AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO FENÔMENO DA SECAGEM CONSIDERANDO O EFEITO DO ENCOLHIMENTO

THAÍS ALVES BARBOSA[1], FRAN SÉRGIO LOBATO[2*], EDU BARBOSA ARRUDA[3]

[1]Instituto Federal Goiano, [2]Universidade Federal de Uberlândia, [3]Universidade Federal do Triângulo Mineiro, *e-mail: fslobato@ufu.br

RESUMO - Tradicionalmente, durante a operação de secagem o efeito do encolhimento é negligenciado nos balanços de massa e energia. Tal hipótese simplifica e muito o modelo matemático, facilitando a sua avaliação numérica. Todavia, deixa de considerar o efeito do encolhimento nos perfis obtidos. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo estudar o transporte de calor e de umidade durante a secagem do tomate considerando o efeito do encolhimento em um sistema transiente e unidimensional. Matematicamente, este fenômeno é descrito por duas equações diferenciais parciais acopladas (transferências de massa e calor) associadas a uma equação diferencial ordinária (para representar o encolhimento). Para resolver este sistema diferencial o mesmo é reescrito como um algébrico não linear equivalente via aplicação do Método das Diferenças Finitas. O sistema algébrico não linear resultante desta discretização é resolvido através do Método de Newton. Os resultados obtidos demonstram claramente a influência do encolhimento nos perfis de umidade e temperatura.

INTRODUÇÃO

A secagem configura-se como uma das operações unitárias mais importantes da engenharia química, visto o grande número de aplicações que podem ser desenvolvidas. É um processo muito utilizado para a conservação, transporte e armazenamento (Ishibashi et al., 2022).

Para essa finalidade, faz-se necessário a avaliação e análise de informações sobre a evolução do processo de secagem considerando a mudança dos parâmetros operacionais. Neste caso, tais informações podem ser obtidas via desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de representar os principais mecanismos de transferência envolvidos no processo (Azhdari e Emami, 2019).

Um obstáculo prático para a modelagem da secagem em alimentos é a incorporação do efeito do encolhimento (Shahari (2012), Shaharie Hibberd, 2013). Este fenômeno ocorre devido à remoção de água durante o processo de secagem, afetando a forma e o tamanho das partículas que constituem o alimento. Na prática, isto implica que a fronteira que define a interface do alimento varia ao longo do tempo (Adrover *et al.*, 2019). Neste caso, é muito comum que o encolhimento influencie fortemente a qualidade dos alimentos, bem como a sua aparência final (estética) e a sua evolução do processo de secagem. Assim, como o encolhimento ocorre simultaneamente com a difusão da umidade durante a secagem, este efeito pode afetar a remoção da mesma. Além disso, durante o processo de secagem deve-se considerar o efeito da tensão-deformação (Brasiello *et al.*,2011).

Koc *et al.* (2008) estudaram os efeitos de diferentes técnicas de secagem e do conteúdo de umidade no fenômeno de encolhimento-deformação de frutas. Os autores concluíram que o encolhimento-deformação pode ser expresso pela razão entre o volume aparente dos materiais antes e após a secagem. Segura *et al.* (2014) utilizam método experimental para analisar o fenômeno de encolhimento-deformação de fatias de maçã durante a secagem. Silva *et al.* (2016) avaliam as características de secagem de peras considerando o encolhimento-deformação e a variação dos coeficientes de difusão.

Em Brasiello *et al.* (2013, 2017), Ortiz-Garcìa-Carrasco *et al.* (2015) e em López-Méndez *et al.* (2018) é introduzido um coeficiente de difusão que varia com o conteúdo de água. No entanto, em nenhum destes modelos pode-se prever a redução do volume da amostra e a deformação da superfície no tempo. Curcio e Aversa (2014) propôs um modelo em que a redução de volume é derivada da evolução do tensor de tensão evoluindo com os valores locais de água contente.

Em Adrover *et al.* (2019) é proposto um modelo com fronteira móvel para a descrição da secagem de alimentos com encolhimento, visto que durante este fenômeno a amostra reduz o volume ao longo do tempo, isto é; as dimensões da amostra mudam com o tempo. Neste caso a redução do volume da amostra e a deformação da superfície com base na evolução espaço-temporal do conteúdo de água foram determinados com a avaliação deste modelo. Segundo os autores, a principal vantagem desta abordagem é a capacidade de capturar as características essenciais do processo.

