cinética foram avaliados a partir de procedimentos observados na literatura que tenham ocorrido nestas condições.

Para a revisão, as bases de dados utilizadas para a recursão na literatura foram as seguintes: *ScienceDirect*, *Google Scholar* e do jornal científico, *Drying Technology*. As buscas foram selecionadas a partir da utilização dos descritores “*soybean drying*”, “*soybean drying kinetics*”, “*thin layer*”, “*thin bed*” e “*fluidized bed*”, com a utilização dos booleanos “AND” e “ANDNOT” para pesquisas que avaliavam a secagem por microondas (termo da pesquisa descartado: “*microwave*”). Foram realizadas as pesquisas dos termos nos idiomas português e inglês e houve restrição à seleção temporal em dez anos, uma vez que os resultados para esta seleção se apresentavam mais próximos do escopo procedimental deste trabalho.

Neste sentido, a referência selecionada para prosseguimento da metodologia foi a de Barrozo *et al.* (2006) intitulado “*The use of the orthogonal collocation method on the study of the drying kinetics of soybean seeds*”. Neste trabalho, portanto, os autores avaliaram a secagem de soja do cultivar *Glycine max* (L.) Merrill, sob as seguintes condições demonstradas na Tabela 1.

Tabela 1: Condições experimentais para obtenção de secagem na referência selecionada.

Dado	Barrozo <i>et al.</i> (2006)
Diâmetro do grão	$6,0 \times 10^{-3}$ m
Umidade inicial do grão	Parâmetro não controlado
Velocidade do ar	0,33 – 1,75 m·s ⁻¹
Temperaturas avaliadas	31,5 – 50°C
Umidade Relativa do ar	12 – 51%

A seguir, na Figura 1, é apresentado a cinética levantada no trabalho de Barrozo *et al.* (2006). Os dados discretizado foram obtidos, por sua vez, por intermédio do *software* GetData Graph Digitizer[®], utilizado para digitalização de gráficos e plotagens.

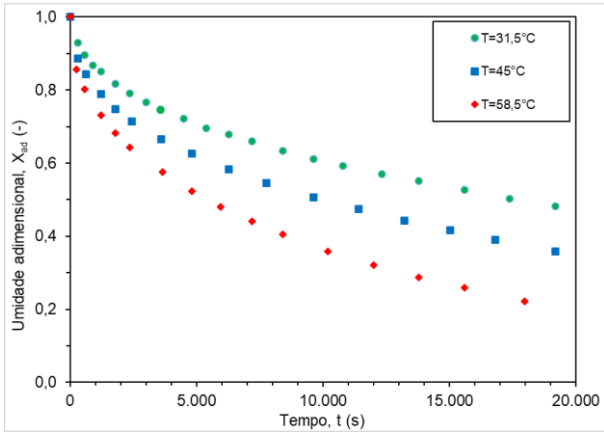


Figura 1: Cinética de secagem de grãos de soja

Método proposto para difusividade constante

Pelo processo da secagem avaliada pelos autores Barrozo *et al.* (2006) ocorrer em camada delgada, pode-se considerar que as sementes se dispõem como uma placa plana infinita e isotrópica, com propriedades constantes em sua espessura, incluindo a difusividade efetiva da umidade (D_{eff}), valendo a variação do fluxo da massa com o tempo por um regime, conforme analogia a segunda Lei de Fick, expresso na Equação 1 (CRANK, 1975):

$$-\frac{\partial J_{A,z}}{\partial z} = \frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \quad (1)$$

Apesar dos autores avaliarem o método para a semente com uma geometria de placa plana, deve-se enfatizar que a afirmação expressa matematicamente por eles é consistente para qualquer meio isotrópico, cuja estrutura e as propriedades de difusão na vizinhança de qualquer ponto são as mesmas em relação a todas as direções (CRANK, 1975). Por causa desta simetria, o fluxo de substância em difusão em qualquer ponto é, ao longo da normal à superfície de concentração, constante através do ponto independentemente da geometria avaliada e, por tanto, vale igualmente para a geometria selecionada para a soja no trabalho de Barrozo *et al.* (2006).

