

MODELAGEM DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E ESTUDO DO PROCESSO DE CONGELAMENTO POR CONVECÇÃO DE UM ALIMENTO

Fernando Strapasson

Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR
Rua Imaculada Conceição, 1155, CEP: 80215-901, Curitiba, PR, Brasil

Álvaro Cesar Camargo do Amarante

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR
Rua Imaculada Conceição, 1155, CEP: 80215-901, Curitiba, PR, Brasil
alvaro.amarante@pucpr.br

Viviana Cocco Mariani

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR
Rua Imaculada Conceição, 1155, CEP: 80215-901, Curitiba, PR, Brasil
viviana.mariani@pucpr.br

Resumo. No presente trabalho foram pesquisadas equações clássicas para, em função da composição de um alimento, prever a temperatura inicial de congelamento e os parâmetros condutividade térmica e calor específico em função da temperatura. Aliando estas equações ao método de Tehgeov, que permite determinar a fração de gelo formada em temperaturas abaixo do ponto de congelamento inicial de um alimento, foi possível estabelecer as relações entalpia (H) em função da temperatura e a função de Kirchhoff (E) para o alimento em questão, por integração numérica da condutividade térmica variável com a temperatura. Após um código computacional unidimensional, em diferenças finitas explícita foi desenvolvido e implementado para resolver a equação da condução de calor em geometrias cilíndricas infinitas, em regime transiente, transformada pela introdução da entalpia e da função de Kirchhoff. Com o objetivo de validar o código computacional e ilustrar a utilização das equações de predição das propriedades termofísicas, associadas ao método numérico de simulação dos campos de temperatura durante o congelamento, foram empregados dados experimentais do congelamento de vagem exposta a diferentes velocidades de ar. O conhecimento prévio dos coeficientes de convecção, medidos por fluximetria, permitiram ter como incógnitas somente as propriedades termofísicas da vagem. Os resultados mostram que a associação do método de predição das propriedades termofísicas e a equação modificada de transferência de calor em regime transiente utilizadas neste trabalho permitem prever com razoável precisão a evolução da temperatura no interior de um alimento submetido ao processo de congelamento.

Palavras chave: congelamento, função de Kirchhoff, entalpia, convecção, alimentos

1. Introdução

A temperatura é um dos fatores importantes para conservação dos frutos e vegetais após a colheita. Quando a temperatura é elevada acelera o metabolismo do alimento levando-os a uma deterioração mais rápida, promovendo a transpiração mais intensa e propiciando um ambiente ideal para o desenvolvimento de microorganismos patogênicos. Assim, a investigação, tanto experimental como numérica, da refrigeração ou congelamento de alimentos após a colheita é primordial para a melhor conservação dos alimentos, reduzindo o metabolismo do produto, diminuindo a perda de água e controlando o crescimento de microorganismos.

A simulação numérica da transferência de calor transiente durante a mudança de fase, no congelamento ou descongelamento de um alimento, tem se tornado uma ferramenta poderosa para o próprio gerenciamento da cadeia de resfriamento dos alimentos. A predição precisa e instantânea da distribuição de temperatura nos alimentos é um passo indispensável para estratégias de controle e projeto de ótimos sistemas de refrigeração melhorando a segurança e qualidade do produto. Devido à importância prática destes problemas de transferência de calor, altamente não lineares, muitas pesquisas têm sido dedicadas para desenvolver modelos físicos apropriados descrevendo tais fenômenos de transferência de calor e buscando técnicas numéricas avançadas para resolvê-los.

Ao se considerar os processos de congelamento e descongelamento de alimentos o mecanismo dominante na transferência de calor é a condução. Os problemas de condução envolvendo mudança de fase, chamados problemas de Stefan, pertencem a uma classe mais geral de problemas de fronteira livre. Um primeiro grupo de métodos numéricos para resolver tais problemas é baseado no tratamento da fronteira livre na mudança de fase usando técnicas complicadas para localização da posição da interface a cada novo passo de tempo (Crank, 2004). Geralmente estes métodos têm uma baixa taxa de convergência levando a complicações adicionais quando geometrias multidimensionais são consideradas.

Um segundo grupo de métodos numéricos, mais flexível, não aborda diretamente a posição exata da fronteira livre durante a mudança de fase. A mudança de fase é incorporada nas características termofísicas dependentes da temperatura, assim as equações governantes são resolvidas em um domínio fixo. Esta será a abordagem adotada neste trabalho.

A mudança de fase nos alimentos sólido/líquido ocorre progressivamente em um finito e aproximadamente bem definido intervalo de temperaturas. As duas fases não são claramente separadas e ambas coexistem em uma parte finita do alimento em um dado instante. Neste intervalo as propriedades térmicas como condutividade térmica (k) e calor específico (c) podem ser aproximadas por funções contínuas por partes e dependentes da temperatura, T . Geralmente o calor específico exibe uma forma aguda na temperatura de mudança de fase, temperatura crítica, já a condutividade térmica tem uma variação mais regular. Expressões algébricas para o calor específico e condutividade térmica, respectivamente, $c(T)$ e $k(T)$, para alimentos específicos são frequentemente encontradas na literatura no formato de tabelas (Alhama e Fernández, 2002; Zueco *et al.*, 2004).

As dependências citadas no parágrafo anterior bem como as condições de contorno, de convecção ou radiação, fazem com que estes problemas sejam não-lineares. Alguns métodos numéricos baseados geralmente nas técnicas de diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos obtém a solução usando apenas uma equação governante para ambas as fases. Cada um destes métodos tem suas vantagens e desvantagens o que não será citado neste trabalho.