Turkan e Etemoglu (2020) estudaram a cinética de desidratação da cenoura, do pepino e da berinjela considerando diferentes modelos de secagem avaliando o efeito do encolhimento. As taxas de encolhimento volumétricas dos produtos analisados foram examinadas.

Rani e Tripathy (2020) desenvolveram um modelo tridimensional em elementos finitos para a analisar a migração de umidade durante a secagem de um anel de abacaxi em que o coeficiente de difusão é função da difusividade, bem como é considerado o efeito do encolhimento nas direções radial e longitudinal.

Diante do que foi apresentado, neste trabalho o efeito do encolhimento durante o processo de secagem do tomate é avaliado. Este trabalho está organizado como segue. Na próxima seção é apresentado o modelo matemático que representa o sistema de interesse, bem como a sua adimensionalização. Posteriormente são apresentadas a metodologia numérica e os resultados, respectivamente. Na última seção são apresentadas as conclusões e as perspectivas de trabalhos futuros.

DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE INTERESSE

Nesta contribuição considera-se uma fatia homogênea de tomate com espessura L. Durante o processo de secagem da referida fatia, o calor é transferido do ar para o centro do produto e a umidade se difunde em direção à superfície. Como resultado da remoção de água durante a secagem, a forma e o tamanho das partículas que constituem a fatia mudam constantemente, o que implica que L muda com o tempo t, isto é; $L(t)$.

Matematicamente, este fenômeno é descrito pelo seguinte sistema de equações diferenciais parciais (Azhdari e Emami, 2019):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - k_1 T, \quad t > 0,\ 0 < x < L(t) \qquad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad t > 0,\ 0 < x < L(t) \qquad (2)$$

em que x representa a coordenada espacial, M é o conteúdo de umidade, T é a temperatura, D representa o coeficiente de difusão efetivo, α é difusividade térmica. O termo $-k_1T$ descreve a redução de umidade dentro da fatia, sendo k_1 a taxa de remoção.

Este modelo considera as seguintes condições iniciais (t=0):

$$M = M_0 \qquad (3)$$

$$T = T_0 \qquad (4)$$

As Equações 3 e 4 implicam que o conteúdo de umidade e de temperatura do material no início do processo são iguais a M_0 e T_0, respectivamente.

Já as condições de contorno para x iguais a 0 e $L(t)$ são descritas como:

$$\left.\frac{\partial M}{\partial x}\right|_0 = 0 \qquad (5)$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_0 = 0 \qquad (6)$$

$$\left.M\right|_{L(t)} = 0 \qquad (7)$$

$$-k\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{L(t)} + H_v D\rho\left.\frac{\partial M}{\partial x}\right|_{L(t)} = h(\left.T\right|_{L(t)} - T_{air}) \qquad (8)$$

em que k é a condutividade térmica, H_v é o calor de vaporização, T_{air} é a temperatura do ar, h é o coeficiente de transferência de calor e ρ é a densidade.

As Equações 5 e 6 representam as condições de simetria do problema. Já a Equação 7 diz que a umidade do material na fronteira $L(t)$ deve ser igual a 0. Por fim, a Equação 8 diz que as contribuições de condução e de evaporação devem ser iguais a contribuição convectiva na fronteira.

É importante ressaltar que o modelo acima é conhecido como problema de fronteira (ou interface) móvel, visto que durante a evolução do processo o valor de L muda com o tempo, isto é; o limite superior da coordenada espacial x muda.

Adimensionalização do Modelo Matemático

Para simplificar o modelo apresentado consideram-se os seguintes grupos adimensionais, bem como L é admitido, inicialmente, constante (L=L_0):

$$\tau = \frac{Dt}{L_0^2} \tag{9}$$

$$X = \frac{x}{L_0} \tag{10}$$

$$\bar{M} = \frac{M}{M_0} \tag{11}$$

$$\bar{T} = \frac{T - T_0}{T_{air} - T_0} \tag{12}$$

em que τ, X, $\bar{M}$ e $\bar{T}$ representam os adimensionais para o tempo, a coordenada espacial, a umidade e a temperatura, respectivamente.

