

TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O RESFRIAMENTO E CONGELAMENTO DE PRODUTOS BIOLÓGICOS COM FORMA PARALELÍPEDICA VIA MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Manassés Mesquita da Silva

Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, Dpto. Eng. Agrícola/CCT, CEP 58.109-970
gilson@dem.ufcg.edu.br

Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia

Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, Dpto. Eng. Agrícola/CCT, CEP 58.109-970
josi@deag.ufcg.edu.br

Antonio Gilson Barbosa de Lima

Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, Dpto. Eng. Mecânica/CCT, CEP 58.109-970
gilson@dem.ufcg.edu.br

Resumo. *O resfriamento e o congelamento de produtos biológicos são métodos de preservação usados na indústria de alimentos com o objetivo de manter os atributos sensoriais e propriedades nutritivas desses produtos. O conhecimento das propriedades de transporte e a distribuição de temperatura no interior destes produtos é de fundamental importância para um projeto otimizado de sistemas de refrigeração. Neste sentido, este trabalho apresenta uma modelagem matemática tridimensional transiente para descrever a transferência de calor no interior de sólidos com forma paralelepipedal incluindo mudança de fase. A equação governante foi resolvida numericamente utilizando a técnica dos volumes finitos e uma formulação totalmente implícita. Como aplicação, a metodologia foi usada para prever a transferência de calor durante o resfriamento, congelamento e pós-congelamento de batata pré-processada. Resultados numéricos da temperatura no centro do produto foram comparados aos dados experimentais reportados na literatura e um bom ajuste foi obtido. Coeficientes de transporte de calor foram determinados para os períodos de resfriamento, congelamento e pós-congelamento utilizando-se a técnica do erro quadrático mínimo.*

Palavras chave: Calor, Paralelepípedo, Volumes finitos, Batata, Congelamento.

1. Introdução

Materiais biológicos frescos tais como frutas e vegetais, estão respirando, transpirando e secando ao mesmo tempo (Shewfelt & Phillips, citado por McDonald & Sun, 2000). Em geral, a qualidade destes produtos começa a deteriorar rapidamente depois da colheita, provocada principalmente pela distribuição de temperatura no seu interior. Nestes produtos hortifrutigranjeiros torna-se então necessário remover esse calor tão rapidamente quanto possível depois da colheita, pois o efeito da temperatura no tempo de vida útil desses produtos é dramático. Sendo assim, quase sempre estes produtos são imediatamente resfriados e/ou congelados para reduzir a taxa respiratória e conseqüentemente, de degradação da sua qualidade, aumentando sua vida útil. O processo de congelamento combina o efeito favorável de baixas temperaturas com a transformação de água em gelo. De acordo com Delgado & Sun (2001), em temperaturas abaixo de -10° C, diminui-se a proliferação de microorganismos, as taxas de reações químicas e as reações metabólicas celulares. Neste sentido, vários métodos de resfriamento e/ou congelamento, tais como, resfriamento com água, com ar, com ar-água e a vácuo são usados na prática (Dincer & Genceli, 1994). Para se projetar sistemas de resfriamento eficientes, engenheiros e pesquisadores, devem fazer uma análise precisa da transferência de calor e massa durante o resfriamento e/ou congelamento dos produtos biológicos e terem conhecimento das variáveis que interferem no processo, e que afetam a taxa de resfriamento e de evaporação. Dentre essas variáveis citam-se: densidade, condutividade térmica, calor específico, coeficiente de transferência de calor e massa convectivo, dimensões e a forma do produto, bem como, condições de resfriamento. O conhecimento destas informações é essencial para o cálculo da carga térmica da unidade de refrigeração e para otimização destes sistemas, projetados para minimizar os danos aos materiais e aumentar sua vida de prateleira. A minimização da energia requerida, o aumento da confiabilidade e da segurança e qualidade do produto devem também ser considerados.

Vários estudos teóricos e experimentais para estimar importantes parâmetros durante o resfriamento de produtos alimentícios tais como, tempo de resfriamento, difusividade térmica e coeficiente de transferência de calor têm sido reportados na literatura (McDonald & Sun, 2000; Dincer & Genceli, 1994; Ansari et al., 1984; Ansari & Afaq, 1986; Tang & Johnson, 1989; Lin et al., 1996; Marin et al., 1985; Chau & Gaffney, 1990; LeBlanc et al., 1990a; LeBlanc et al., 1990b; Teruel Mederos, 2000; Chuntranuluck et al., 1998a; Chuntranuluck et al., 1998b; Chuntranuluck et al., 1998c). Contudo, os modelos matemáticos usados por estes pesquisadores restringem-se a assumir geometrias uni e bidimensionais mais simples e/ou propriedades térmicas constantes.