Então, Crank (1975) descreve as condições de contorno em termos das coordenadas esféricas, conforme as equações que seguem nas Equações 2 a 5.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{D_{eff}}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \right] \quad (2)$$

Em que, fazendo alusão a Equação 1, a concentração C_A trata-se da própria umidade X ao longo da coordenada radial r (m); t é o tempo (s) e D_{eff} , a difusividade efetiva ($m^2 \cdot s^{-1}$).

$$X = X_0, t = 0, 0 \leq r \leq R \quad (3)$$

$$\frac{\partial X}{\partial r} = 0, r = 0, t > 0 \quad (4)$$

$$X = X^*, r = R, t > 0 \quad (5)$$

E as condições de contorno, que seguem (CRANK, 1975; IRIGOYEN e GINER, 2017):

Em que X_0 é o conteúdo de umidade inicial em $[kg \text{ de água}] \times [kg \text{ de sólido seco}]^{-1}$ e R o raio do grão (em m).

Um conteúdo de umidade uniforme foi assumido como condição inicial, conforme visto na Equação 3. Quanto à geometria da partícula, uma condição de contorno de simetria foi definida de acordo com a Equação 4 e, finalmente, a condição de contorno da Equação 5 foi tomada a partir da consideração da transferência de massa convectiva instantânea.

Então, a razão média da umidade adimensional (X_{ad}) no sólido é obtida conforme a relação descrita por Crank (1975), através de uma função no tempo, conforme a Equação 6:

$$X_{ad}(t) = \frac{\bar{X}(t) - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-n^2 \pi^2 \left(\frac{D_{eff} t}{R^2} \right) \right] \quad (6)$$

Em que a $(\bar{X}(t))$ trata-se da umidade no material no instante t e n um integrador positivo. Sobre este termo, segundo Efremov & Kudra (2004), utilizando uma quantidade de termos igual a 20, existe um erro de aproximadamente 1% e aumentando o número pode-se ainda obter uma maior acurácia nos resultados.

Método proposto para difusividade variável

Conforme Felizardo *et al.* (2021), para estimar a difusividade efetiva sendo variável durante a secagem, a Equação 6 foi ajustada sequencialmente aos dados experimentais de cinética de secagem, como mostrado na Figura 2. O método consiste em utilizar três diferentes tempos de secagem dispostos sequencialmente, sendo que para o tempo inicial ($t = 0$ s) foi assumido que $D_{eff}(t = 0 \text{ s}) = 0 \text{ m}^2/\text{s}$, haja visto que neste instante de t o processo de secagem ainda não havia começado, bem como o tempo final t_f (dependente da cinética), em que $D_{eff}(t = t_f) = 0 \text{ m}^2/\text{s}$, pois o processo difusivo finalizou.



Figura 2: Esboço do método proposto de ajustes sequenciais

Então, a partir dos ajustes sequenciais, foi obtida uma matriz $3 \times K$ de difusividades efetivas com parâmetro constante. O valor preenche a matriz, conforme demonstrado anteriormente e esse processo é realizado sucessivamente até que a matriz seja completa.

Nessa matriz, as médias aritméticas das colunas foram realizadas para cada linha, obtendo-se uma matriz correspondente para as K observações, representando a difusividade efetiva variando com efeito da umidade.

Energia de ativação variável

Se para a mesma umidade considerarmos que a difusividade efetiva depende da temperatura, então pode-se fazer uma analogia a Lei de Arrhenius que fornece através do ajuste linear a energia de ativação de secagem (E_a), conforme Equação 7.

$$\ln(D_{eff}) = \ln(A) - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (7)$$

Modelos estatísticos utilizados

Assim como o desenvolvimento para o cálculo da difusividade variável proposto por Felizardo *et al.* (2021), foram também avaliados os ajustes dos modelos matemáticos pelo método de mínimos quadrados para ajuste de funções não-lineares, para tanto utilizou-se a função MatLab® nlinfit (R2016a, Mathworks). Os resíduos (δ), observados entre as umidades

obtidas das cinéticas de secagem e dos estimados a partir do modelo desenvolvido, foram calculados por meio da Equação 8:

$$\delta(t) = X_{obs}(t) - X_{est}(t) \quad (8)$$

A análise gráfica destes resíduos em relação ao tempo foi utilizada para verificar as tendências de adaptação ao longo do processo de secagem, estimando o erro do modelo. Assim, para indicar que não há problemas da homogeneidade dos resíduos, eles devem ter uma distribuição aleatória (Wackerly *et al.*, 2014; Akkoyunlu *et al.*, 2020)