Considerando os grupos adimensionais obtêm-se o seguinte modelo:

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \bar{M}}{\partial X^2} - k_2 \bar{T}, \quad \tau > 0,\ 0 < X < 1 \tag{13}$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = Le \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial X^2}, \quad \tau > 0,\ 0 < X < 1 \tag{14}$$

$$\bar{M} = 1 \tag{15}$$

$$\bar{T} = 0 \tag{16}$$

$$\left.\frac{\partial \bar{M}}{\partial X}\right|_0 = 0 \tag{17}$$

$$\left.\frac{\partial \bar{T}}{\partial X}\right|_0 = 0 \tag{18}$$

$$\bar{M}\Big|_1 = 0 \tag{19}$$

$$-\left.\frac{\partial \bar{T}}{\partial X}\right|_1 + \lambda \left.\frac{\partial \bar{M}}{\partial X}\right|_1 = Bi(\bar{T}\Big|_1 - 1) \tag{20}$$

em que:

$$Le = \frac{\alpha}{D} \tag{21}$$

$$k_2 = \frac{k_1 L_0^2 (T_{air} - T_0)}{M_0 D} \tag{22}$$

$$\lambda = \frac{H_v D M_0 \rho}{k(T_{air} - T_0)} \tag{23}$$

$$Bi = \frac{h L_0}{k} \tag{24}$$

onde Le é o número de Lewis, k_2 é a taxa de remoção em relação à difusividade e a umidade, λ é coeficiente de difusão em relação à condutividade térmica e Bi é o número Biot.

Para resolver o problema de fronteira móvel, isto é; quando L é função do tempo ($L(t)$), propõem-se uma mudança de variável, a saber, $l(\tau)$ = $L(t)/L_0$, como sugerido por Azhdari e Emami (2019). Neste caso, o domínio das Equações 13–20 passa a ser dado pelo intervalo [0 $l(\tau)$]. Além disso, ao usar a transformação ξ=$X/l(\tau)$ a fronteira corresponde a um valor fixo, isto é; ξ=1 e as equações considerando o efeito do encolhimento podem ser reescritas como:

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial \tau} = \frac{1}{l^2}\frac{\partial^2 \bar{M}}{\partial \xi^2} + \frac{\xi}{l}\frac{dl}{d\tau}\frac{\partial \bar{M}}{\partial \xi} - k_2 \bar{T},\ 0 < \xi < 1 \tag{25}$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = \frac{Le}{l^2}\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \xi^2} + \frac{\xi}{l}\frac{dl}{d\tau}\frac{\partial \bar{T}}{\partial \xi},\ 0 < \xi < 1 \tag{26}$$

$$\bar{M} = 1 \tag{27}$$

$$\bar{T} = 0 \tag{28}$$

$$\left.\frac{\partial \bar{M}}{\partial \xi}\right|_0 = 0 \tag{29}$$

$$\left.\frac{\partial \bar{T}}{\partial \xi}\right|_0 = 0 \tag{30}$$

$$\bar{M}\Big|_1 = 0 \tag{31}$$

$$-\left.\frac{\partial \bar{T}}{\partial \xi}\right|_1 + \lambda \left.\frac{\partial \bar{M}}{\partial \xi}\right|_1 = lBi(\bar{T}\Big|_1 - 1) \tag{32}$$

O modelo acima apresenta uma nova variável, a saber, a posição da fronteira l. Neste caso, faz-se necessário obter uma condição adicional para que a posição da fronteira possa ser determinada. Esta é dada pela denominada condição de Stefan (Crank, 1984):

$$\frac{dl}{d\tau} = \frac{M_0}{l}\frac{\partial \bar{M}}{\partial \xi}\bigg|_{\xi=1}, \quad l(0)=1 \tag{33}$$

Fisicamente, tal condição representa o equilíbrio térmico na interface.

É importante ressaltar que a principal vantagem nesta mudança de variável é que o modelo pode ser integrado considerando o limite superior fixo, isto é; o mesmo é avaliado no intervalo [0 1] (problema de fronteira fixa). A variável l é utilizada para corrigir a fronteira ao longo do tempo. Finalmente, se $l(\tau)$ for constante no modelo acima (Equações 25–33), o mesmo reduz-se ao modelo sem considerar o efeito de encolhimento.