Durante o congelamento, a água contida no material muda de fase. Desde que as propriedades térmicas do gelo são diferentes da água líquida, as propriedades do material determinadas acima do ponto de congelamento não são válidas para as condições de sub-congelamento, nem tão pouco durante o congelamento. Portanto, a determinação das propriedades térmicas e modelagem do processo sob condições de solidificação requerem explícito conhecimento do estado físico da água no produto biológico.

Do exposto, objetivou-se com este trabalho, modelar e simular matematicamente a transferência de calor durante o resfriamento, congelamento e pós-congelamento de sólidos com forma de paralelepípedo. Como aplicação, o modelo foi utilizado para descrever a variação de temperatura no interior do material, bem como calcular as propriedades de transporte (coeficientes de condução e convecção) durante o resfriamento e congelamento de fatias de batatas pré-processadas cortadas em forma de paralelepípedo.

2. Materiais e Métodos

2.1. Modelagem matemática

A equação geral de conservação pode ser escrita da seguinte forma (Nascimento, 2002):

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{I} \mathbf{J} = \nabla \cdot (\mathbf{r}^j \nabla \mathbf{J}) + S^j \quad (1)$$

em que $\tilde{\mathbf{A}}^{\ddot{\theta}}$, $\ddot{\theta}$ são propriedades de transporte; $\ddot{\theta}$ é a variável dependente; $S^{\ddot{\theta}}$ é o termo fonte ou de geração de energia e ∇ é um operador vetorial.

Considerando unicamente a transferência de calor durante o processo e $\ddot{\theta} = \tilde{n}c_p$; $\ddot{\theta} = T$; $\tilde{\mathbf{A}}^{\ddot{\theta}} = k$ e $S^{\ddot{\theta}} = q'''$, a Eq. (1) pode ser reescrita como segue:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{r} c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q''' \quad (2)$$

em que \tilde{n} é a densidade; T é a temperatura; c_p é o calor específico; k é a condutividade térmica e q''' é o termo de geração de energia associado à mudança de fase.

Durante o congelamento, ocorre uma mudança de fase da água do estado líquido para a fase gelo e há simultaneamente uma liberação de energia. O termo de geração de energia na Eq. (2) representa o calor liberado durante a mudança de fase do produto (Limeira, 2003):

$$q''' = \rho L_s \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3)$$

Neste caso, a equação de transferência de calor (incluindo geração de energia interna) aplicada para um sólido com forma de paralelepípedo (Figura 1) pode ser escrita como segue (Limeira, 2003):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{r} c_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho L_s \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (4)$$

onde L_s é o calor latente de solidificação, $f_s = (T_L - T) / (T_L - T_S)$ representa a fração de sólido (gelo) formada durante a fase de congelamento, onde T_L é a temperatura de início de congelamento e T_S é a temperatura de fim do congelamento, e t é o tempo.

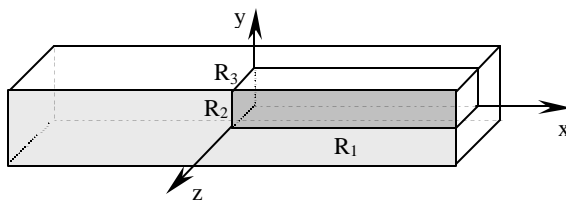


Figura 1. Esquema do domínio físico do problema em estudo.

Devido à simetria existente num sólido desse tipo, considera-se apenas 1/8 de seu volume no intuito de facilitar a abordagem e análise do problema. As seguintes condições: inicial, de simetria e de contorno são usadas:

a) Condição inicial: distribuição uniforme de temperatura em todo corpo.

$$T(x,y,z,t=0) = T_0, \tag{5a}$$

b) Condição de simetria: fluxo de calor nulo nas regiões de simetria.

$$-k \frac{\partial T(x=0, y, z, t)}{\partial x} = 0$$

$$-k \frac{\partial T(x, y=0, z, t)}{\partial y} = 0 \tag{5b-d}$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z=0, t)}{\partial z} = 0$$

c) Condição de contorno na superfície: transferência de calor por convecção.