Por sua vez, usando o coeficiente de determinação (R^2) e o teste do qui-quadrado (χ^2), a qualidade do ajuste foi avaliado para os K termos observados e P parâmetros ajustados. Sendo que, quanto melhor o ajuste, mais próximo será o coeficiente de determinação de um e menor será o valor do qui-quadrado (Perazzini *et al.*, 2013; Rocha *et al.*, 2020). O coeficiente e o teste são calculados conforme as Equações 9 e 10, a seguir:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^K \delta_i^2}{\sum_1^K (x_i - \bar{X})^2} \quad (9)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_1^K \delta_i^2}{K-P} \quad (10)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Método proposto para difusividade constante

Para a consideração da difusividade efetiva constante, a Equação 6 foi ajustada aos dados experimentais da cinética de secagem obtidas de Barrozo *et al.* (2006). Foi, portanto, levando em conta a análise estatística para estabelecer a quantidade de termos da série de forma a maximizar o R^2 e minimizar o χ^2 .

Desse modo, não foi variado a quantidade dos n termos, o mantendo em máximo valor de 20 e, assim, garantindo um erro mínimo e aproximado de 1% para o conjunto de dados fornecidos. O valor fixo de termos foi justificado de modo a garantir o mesmo tratamento dos dados obtidos por Felizardo *et al.* (2021), evitando desvios quanto a comparação.

O ajuste pode ser observado, por meio dos valores de D_{eff} e dos parâmetros estatísticos,

R^2 e χ^2 , correspondentes, conforme seguem nas Figura 3, Figura 4 e Figura 5.

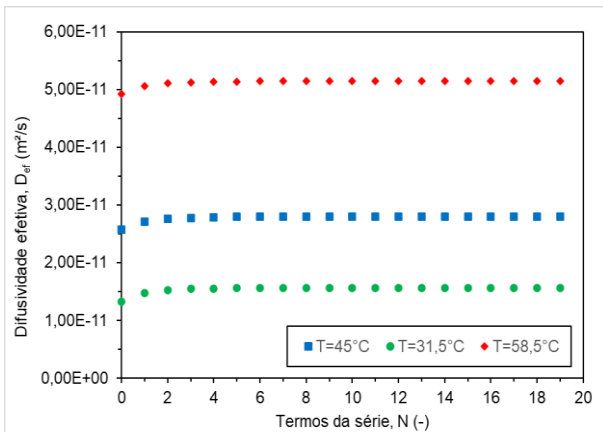


Figura 3: Valores da difusividade efetiva constante no tempo obtido para cada termo N do modelo

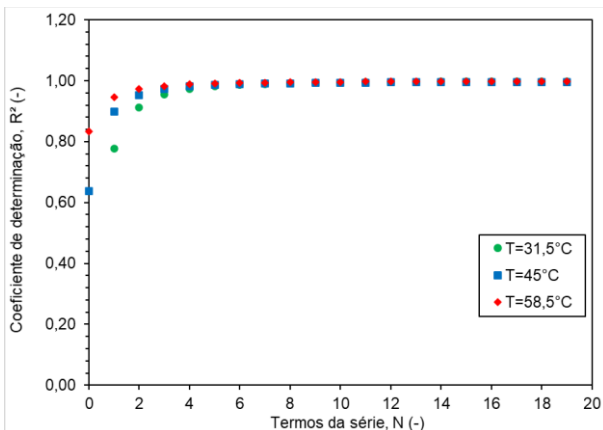


Figura 4: Valores do coeficiente de determinação R^2 obtido para cada termo N do modelo