METODOLOGIA NUMÉRICA

Para resolver o modelo com o efeito de encolhimento será utilizado o Método de Diferenças Finitas. Para essa finalidade consideram-se aproximações para derivadas temporais e espaciais de primeira ordem, derivadas espaciais de segunda ordem e a aproximação da derivada da umidade com relação ao espaço proposta por Furzeland (Crank, 1984). Assim, após substituir as referidas derivadas obtêm-se o modelo discretizado:

$$\begin{aligned}&\frac{\bar{M}_i^{n+1}-\bar{M}_i^{n}}{\Delta\tau} = \\ &\frac{1}{\left(l^{n+1}\right)^2}\left(\frac{\bar{M}_{i-1}^{n+1}-2\bar{M}_i^{n+1}+\bar{M}_{i+1}^{n+1}}{\left(\Delta\xi\right)^2}\right)+ \\ &+\frac{\xi_i}{l^{n+1}}\left(\frac{l^{n+1}-l^n}{\Delta\tau}\right)\left(\frac{\bar{M}_{i+1}^{n+1}-\bar{M}_{i-1}^{n+1}}{2\Delta\xi}\right)+ \\ &-k_2\bar{T}_i^n\end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\bar{T}_i^{n+1}-\bar{T}_i^{n}}{\Delta\tau} = \frac{Le}{\left(l^{n+1}\right)^2}\left(\frac{\bar{T}_{i-1}^{n+1}-2\bar{T}_i^{n+1}+\bar{T}_{i+1}^{n+1}}{\left(\Delta\xi\right)^2}\right)+ \\ &+\frac{\xi_i}{l^{n+1}}\left(\frac{l^{n+1}-l^n}{\Delta\tau}\right)\left(\frac{\bar{T}_{i+1}^{n+1}-\bar{T}_{i-1}^{n+1}}{2\Delta\xi}\right)\end{aligned} \tag{35}$$

$$\frac{l^{n+1}-l^n}{\Delta\tau} = \frac{M_0}{l^{n+1}}\left(\frac{3\bar{M}_N^n-4\bar{M}_{N-1}^n+\bar{M}_{N-2}^n}{2\Delta\xi}\right) \tag{36}$$

em que $\Delta\tau$ e $\Delta\xi$ representam os tamanhos dos passos de integração nas direções temporal e espacial, respectivamente, e N é o número de pontos de discretização (i=1, ..., N-1 e n=0, ..., N-1).

É importante ressaltar que o modelo original (sistema de equações diferenciais) é reescrito como um sistema de equações algébricas não lineares via discretização. Assim, associando as condições inicial e de contorno a este sistema discretizado, o mesmo pode ser resolvido via aplicação do Método de Newton.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos considerando o modelo descrito pelas Equações 25–33 com efeito de encolhimento (L=$L(t)$) e sem efeito de encolhimento (L=L_0). Para essa finalidade são considerados os seguintes parâmetros termo físicos (Azhdari e Emami, 2019): D=8×10^{-10} m^2/s, h=30 W/(m^{2o}C), α=4×10^{-9} m^2/s, M_0=0,8 b.u., T_0=0^{o}C, L_0=5×10^{-3} m, H_v=2345 kJ/kg, T_{air}=60 ^{o}C, k_1=1×10^{-10} (b.u.)/(s ^{o}C), k=0,475 W/m^{o}C, ρ=1250 Kg/m^3.

Para discretizar o modelo consideram-se 50 pontos em ambas as direções (temporal e espacial). Cabe ressaltar que este valor foi definido após simulações preliminares, em que verificou-se que o aumento no valor deste parâmetro não modificava, significativamente, os perfis obtidos.

A seguir são apresentadas análises no que tange os perfis de umidade e temperatura com e sem encolhimento, bem como a influência de alguns parâmetros do modelo.

Perfis de Umidade e Temperatura

Nas Figuras 1 e 2 são apresentados os perfis de umidade com e sem encolhimento. Nestas figuras observa-se, primeiramente, o atendimento das condições de contorno. Em segundo lugar, verifica-se que a umidade diminuiu com o aumento do tempo, conforme esperado fisicamente. Em relação ao modelo sem encolhimento, observa-se a fronteira fixa (ξ é fixo). Já para o modelo com efeito do encolhimento observa-se a fronteira (ou interface) móvel (ξ é variável). Do ponto de vista físico, verifica-se que este processo foi um pouco mais lento para o modelo sem encolhimento quanto comparado com o modelo com encolhimento. Ainda na Figura 2 também é possível observar a interface, isto é; a localização da fronteira ao longo do tempo. Finalmente, verifica-se que a inserção do fenômeno de encolhimento modifica a dinâmica do processo, o que ressalta a sua importância no referido processo.