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = h[T(x, y, z, t) - T_e], x = R_1;$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} = h[T(x, y, z, t) - T_e], y = R_2; \tag{5e-g}$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} = h[T(x, y, z, t) - T_e], z = R_3;$$

2.2 Procedimento numérico

Várias metodologias numéricas podem ser utilizadas para resolver a Eq. (4), dentre elas, destacam-se: diferenças finitas, elementos finitos, elementos de contorno e volumes finitos (Patankar, 1980; Maliska, 1995; Fortuna, 2000; Versteeg & Malalasekera, 1995). Neste trabalho a equação governante foi discretizada utilizando a técnica dos volumes finitos. Na Fig. 2 encontra-se esquematizado o volume de controle utilizado na discretização da equação governante.

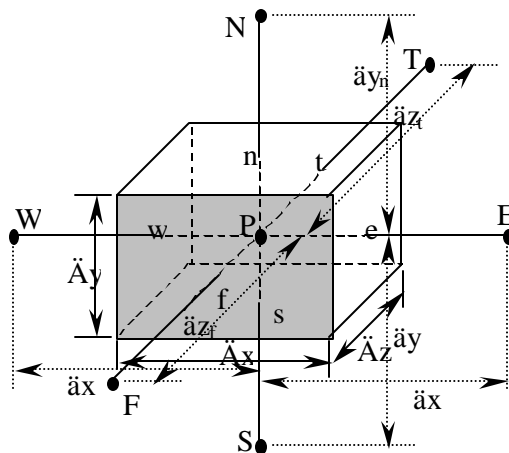


Figura 2. Volume de controle utilizado neste trabalho.

Integrando a Eq. (4) no volume e no tempo, tem-se:

$$\iint_{V_t} \frac{\partial \left(\rho \left(c + \frac{L_s}{T_L - T_S} \right) T \right)}{\partial t} dt dV = \iint_{V_t} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dt dV + \iint_{V_t} \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dt dV + \iint_{V_t} \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dt dV \tag{6}$$

Utilizando o esquema de interpolação totalmente implícita e reorganizando os termos da Eq. (6) após a integração, pode-se escrever:

$$A_P T_P = A_E T_E + A_W T_W + A_N T_N + A_S T_S + A_F T_F + A_T T_T + A_P^o T_P^o \quad (7)$$

$$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S + A_F + A_T + \rho_P \left(c_P + \frac{L_s}{T_L - T_S} \right) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + B$$

onde:

$$A_E = \frac{k_e}{\delta x_e} \Delta y \Delta z \quad A_W = \frac{k_w}{\delta x_w} \Delta y \Delta z \quad A_N = \frac{k_n}{\delta x_n} \Delta x \Delta z \quad A_S = \frac{k_s}{\delta x_s} \Delta x \Delta z$$

$$A_F = \frac{k_f}{\delta x_f} \Delta x \Delta y \quad A_T = \frac{k_t}{\delta x_t} \Delta x \Delta y \quad A_P^o = \rho_P^o \left(c_P^o + \frac{L_s}{T_L - T_S} \right) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad B = 0$$

Esta formulação é válida para todos os pontos internos ao domínio. A formulação matemática para os pontos de fronteira é obtida por meio de um balanço de energia para cada volume de controle levando-se em consideração as condições de contorno utilizadas. Os coeficientes da Eq. (7) para os pontos de fronteira são, onde h_c é o coeficiente de convecção térmica na superfície:

$$A_E = \begin{cases} 0 & \text{para os volumes de fronteira} \\ \frac{k_e}{\delta x_e} \Delta y \Delta z & \text{para os volumes internos} \end{cases}$$

$$A_N = \begin{cases} 0 & \text{para os volumes de fronteira} \\ \frac{k_n}{\delta x_n} \Delta x \Delta z & \text{para os volumes internos} \end{cases}$$

$$A_F = \begin{cases} 0 & \text{para os volumes de fronteira} \\ \frac{k_f}{\delta x_f} \Delta x \Delta z & \text{para os volumes internos} \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 0 & \text{para os volumes internos} \\ \frac{\Delta y \Delta z}{\left(\frac{1}{\frac{h_c}{k_e}} + \delta x_e \right)} & \text{para os volumes de fronteira no lado x} \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 0 & \text{para os volumes internos} \\ \frac{\Delta x \Delta z}{\left(\frac{1}{\frac{h_c}{k_n}} + \delta x_n \right)} & \text{para os volumes de fronteira no lado y} \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 0 & \text{para os volumes internos} \\ \frac{\Delta x \Delta y}{\left(\frac{1}{\frac{h_c}{k_f}} + \delta x_f \right)} & \text{para os volumes de fronteira no lado z} \end{cases}$$