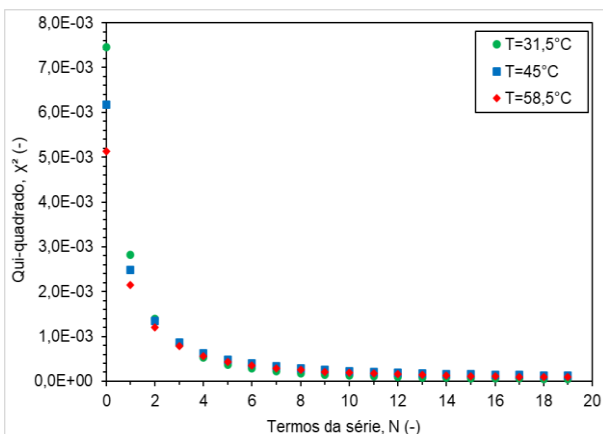


Figura 5: Teste qui-quadrado χ^2 obtido para cada termo N do modelo

Ressalta-se que o modelo proposto leva em conta que o meio seja isotrópico e que, portanto, suas propriedades sejam constantes

(efeito de simetria), além de considerar que as resistências externas são desprezíveis, o que não se confirma na prática do processo de secagem.

Assim, conforme especificado, estes modelos são tidos como bem ajustados restritamente às seguintes observações: quando simultaneamente conseguem apresentar uma quantidade de variabilidade dos dados bem descrita através do R^2 e quando possui mínima divergência entre as frequências observadas e esperadas por evento do modelo, através do χ^2 (Sperandio *et al.*, 2003).

Os parâmetros obtidos ao final dos ajustes seguem relacionados na Tabela 2 para cada temperatura avaliada por Barrozo *et al.* (2006):

Tabela 2: Parâmetros para avaliação do modelo com difusividade efetiva constante, considerando efeito de simetria e $Bim \ll 1$

Parâmetros	Temperaturas		
	31,5°C	45°C	58,5°C
$D_{ef}(m^2/s)$	$1,57 \cdot 10^{-11}$	$2,8 \cdot 10^{-11}$	$5,15 \cdot 10^{-11}$
R^2	0,998	0,997	0,998
χ^2	$4,71 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$1,90 \cdot 10^{-5}$

Segundo Felizardo (2014), especifica que para o teste qui-quadrado valores abaixo de 0,1 são considerados adequados. Consonante a isso e aos demais valores descritos, o modelo proposto é, do ponto de vista do parâmetro, capaz de reproduzir de maneira satisfatória os dados.

No que concerne ao ajuste teórico do modelo da cinética de secagem, o valor obtido não é capaz de descrever com precisão o fenômeno. Do contrário, seria mais útil que previsões empíricas fossem utilizadas. Os fenômenos, neste caso, são observados em relação as conformidades plausíveis estabelecidas do modelo desenvolvido. Por sua vez, estes ajustes estão relacionados na Figura 6.

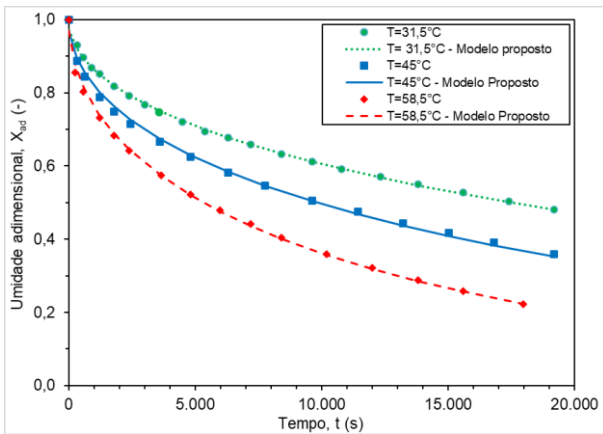


Figura 6: Ajuste do modelo de secagem ao modelo proposto difusividade efetiva constante, considerando efeito de simetria e $Bim \ll 1$

Observa-se que para os tempos anteriores a 10.000 segundos, os valores do modelo proposto subestimam os pontos discretizados, verificando que a umidade no meio poroso é maior que a prevista num dado tempo. Isso sugere que o mecanismo de difusão na matriz porosa no início do processo de secagem possui maior conteúdo de umidade fazendo com que a difusividade da fase livre seja maior até esse instante, mas que na prática existe uma maior resistência ao transporte (sujeita a contribuições da resistência externa). Nestes termos, entende-se que a difusividade efetiva varia durante o processo de secagem, conforme será discorrido a seguir.