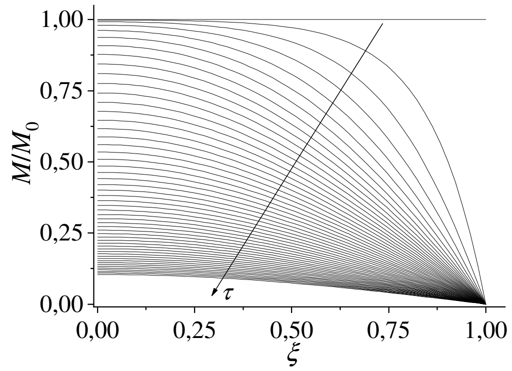

Figura 1: Perfil de umidade adimensional para o modelo sem encolhimento.

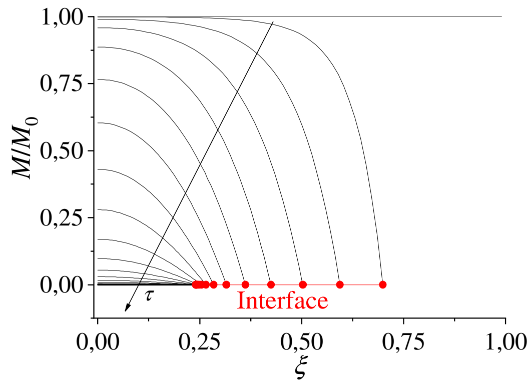

Figura 2: Perfil de umidade adimensional para o modelo com encolhimento.

Já nas Figuras 3 e 4 são apresentados os perfis de temperatura com e sem encolhimento. De forma geral, a temperatura de ambos os modelos (com e sem encolhimento) aumenta com o tempo de secagem. Devido à diferença entre a temperatura do ar e da amostra, a temperatura aumenta rapidamente no período inicial de aquecimento. À medida que o período de aquecimento avança, o aumento da temperatura atinge um perfil quase uniforme. Especificamente em relação à Figura 4, observa-se a variação interface ao longo do tempo. Assim como observado para a umidade, a temperatura também aumentou muito mais rapidamente para o modelo com encolhimento em relação ao modelo sem encolhimento.

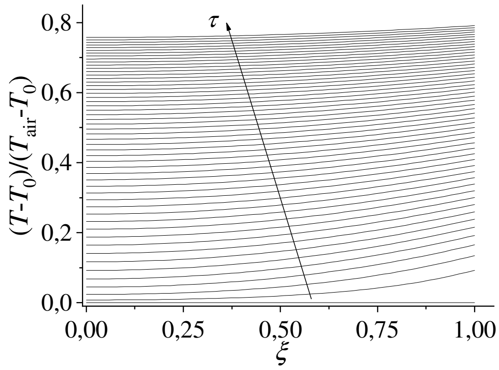

Figura 3: Perfil de temperatura adimensional para o modelo sem encolhimento.

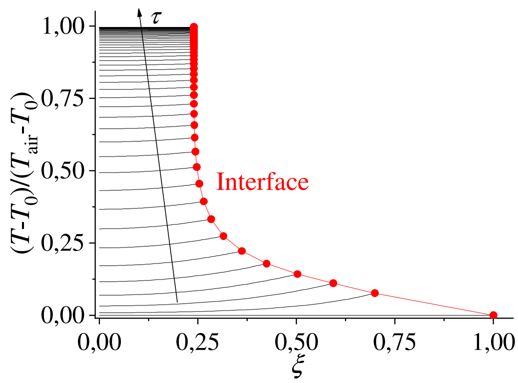

Figura 4: Perfil de temperatura adimensional para o modelo com encolhimento.

A Figura 5 representa um comparativo entre os perfis de umidade e temperatura com e sem o efeito de encolhimento no centro da amostra.