A solução do sistema de equações algébricas, gerado a partir da Eq. (7) na forma discretizada, foi resolvido utilizando o método iterativo de Gauss-Siedel com critério de convergência de $|T^{n+1} - T^n| \leq 10^{-8}$. Para obtenção dos resultados numéricos, foi desenvolvido um código computacional no ambiente Mathematica®, utilizando uma malha de 20x20x20 pontos nodais em um $\Delta t=0,5s$. Detalhes sobre a validação e refino de malha e tempo do modelo (sem mudança de fase) podem ser encontrados em Nascimento (2002).

2.3 Aplicação

Como aplicação, a metodologia foi utilizada para prever a cinética de resfriamento, congelamento e pós-congelamento de fatias de batata. Os dados experimentais de batata pré-processada utilizados na simulação foram os seguintes (LeBlanc et al., 1990a): $\rho=1012 \text{ kg.m}^{-3}$, para o produto congelado; $\rho=1069 \text{ kg.m}^{-3}$, para o produto não-congelado; $c_p=1870 \text{ J.(kg.}^\circ\text{C)}^{-1}$ para o produto congelado; $c_p=3420 \text{ J.(kg.}^\circ\text{C)}^{-1}$ para o produto não-congelado; $L_S=246888,30 \text{ J.kg}^{-1}$ para $T_L < T < T_S$; $L_S=0$ para $T > T_L$ e $T < T_S$; $T_0=31,1 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_L=-0,80 \text{ }^\circ\text{C}$ (no centro do sólido em $t=313s$); $T_S = -5,40 \text{ }^\circ\text{C}$ (no centro do sólido $t=978s$); $T_F = -18,0 \text{ }^\circ\text{C}$ (no centro do sólido em $t=1188s$); $T_e = -29,1 \text{ }^\circ\text{C}$; $R_1=R_2=0,005 \text{ m}$; $R_3=0,030 \text{ m}$ e teor de umidade de 73,72% (base úmida).

Os dados numéricos obtidos foram ajustados aos dados experimentais de temperatura no centro do sólido, no início do processo, no início e no fim do congelamento, e no final do processo, utilizando-se a técnica do erro mínimo quadrado (Eq. 8a-b) visando obtenção dos coeficientes de condução e convecção do material biológico em estudo. A técnica do erro quadrático mínimo foi utilizada com segue:

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^n (T_{i,pred} - T_{i,exp})^2 \tag{8a-b}$$

$$\bar{S}^2 = \frac{\bar{E}}{n - n}$$

onde \bar{E} é o erro médio quadrático, \bar{S}^2 é a variância, n é o número de dados experimentais e \bar{n} é o número de parâmetros ajustados.

Durante a fase de congelamento foram propostas as seguintes equações para a condutividade térmica, calor específico e massa específica, respectivamente, em qualquer ponto no interior do produto:

$$\begin{aligned} k_{dc} &= f_S k_{ac} + (1 - f_S) k_{pc} \\ c_{Pdc} &= f_S c_{Pac} + (1 - f_S) c_{Ppc} \\ \rho_{dc} &= f_S \rho_{ac} + (1 - f_S) \rho_{pc} \end{aligned} \tag{9a-c}$$

onde os índices ac, dc e pc representam antes, durante e depois do congelamento, respectivamente. O mesmo procedimento foi feito para a densidade e calor específico. Desde que a fração de cristais de gelo formada é variável neste período, a condutividade térmica e os demais parâmetros térmicos também serão.

3. Resultados e Discussão

Temperaturas típicas no centro do produto durante o processo de resfriamento, congelamento e pós-congelamento são mostradas na Fig. 3. Verifica-se que o processo de redução de temperatura pode ser dividido em três períodos distintos: um período de resfriamento em que o material é resfriado de sua temperatura inicial até a temperatura de congelamento; um período de mudança de fase, que representa a cristalização da água contida no produto; e por fim, o período de espera em que o produto alcança a temperatura final do processo previamente estabelecida. Observando atentamente a Fig. 3, verifica-se que a temperatura na fase de congelamento exibe uma linha aproximadamente horizontal. Isto sugere que a temperatura do material neste período não varia muito para os produtos com alto teor de umidade. Este fato constitui um forte argumento para se afirmar que alimentos congelam, de maneira aproximada, similarmente aos líquidos ideais. Sendo assim, as temperaturas de início e fim do congelamento são facilmente obtidas desta figura.