Método proposto para difusividade variável

Conforme levantado ao final do tópico anterior, o mecanismo de difusão na matriz porosa no início do processo de secagem possui maior conteúdo de umidade fazendo com que a difusividade da fase livre seja maior até um determinado instante em que o processo passa à uma condição de menor umidade no sólido, aumentando os efeitos da resistência ao transporte de massa. Neste instante, por sua vez, a secagem torna-se mais lenta.

Portanto, nesta região de menores umidades, o mecanismo interno de resistência a transferência de massa passa a controlar também os efeitos da difusividade efetiva. Baseado nesta análise, pode-se afirmar que a hipótese de difusividade variável explica melhor a cinética de secagem, pois é capaz de fornecer uma melhor aproximação a todos os

fenômenos de transferência de massa durante o processo de secagem.

A difusividade em função da umidade da soja conforme os dados disponíveis estão relacionados na Figura 7.

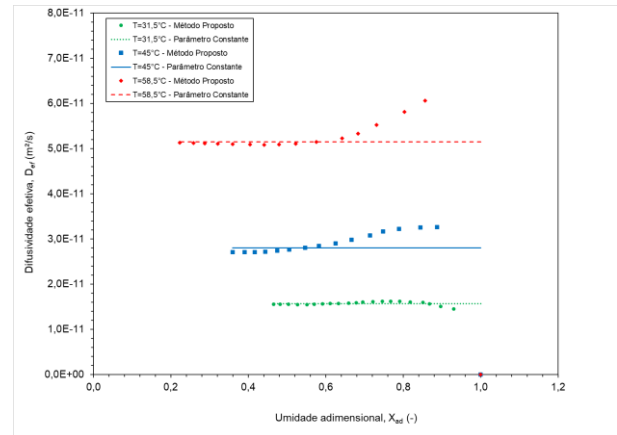


Figura 7: Comparação da difusividade efetiva avaliada como parâmetro constante em função das umidades

A difusividade obtida para esta ocasião respeitou o proposto por Pickles (2003), que diz que conforme o filme líquido que recobre o sólido se reduz, os efeitos dos poros passam a predominar e a transferência de massa sofre mais influência dos efeitos difusivos ao invés dos convectivos, fazendo com que o regime transiente passe à pseudo-estacionário em torno da difusividade constante.

Analisando os dados é possível dizer que espera-se aleatoriedade nos resíduos observados, pois quanto maior a interferência dos efeitos convectivos na secagem, menor a precisão do modelo que foi baseado na predominância de mecanismos difusivos. Assim, é possível observar esse efeito na amplitude dos resíduos que ocorrem em umidades mais altas e para a descrição do modelo com difusividade como parâmetro constante, por negligenciar os efeitos da umidade ao longo do processo de secagem. Estas inferências podem ser feitas a partir da Figura 8 em que estão relacionados os resíduos em termos da umidade, para ambos os modelos avaliados.

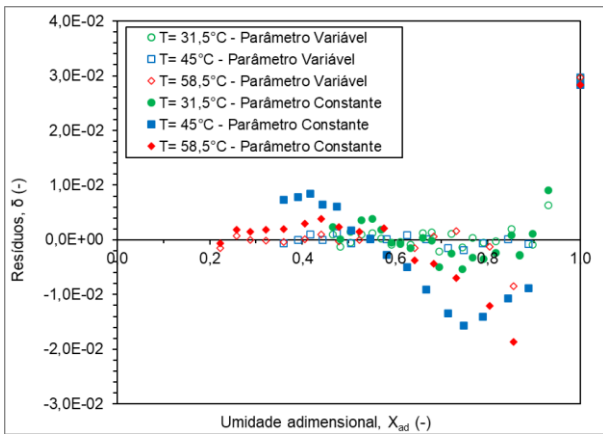


Figura 8: Comparação da difusividade efetiva avaliada como parâmetro constante e variável em função dos resíduos das umidades

Deste modo, conforme especificado, sob perspectiva de análise dos ajustes dos dados, os parâmetros estatísticos, R^2 e χ^2 , correspondentes aos dados levantados a partir de Barrozo *et al.* (2006), seguem organizados na Tabela 3:

Tabela 3: Parâmetros para avaliação do modelo com difusividade efetiva variável, considerando efeito de simetria e $Bim \ll 1$

Parâmetros	Temperaturas		
	31,5°C	45°C	58,5°C
R^2	0,998	0,998	0,999
χ^2	$4,53 \cdot 10^{-5}$	$5,93 \cdot 10^{-5}$	$6,44 \cdot 10^{-5}$

Em comparação aos parâmetros da Tabela 2, pôde-se observar que houve melhora significativa para os parâmetros R^2 e χ^2 , isto é, $R^2 \approx 1$ e $\chi^2 \ll 0,1$, conforme fornecido por Felizardo (2014). Os valores obtidos para qui-quadrado demonstraram-se maiores à medida que as temperaturas aumentaram e isso o pode estar relacionado com uma cinética de secagem mais rápida, devido aos efeitos da difusividade efetiva que são maiores à medida que a temperatura aumenta. Assim, é possível considerar os valores obtidos como adequados.

Por fim, é possível constatar que à medida que a temperatura do ar de secagem aumenta, a saturação de água do ar diminui, fazendo com que as moléculas de água presente na soja, neste caso, migrem da fase líquida para fase vapor até que esta taxa se iguale no gás de secagem. Por sua vez o ar úmido, estará em equilíbrio com a fase líquida de modo a absorvê-la até determinado limite.

Dessa forma é que possível afirmar que a difusividade efetiva é maior conforme a temperatura também é maior, elevando o ponto de saturação do ar e propiciando um gradiente de concentração – força motriz da transferência de massa. Esta relação se mostrou plausível entre as temperaturas observadas no trabalho Felizardo *et al.* (2021), e podem ser verificadas a seguir, na Figura 9.

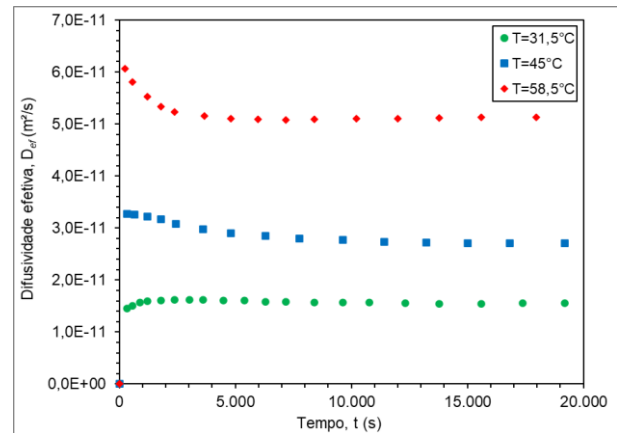


Figura 9: Comparação entre as difusividades efetivas variáveis em função do tempo

Assim, conforme tratado por Khatchourian (2012) para soja e Albini (2015) para a cevada, a difusividade efetiva pode variar também à medida que a umidade inicial do sólido varia, uma vez que dado valor de umidade menor implicará diretamente numa menor resistência a transferência.

Assim, na Figura 10 pode-se observar o segundo período de queda da taxa, controlada pela difusão líquida interna ao sólido. A secagem de grãos normalmente segue o padrão de rápida diminuição inicial na umidade seguido por uma progressiva taxa decrescente. Analogamente, as taxas de secagem serão maiores para maiores temperaturas, em que o efeito da difusividade efetiva é também maior.

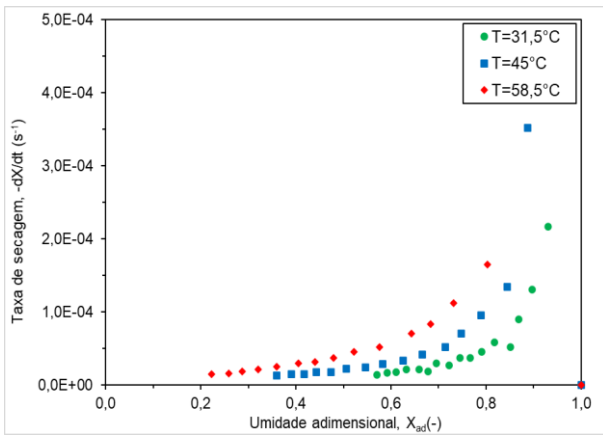


Figura 10: Comparação da taxa de secagem em relação ao conteúdo de umidade

Na Figura 11 apresenta-se os dados de energia de ativação de secagem em função do da umidade adimensional.