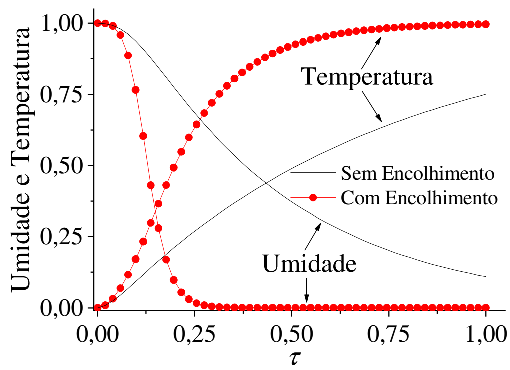

Figura 5: Perfis de umidade e temperatura no centro da amostra com e sem encolhimento.

Nesta figura percebe-se que a temperatura com efeito de encolhimento é muito mais alta em comparação com o modelo sem efeito de encolhimento. No entanto, o conteúdo de umidade diminuiu mais rapidamente quando o efeito de encolhimento é considerado. Isso se deve à redução do domínio de integração na direção espacial, haja visto que a espessura da amostra diminui devido ao encolhimento, e, portanto, atinge-se a superfície mais rapidamente. Portanto, o modelo com o efeito de encolhimento necessita de um tempo menor para secagem.

Já na Figura 6 é apresentada a localização da interface em função do tempo. O encolhimento da fatia é mostrada pela mudança na espessura do mesmo. O valor final do encolhimento para este modelo pode ser determinado prontamente, pois apenas a massa sólida é deixada no final da secagem, que neste caso é, aproximadamente, 0,24.

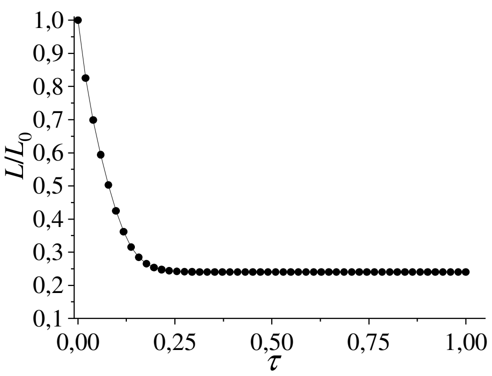

Figura 6: Localização da interface em função do tempo.

Influência do Número de Lewis

Nesta seção é apresentada a análise de sensibilidade no que tange o *Le*. Para essa finalidade consideram-se os mesmos parâmetros adotados anteriormente, exceto os seguintes valores para o *Le* ([5 10 50 100]).

Na Figura 7 são apresentados os perfis de temperatura no centro da amostra considerando diferentes valores de *Le* com encolhimento (C) e sem (S) encolhimento. Nesta observa-se que, independentemente do modelo considerado, o aumento no valor do parâmetro *Le* implica no incremento do valor de perfil de temperatura no centro da amostra. Isto se deve ao aumento da difusividade térmica (α) ou a diminuição do coeficiente de difusão efetivo (D). Em ambos os casos, o aumento do *Le* implica no aumento da ponderação do termo difusivo no balanço de energia, promovendo o aumento da temperatura do processo.

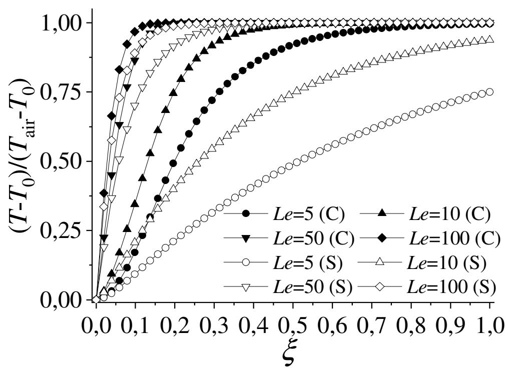

Figura 7: Temperatura no centro da amostra considerando diferentes valores de *Le* com (C) e sem (S) encolhimento.

Ao se comparar os modelos com (C) e sem (S) encolhimento observa-se que, devido à redução espacial da fatia, as temperaturas no modelo com encolhimento são superiores as obtidas para o modelo sem encolhimento (já que neste caso a espessura da fatia não se altera com o tempo). Finalmente, quanto maior o valor deste parâmetro *Le*, maior é a temperatura no interior da amostra, sendo que esta se aproxima da temperatura do ar.