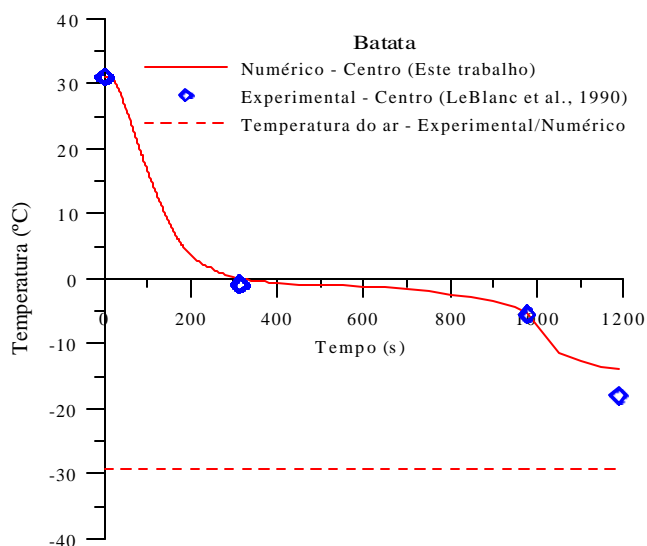


Figura 3. Comparação entre as temperaturas no centro do produto obtidas numérica e experimentalmente durante o processo de transferência de calor e mudança de fase.

Ainda em relação à Fig. 3, verifica-se que a taxa de resfriamento no período de pré-congelamento é maior do que no período de pós-congelamento, e muito maior do que no período de congelamento. Isto é devido ao fato de que no início de processo, existe uma grande diferença entre as temperaturas do material e do fluido refrigerante. A comparação entre os dados numéricos e experimentais permite afirmar que um bom ajuste foi obtido, apresentando um erro quadrático mínimo de $0,0046 \text{ (}^\circ\text{C)}^2$ e uma variância de $0,0028 \text{ (}^\circ\text{C)}^2$. Deste ajuste foram determinadas condutividades térmica de $0,47 \text{ W.(m.}^\circ\text{C)}^{-1}$ no período de pré-congelamento e de $0,98 \text{ W.(m.}^\circ\text{C)}^{-1}$ no período de pós-congelamento, e um coeficiente de transferência de calor de $52,0 \text{ W.(m}^2\text{.}^\circ\text{C)}^{-1}$. Na Tabela 1 encontram-se alguns valores de condutividade térmica determinados para batata reportados na literatura, considerando as condições de temperatura e teor de umidade. Nota-se que os valores reportados encontram-se próximos dos valores numéricos obtidos neste trabalho.

Tabela 1. Valores de condutividade térmica da batata reportados na literatura.

k (W.(m.°C) ⁻¹)	Região	T _a (°C)	M (b.u.)	Referência
0,50 ± 0,04	resfriamento	-29	0,7372	LeBlanc et al. (1990a)
1,00 ± 0,12	pós-congelamento	-29	0,7372	LeBlanc et al. (1990a)
1,39 ^a	congelamento	-	0,8000	Marin et al. (1985)
1,25 ^b	congelamento	-	0,7372	Marin et al. (1985)
0,438	resfriamento	-	0,8500	Listov & Kalugina citados por Mohsenin (1980)
0,479	-	2,2	-	Dickerson & Read, citados por Ashrae (1993)
0,454	resfriamento	5,0	-	Ansari & Afaq (1986)
0,47 ± 0,05	-	35,0	0,6 – 0,7	López-Ramos et al. (1993)
0,552	-	40 – 50	0,749	Buhri & Singh (1993)

M - teor de água; ^a valor experimental; ^b valor estimado;

A Figura 4a-b-c-d ilustra a distribuição de temperatura no interior do material nos planos y=0 e z=0, em t=150, 313, 978, e 1188s. A distribuição de temperatura no plano y=0 é idêntica ao plano x=0. Verifica-se que a distribuição é praticamente uniforme dentro do produto e que o congelamento da água ocorre da superfície para o centro do material, particularmente iniciando em y=R₂ e z=R₃ (plano x=0) e em x=R₁ e y=R₂ (plano z=0), onde ocorrem os maiores gradientes de temperatura. Estes resultados estão de acordo com os dados experimentais de determinados por LeBlanc et al. (1990).