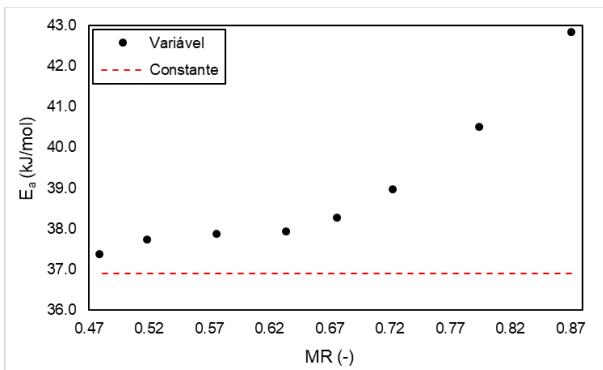


Figura 11: Energia de ativação em função do adimensional de umidade.

Pela Figura 11 nota-se, que a partir de $MR > 0,62$ tem-se um aumento significativo da energia de ativação, este mesmo período está associado a região da fase líquida disposto na Figura 7. Para $MR > 0,592$, $MR > 0,546$ e $MR > 0,575$ inicia-se os aumentos das difusividades que correspondem a difusividade do filme líquido para as temperaturas de $31,5^{\circ}\text{C}$, 45°C e $58,5^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Além disso, os valores de energia de ativação variáveis foram entre 37,39 e 42,84 kJ/mol, enquanto que para modelagem constante foi de 36,90 kJ/mol, valores dentro da faixa indicada por Marinos-Kouris e Maroulis (2015).

CONCLUSÕES

Assim, em virtude do que foi exposto, conclui-se que a difusividade efetiva variável frente a constante obteve melhores ajustes do

ponto de vista dos parâmetros estatísticos, o que indicou melhor aderência do modelo proposto aos dados fornecidos a partir da referência base deste trabalho, Barrozo *et al.* (2006).

A metodologia de Felizardo *et al.* (2021), neste caso, mostrou-se igualmente relevante para desenvolvimento do modelo com parâmetro variável. Tanto para a geometria plana estudada pelos autores, como para a esférica discutida neste trabalho. Houve melhor ajuste do ponto de vista estatístico do modelo, obtendo as mínimas de condição de ajuste para $R^2 = 0,998$ e $\chi^2 = 6,44 \cdot 10^{-5}$, bem como das predições dos fenômenos de transferência de massa durante a secagem.

Ainda em termos da predição feita a partir deste parâmetro variável, tem-se uma melhor representação dos fenômenos que ocorrem ao longo do processo de secagem, como a proeminência da difusividade para fase líquida em termos da umidade adimensional, da temperatura do ar de secagem ou para umidades iniciais do material sólido.

As fases de predominância da fase líquida e gasosa indicam uma variação nos valores de energia de ativação de secagem saindo de um valor constante de cerca de $(37,73 \pm 0,25)$ kJ/mol nas fases da fase vapor e chegando a 42,84 kJ/mol na fase líquida.

NOMENCLATURA

Bi_m	Biot mássico [-]
C_A	Concentração do soluto A [mol/m ³]
D_{ef}	Coefficiente efetivo de difusão/Difusividade efetiva [m ² /s]
E_a	Energia de ativação de secagem (kJ/mol)
$J_{(A,z)}$	Fluxo molar do soluto A em z [mol/s m ²]
N	Número de termos da série [-]
r	Coordenada radial [m]
R	Raio do grão [m]
R^2	Coefficiente de determinação [-]

X^*	Umidade de equilíbrio [kg/kg]
X_C	Umidade crítica [kg/kg]
X_0	Umidade inicial [kg/kg]
X_{ad}	Umidade adimensional [-]
X	Umidade em base seca [kg/kg]
δ	Resíduos [-]
χ^2	Teste qui-quadrado [-]