Influência do Número de Biot

Para analisar a sensibilidade do parâmetro *Bi* no perfil de temperatura, os seguintes parâmetros são adotados: *Bi*=([0,1 0,5 1 2]). Os outros parâmetros são os mesmos adotados anteriormente. Na Figura 8 são apresentados os perfis de temperatura na superfície da amostra considerando diferentes valores de *Bi* com encolhimento (C) e sem (S) encolhimento.

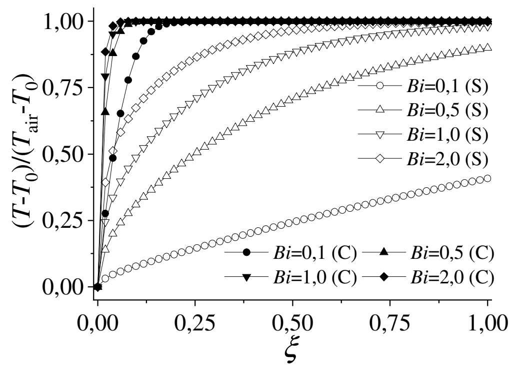

Figura 8: Temperatura no contorno da amostra considerando diferentes valores de *Bi* com (C) e sem (S) encolhimento.

Nesta figura verifica-se que, assim como na análise do parâmetro *Le* que, independentemente do modelo considerado, o aumento no valor do parâmetro *Bi* implica no aumento no valor do perfil de temperatura na superfície da amostra. Neste caso, o aumento no valor do *Bi* implica no incremento do valor do coeficiente de transferência de calor (*h*) ou a redução no valor da condutividade térmica (*k*). Assim, o aumento do *Bi* implica no incremento do valor da temperatura na superfície da amostra.

Assim como observado na análise anterior, ao se comparar os modelos com (C) e sem (S) encolhimento também verifica-se que, devido à redução espacial da fatia, as temperaturas no modelo com encolhimento são superiores as obtidas para o modelo sem encolhimento.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi estudado um modelo de secagem que considera o efeito do encolhimento em uma fatia de tomate ao longo do tempo. Este modelo é composto de balanços de massa, energia e uma equação adicional para caracterizar a evolução da interface ao longo do processo de secagem. Para resolver o sistema de equações foi utilizado o Método das Diferenças Finitas com discretizações em ambas as direções, a saber, no espaço e no tempo. A partir da aplicação desta abordagem foi obtido um sistema algébrico não linear, sendo o mesmo resolvido pelo Método de Newton.

As simulações numéricas demonstram que os perfis obtidos com ambos os modelos (com e sem encolhimento) são concordantes com os esperados fisicamente. A umidade diminui mais rapidamente no modelo que considera o encolhimento, o que implica que o mesmo necessita de um tempo menor para secagem. Já para a temperatura tem-se o contrário, isto é; a mesma aumenta mais rapidamente no modelo com efeito do encolhimento do que no modelo sem o efeito do encolhimento. Em ambos os casos, isto se deve a redução da amostra durante o processo de secagem.

No que se refere a análise dos parâmetros *Le* e *Bi*, o aumento de ambos implica no aumento do valor do perfil de temperatura, sendo que este efeito é bem maior para o modelo que considera o efeito do encolhimento.

Como propostas de trabalhos futuros pretende-se: *i*) inserir o efeito de propriedades visco-elásticas no modelo secagem; *ii*) formular e resolver problemas inversos considerando pontos experimentais reais e *iii*) estender o modelo considerado para o contexto tridimensional.

NOMENCLATURA

Bi	Número Biot
D	Coeficiente de difusão efetivo (m^2/s)
h	Coeficiente de transferência de calor ($W/(m^{2o}C)$)
H_v	Calor de vaporização (kJ/kg)
i	Contador
k	Condutividade térmica (W/m^oC)
k_1	Taxa de remoção ($b.u./s^oC$)
k_2	Taxa de remoção adimensional
l	Variável auxiliar espacial
L	Espessura da amostra (m)
L_0	Espessura da amostra (m)
Le	Número de Lewis
M	Umidade local (b.u.)
$\overline{M}$	Umidade adimensional
M_0	Umidade inicial (b.u.)
n	Contador
N	Número de pontos de discretização
t	Tempo (s)
T	Temperatura (^oC)
$\overline{T}$	Temperatura adimensional
T_0	Temperatura inicial (^oC)
T_{air}	Temperatura do ar (^oC)
x	Espaço (m)
X	Espaço adimensional
α	Difusividade térmica (m^2/s)
$\Delta\xi$	Diferença finita no espaço
$\Delta\tau$	Diferença finita no tempo
ξ	Variável auxiliar espacial
ρ	Densidade (Kg/m^3)
λ	Coeficiente de difusão adimensional
τ	Tempo adimensional