A mudança de fase água-gelo tem a vantagem de fixar a estrutura do tecido e separar a fração de água na fronteira dos cristais de gelo de tal maneira que ambos não estão disponíveis como solvente ou componentes reativos. Desta forma, a difusão de outros solutos no tecido celular é muito lenta, fato que aliado à redução de temperatura, ajuda na diminuição da taxa de reação. Contudo, o tamanho e a localização dos cristais de gelo podem danificar as membranas

celulares e romper a estrutura física do material. Nestas condições, a cristalização da água e algumas vezes do soluto, não é desejável, uma vez que causa modificações físico-químicas durante o congelamento (Delgado & Sun, 2001).

Do exposto, pode-se dizer que a qualidade do produto congelado é fortemente dependente da taxa de congelamento a que o mesmo está submetido durante o processo. Congelamento lento produz cristais de gelo em áreas extracelulares apenas, enquanto que o congelamento rápido produz pequenos cristais de gelo uniformemente distribuídos sobre todo tecido celular. Desde que existe um gradiente de temperatura no material, os cristais formados nas proximidades da superfície são menores, aumentando em direção ao centro do sólido. Vale ressaltar que a cristalização de gelo, ocorrendo a uma mesma temperatura, é diferente de um tecido para outro, isto é causado, principalmente, pela diferença de mobilidade da água no interior dos diversos tecidos.

Para finalizar, embora o congelamento afete um produto alimentício menos que outros métodos de preservação, o produto poderá sofrer alguma desidratação (perda de água) que geram perdas na qualidade do mesmo e, portanto perdas econômicas. Então, a transferência de água do produto deve ser minimizada para manter sua qualidade até o final do processo. Desde que no período de resfriamento, as temperaturas no interior do sólido são maiores, a perda de água por evaporação, neste período é maior.