REFERÊNCIAS

- AKKOYUNLU, M. et al (2020), Using hybridized ANN-GA prediction method for DOE performed drying experiments. *Drying Technology*, v. 38, p. 1393-1399.
- ALBINI, G. (2015), Reumidificação, caracterização e secagem de grãos de cevada em leito fixo. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 86 p. (Dissertação de mestrado)
- BARROZO, M. A. S *et al.* (2014), Air-drying of seeds: a review. *Drying Technology*, v. 32, p. 1127-1141.
- BARROZO, M. A. S. *et al.* (2006). The use of the orthogonal collocation method on the study of the drying kinetics of soybean seeds. *Journal of Stored Products Research*, v. 42, p. 348-356.
- CONAB – Companhia Brasileira de Abastecimento. Acompanhamento safra brasileira de grãos – Safra 2020/21 (2021), Sétimo levantamento. Conab, Brasília.
- CRANK, J. (1975), *The mathematics of diffusion*. Oxford University Press, Oxford.
- DOTTO, G. L. *et al.* (2018), Evaluation of the mass transfer process on thin layer drying of papaya seeds from the perspective of diffusive models. *Heat and Mass Transfer*, v. 54, p. 463-471.
- EFREMOV, G.; KUDRA, T. (2004), Calculation of the effective diffusion coefficients by applying a quasi-stationary equation for drying kinetics. *Drying technology*, v. 22, p. 2273-2279;
- ERBAY, Z; ICIER, F. (2010), A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical reviews in food science and nutrition*, v. 50, p. 441-464.
- FELIZARDO, M. P. (2014), Caracterização física e de secagem de sementes de embaúba (*Cecropia glaziovii* Snethlage). Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 88 p. (Dissertação de mestrado).
- FELIZARDO, M. P. *et al.* (2021), Modeling drying kinetics of Jacaranda mimosifolia seeds with variable effective diffusivity via diffusion model. *Biosystems Engineering*, v. 205, p. 234-245.
- IRIGOYEN, R.M.T.; GINER, S. A. (2017), Modeling thin layer drying-roasting kinetics of soaked quinoa. Coupled mass and energy transfer. *Biosystems engineering*, v. 157, p. 99-108.
- KHATCHATOURIAN, O. A. (2012), Experimental study and mathematical model for soya bean drying in thin layer. *Biosystems engineering*, v. 113, p. 54-64.
- LEITÃO, F.O. *et al.* (2020), Mapeamento das perdas da armazenagem da soja: um estudo de caso em uma cooperativa de armazenagem de grãos. *Revista de Gestão e Organizações Cooperativas*, v. 7, p 114-129.
- LOURENÃ, V. S. *et al.* (2020), Capacity of grain storage and drying in the State of Mato Grosso. *Scientific Electronic Archives*, v. 13, p. 51-59.
- MARINOS-KOURIS, D., & MAROULIS, Z. B. (2015). Transport properties in the drying of solids. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of industrial drying* (4th ed., pp. 77e109). Boca Raton: CRC Press.
- MIRANDA, J. R. (2010), A produção, o consumo e o processamento da soja industrial no Brasil e no mundo. *In: MIRANDA, J. R. História da soja: a trajetória da soja na história da humanidade*. Komedi, Campinas.
- PERAZZINI, H. *et al.* (2013), Drying kinetics prediction of solid waste using semi-empirical and artificial neural network models. *Chemical Engineering & Technology*, v. 36, p. 1193-1201.
- PICKLES, C.A. (2003), Drying kinetics of nickeliferous limonitic laterite ores.

- Minerals Engineering, v. 16, p. 1327-1338.
- PICKLES, C.A. (2003), Drying kinetics of nickeliferous limonitic laterite ores. Minerals Engineering, v. 16, p. 1327-1338.
- ROCHA, J.C. *et al.* (2020), Effects of mass compaction on airflow resistance through paddy rice grains. Biosystems Engineering, v. 194, p. 28-39.
- RUIVO, T.D. (2018), Secagem de soja: determinação da difusividade e da porosidade do grão. Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 00p. (Dissertação de mestrado)
- SPERANDIO, D. *et al.* (2003), Cálculo numérico: características matemáticas. Pearson Prentice Hall, São Paulo
- WACKERLY, D.D. *et al.* (2014), Mathematical Statistics with Applications. Thomson Brooks/Cole, Belmont.