REFERÊNCIAS

ADROVER, A., BRASIELLO, A., PONSO, G. (2019), A Moving Boundary Model for Food Isothermal Drying and Shrinkage: A Shortcut Numerical Method for Estimating the Shrinkage Factor. Journal of Food Engineering, Vol. 244, p.212–219.

AZHDARI, E., EMAMI, A. (2019), Analytical and Numerical Study of Drying of Tomato in Non-Shrinkageand Shrinkage Model.Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 166, p.253–265.

BRASIELLO, A., ADILETTA, G., RUSSO, P., CRESCITELLI, S., ALBANESE, D., DI MATTEO, M. (2013), Mathematical Modeling of Eggplant Drying: Shrinkage Effect. J. Food Eng., Vol. 114 (1), p. 99–105.

BRASIELLO, A., CRESCITELLI, S., ADILETTA, G., DI MATTEO, M., ALBANESE, D. (2011), Mathematical Model with Shrinkage of an Eggplant Drying Process. Chemical Engineering Transactions, Vol. 24, p. 451–456.

BRASIELLO, A., IANNONE, G., ADILETTA, G., DE PASQUALE, S., RUSSO, P., DI MATTEO, M. (2017), Mathematical Model for Dehydration and Shrinkage: Prediction of Eggplant's MRI Spatial Profiles. J. Food Eng., Vol. 203, p. 1–5.

CHAPRA, S. C., CANALE, R. P. (2009), Métodos Numéricos para Engenharia, McGraw Hill Brasil, 832 páginas.

CRANK, J. (1984), Free and Moving Boundary Problem, New York Clarendon-Oxford Science Publication.

CURCIO, S., AVERSA, M. (2014), Influence of Shrinkage on Convective Drying of Fresh Vegetables: A Theoretical Model. J. Food Eng., Vol. 123, p. 36–49.

FORTUNA, A. O. (2000), Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluídos, Vol. 30, EdUSP, 426 páginas.

ISHIBASHI, R., NUMATA, T., TANIGAWA, H., TSURUTA, T. (2022), In-situ Measurements of Drying and Shrinkage Characteristics During Microwave Vacuum Drying of Radish and Potato. Journal of Food Engineering, Vol. 323, p.110988-110997.

KOC, B., EREN, I., ERTEKIN, F. K. (2008), Modelling Bulk Density, Porosity and Shrinkage of Quince During Drying: the Effect of Drying Method, J. Food Eng., Vol. 85(3), p.340–349.

RANI, P., TRIPATHY, P. P. (2020), Modelling of Moisture Migration During Convective Drying of Pineapple Slice Considering Non-Isotropic Shrinkage and Variable Transport Properties. J Food Sci Technol, Vol. 57(10), p. 3748–3761.

SEGURA, L. A., BADILLO, G. M., ALVES-FILHO, O. (2014), Microstructural Changes of Apples During Drying: Visual Microstructural Changes and Possible Explanation from Capillary Pressure Data, Dry. Technol., Vol. 32 (14), p.1692–1698.

SHAHARI, N. A. (2012), Mathematical Modelling of Drying Food Products: Application to Tropical Fruits (Ph.D. Thesis), University of Nottingham.

SHAHARI, N. A., HIBBERD, S. (2013), Analysis of single phase moisture and heat model of food drying. 4th International conference of Mathematical Models in Engineering and Computer science, p. 137-142.

SILVA, V., COSTA, J. J., FIGUEIREDO, A. R., NUNES, J., NUNES, C., RIBEIRO, T. I. B., PEREIRA, B. (2016), Study of Three-Stage Intermittent Drying of Pears Considering Shrinkage and Variable Diffusion Coefficient, J. Food Eng., Vol. 180, p.77–86.

TURKAN, B., ETEMOGLU, A. B. (2020), Simulation of Shrinkage Effect in Drying of Food Products in Hot-Air Dryer. Sigma J Eng & Nat Sci, Vol. 38(2), p.527-544.