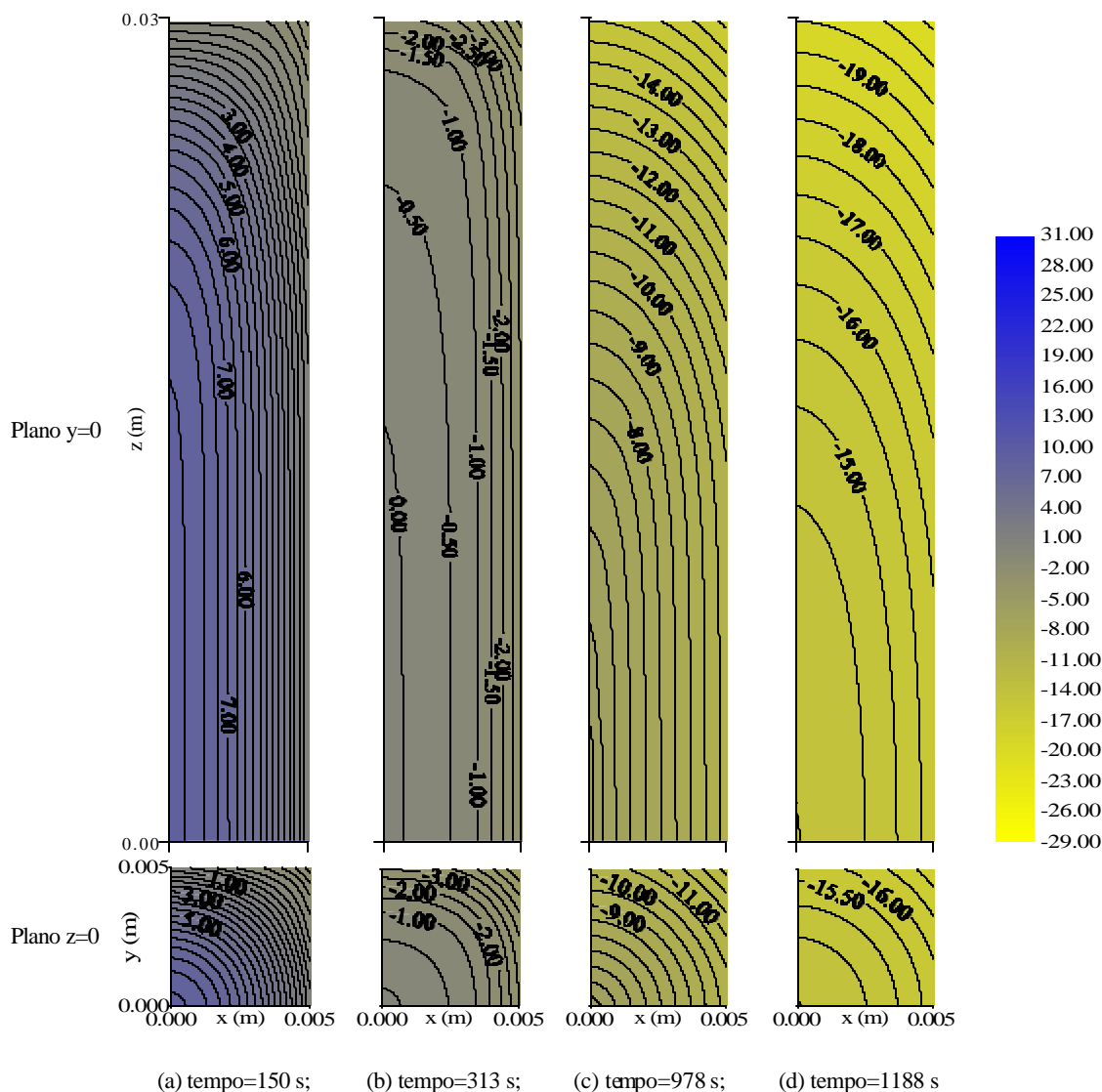


Figura 4. Perfis de temperatura no interior da batata

4. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos conclui-se que: (a) a modelagem matemática e a técnica usada na resolução da equação governante foram adequadas e têm grande potencial, verificado pela comparação entre as temperaturas calculadas com aquelas medidas experimentalmente. Desta forma, podem ser utilizadas para estimar a condutividade e difusividade térmica de qualquer material, sem restrições à natureza, estrutura, teor de umidade e outras características; (b) Os coeficientes de transporte obtidos para fatias de batata foram: $k=0,47 \text{ W.(m.}^\circ\text{C)}^{-1}$ no período de pré-congelamento e de $0,98 \text{ W.(m.}^\circ\text{C)}^{-1}$ no período de pós-congelamento, e $h=52,0 \text{ W.(m}^2\text{.}^\circ\text{C)}^{-1}$, para uma temperatura do ar refrigerante de $-29,1 \text{ }^\circ\text{C}$; (c) os maiores gradientes de temperatura foram encontrados próximo a superfície do material e em torno do vértice do paralelepípedo, região esta onde inicia o congelamento da água no sólido avançando para o centro do mesmo.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, CNPq e FAPESP pelo suporte financeiro a esta pesquisa, e aos pesquisadores referenciados que com seus estudos ajudaram no melhoramento deste trabalho.

6. Referências

- Ashrae Handbook, 1993, "Thermal Properties of Foods", American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- Ansari, F.A. and Afaq, A., 1986, "New method to measuring thermal diffusivity of spherical produce", International Journal of Refrigeration, Vol.9, No.3, pp.158-160.
- Ansari, F.A., Charan, V. and Varma, V.K., 1984, "Heat and mass transfer in fruits and vegetables and measurement of thermal diffusivity", International Communication in Heat and Mass Transfer, Vol.11, No.6, pp.583-590.
- Buhri, A.B. and Sigh, R.P., 1993, "Measurement of food thermal conductivity using differential scanning calorimetry", Journal of Food Science, Vol.58, No.5, pp.1145-1147.
- Chau, K. V. and Gaffney, J. J., 1990, "A finite-difference model for heat and mass transfer in products with internal generation and transpiration", Journal of Food Science, Vol.55, No.2, pp.484-487.
- Chuntranuluck, S., Wells, C.M. and Cleland, A.C., 1998, "Prediction of chilling times of foods in situations where evaporative cooling is significant – Part 1. Method development", Journal of Food Engineering, Vol.37, No.2, pp.111-125.
- Chuntranuluck, S., Wells, C.M. and Cleland, A.C., 1998, "Prediction of chilling times of foods in situations where evaporative cooling is significant – Part 2. Experimental testing", Journal of Food Engineering, Vol.37, No.2, pp.127-141.
- Chuntranuluck, S., Wells, C.M. and Cleland, A.C., 1998, "Prediction of chilling times of foods in situations where evaporative cooling is significant – Part 3. Applications", Journal of Food Engineering, Vol.37, No.2, pp.143-157.
- Delgado, A.E. and Sun, D. W., 2001, "Heat and mass transfer models for predicting freezing process – a review", Journal of Food Engineering, Vol.47, No.3, pp.157-174.
- Dincer, I. and Genceli, O.F., 1994, "Cooling process and heat transfer parameters of cylindrical products cooled both in water and air", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.37, No.4, pp.625-633.
- Fortuna, A.de O., 2000, "Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos – conceitos básicos e aplicações", Edusp, São Paulo.
- LeBlanc, D. I., Kok, R. and Timbres, G. E., 1990, "Freezing of a parallelepiped food product. Part 1. Experimental determination", International Journal of Refrigeration, Vol.13, No.6, pp.371-378.
- LeBlanc, D. I., Kok, R. and Timbres, G. E., 1990, "Freezing of a parallelepiped food product. Part 2. Comparison of experimental and calculated results", International Journal of Refrigeration, Vol.13, No.6, pp. 379-392.
- Limeira, R. da R., 2003, "Solidificação de ligas metálicas via método dos volumes finitos", Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Campina Grande/Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- Lin, Z., Cleland, A.C., Cleland, D.J. and Serrallach, G.F., 1996, "A simple method for prediction of chilling times: extension to three-dimensional irregular shapes", International Journal of Refrigeration, Vol.19, No.2, pp.107-114.
- López-Ramos, A., Palmisano, E., Dombey, A., Pimentel, J.A., Fayés D. and González-Mendizável, D., 1993, "Propiedades térmicas de frutas y hortalizas tropicales", Rev. Esp. Cienc. Tecnol. Aliment., Vol.33, No.3, pp.271-283.
- Maliska, C.R., 1995, "Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: Fundamentos e coordenadas generalizadas", LTC Editora S.A., Rio de Janeiro, Brasil, 424p.
- Marin, M., Rios, G.M. and Gibert, H., 1985, "Use of time-temperature data during fluidized bed freezing to determine frozen food properties", Journal of Food Process Engineering, Vol.7, No.4, pp.253-264.
- McDonald, K. and Sun, D., 2000, "Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review", Journal of Food Engineering, Vol. 45, No.2, p.55-65.

- Mohsenin, N.N., 1980, "Thermal properties of foods and agricultural materials", Gordon and Breach Science Publishers, New York, 407p.
- Nascimento, J.J.S., 2002, "Fenômeno de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos", Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba/Centro de Tecnologia, João Pessoa, Paraíba, Brasil, 181p.
- Patankar, S. V., 1980, "Numerical heat transfer and fluid flow, Ed. Hemisphere Publishing Corporation", New York. 80p.
- Tang, L., Johnson, A.T., 1989, "Mixed convection about fruit. ASAE paper", n.89-6121, 14p.
- Teruel Mederos, B. J., 2000, "Estudo teórico-experimental do resfriamento de laranja e banana com ar forçado", Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 290p.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 1995, "An Introduction to computational fluid dynamics – the finite volume method", Prentice Hall, London, 257p.

HEAT TRANSFER DURING COOLING AND FREEZING OF BIOLOGICAL PRODUCT WITH PARALLELEPIPED FORM THROUGH FINITE VOLUMES METHOD

Manassés Mesquita da Siva

Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, Dpto. Eng. Agrícola/CCT, CEP 58.109-970
gilson@dem.ufcg.edu.br

Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia

Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, Dpto. Eng. Agrícola/CCT, CEP 58.109-970
josi@deag.ufcg.edu.br

Antonio Gilson Barbosa de Lima

Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, Dpto. Eng. Mecânica/CCT, CEP 58.109-970
gilson@dem.ufcg.edu.br

***Abstract.** The cooling and freezing of biological products are preservation methods used in the food industry with the objective of maintaining the sensorial attributes and nutritious properties of those products. The knowledge of the transport properties and the temperature distribution inside these products are of fundamental importance for an optimized project of refrigeration systems. In this sense, this work presents a transient three-dimensional mathematical modelling to describe the heat transfer inside solids with parallelepiped shape including phase change. The governing equation was solved numerically using the finite-volumes technique and a implicit fully formulation. As application, the methodology was used to predict the heat transfer during the cooling, freezing and post-freezing of pre-processed potato. Numerical results of the temperature in the center of the product were compared to the experimental data reported in the literature and a good agreement was obtained. The heat transport coefficients were calculated for the cooling, freezing and post-freezing periods being used the least square error technique.*

Keywords: Heat, Parallelepiped, Finite-volume, Potato, Freezing.