O uso da temperatura como variável dependente é limitada pelo critério de estabilidade desde que o incremento no tempo deve ser maior para evitar oscilações causadas pela forma aguda da curva do calor específico. Por outro lado o uso da variável entalpia (H), conhecida como formulação entálpica, necessita do conhecimento da dependência da entalpia com a condutividade térmica e a temperatura (Mannapperuma e Singh, 1988; Amarante e Lanoisellé, 2005). Outra opção é o uso da função de Kirchhoff obtida através da integração da condutividade térmica em função da temperatura. Assim no presente trabalho será utilizada a função entalpia juntamente com a função de Kirchhoff.

O uso da entalpia volumétrica em substituição à relação de dependência entre calor específico e temperatura e o uso da função de Kirchhoff em substituição à relação de dependência entre a condutividade térmica e a temperatura são inovações interessantes na modelagem numérica da mudança de fase em um alimento. Elas permitem reduzir as oscilações dos resultados computacionais, principalmente em regiões próximas à superfície do produto.

Assim, neste trabalho com o objetivo de validar e ilustrar o emprego das equações de predição das propriedades termofísicas, associadas ao método numérico de simulação dos campos de temperatura durante o congelamento, foram empregados dados experimentais do congelamento da vagem exposta a diferentes velocidades de ar.

O conhecimento prévio dos coeficientes de convecção para as condições de escoamento nos experimentos, medidos por fluximetria, permitiram ter como incógnitas somente as propriedades termofísicas da vagem. Os resultados numéricos permitiram prever com razoável precisão a evolução da temperatura no interior da vagem submetida ao processo de congelamento.

2. Modelagem Matemática

Para formulação do modelo que governa o fenômeno de transferência de calor na vagem as seguintes hipóteses foram assumidas:

1. A condução ou difusão de calor é o mecanismo predominante;
2. A vagem é representada por um cilindro infinito com comprimento L [m] e raio R [m] definido entre $[0; 0,0295]$, onde $R \ll L$, assim a transferência de calor longitudinal é desprezada e a simetria axial é considerada, devido à existência de gradientes de temperatura no interior da vagem;
3. A temperatura do produto na superfície está em equilíbrio com a temperatura do ar de congelamento;
4. O coeficiente de difusividade térmica é variável com a temperatura durante o processo de congelamento;
5. A vagem é considerada homogênea, isto é, a temperatura inicial é uniformemente distribuída no seu interior;

O processo de difusão de temperatura na vagem pode ser modelado pela equação diferencial parcial da condução de calor baseada na lei de Fourier (Incropera e DeWitt, 1998) juntamente com as condições de contorno e inicial, presentes no fenômeno em estudo. De acordo com as hipóteses anteriores a equação geral da condução de calor, em coordenadas cilíndricas, que rege o fenômeno de transferência de calor no interior da vagem, para $0 \leq r \leq R$ e $t > 0$ é descrita como,

$$\rho(T(r,t))c_p(T(r,t))\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rk(T(r,t))\frac{\partial T(r,t)}{\partial r}\right), \quad (1)$$

onde r é a componente radial [m], t é o tempo [s], $T(r,t)$ é a temperatura [°C], $\rho(T(r,t))$ [kg/m³] é a densidade, $c_p(T(r,t))$ [J/kg°C] é o calor específico a pressão constante, $k(T(r,t))$ [W/m°C] é a condutividade térmica. As seguintes condições inicial e de contorno são adotadas:

$$T(r,t) = 26^\circ\text{C}, \quad r > 0 \text{ e } t = 0, \quad (2)$$

$$k(T(r,t)) \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = 0, r = 0 \text{ e } t > 0, \quad (3)$$

$$k(T(r,t)) \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = h(T_\infty - T_s(r,t)), r = R \text{ e } t > 0, \quad (4)$$

onde T_∞ [°C] é a temperatura ambiente, T_s [°C] é a temperatura na superfície da vagem, h [W/m²C] é o coeficiente de transferência de calor na superfície.

Executando uma mudança de variável na Eq. (1) a densidade e o calor específico dependentes da temperatura podem ser removidos através da introdução da entalpia específica volumétrica, H [J/m³],

$$H(T(r,t)) = \int_{T^*}^T \rho(T(r,t)) c_p(T(r,t)) dT, \quad (5)$$

onde T^* [°C] é a temperatura de referência que corresponde ao valor nulo de H (Scheerlinck *et al.*, 2001). Com a introdução da entalpia tem-se a formulação entálpica. De forma semelhante, a condutividade térmica dependente da temperatura pode ser removida usando a transformação de Kirchhoff, E [W/m], (Fikiin, 1996),

$$E(T(r,t)) = \int_{T^*}^T k(T(r,t)) dT. \quad (6)$$

Usando as Eqs. (5) e (6) na Eq. (1) tem-se,

$$\frac{\partial H(T(r,t))}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E(T(r,t))}{\partial r} \right). \quad (7)$$

No presente trabalho utilizou-se na simulação numérica a Eq. (7) juntamente com as seguintes condições iniciais e de contorno:

$$H(T(r,t)) = H_0; r > 0 \text{ e } t = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial E(T(r,t))}{\partial r} = 0; r = 0, t \geq 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial E(T(r,t))}{\partial r} = h(T_\infty - T_s(r,t)); r=R, t \geq 0, \quad (10)$$

onde H_0 [J/m³] é a entalpia conhecida no tempo inicial obtida através do experimento.

3. Metodologia Numérica

O método das diferenças finitas foi utilizado para resolver numericamente a equação que governa o fenômeno de condução de calor na vagem. Fez-se uso do balanço de energia nos nós da malha uniforme elementar finita. Uma região representativa da geometria da vagem, aproximada por um cilindro infinito, $L \gg r$, utilizada neste trabalho é apresentada na Fig. 1.

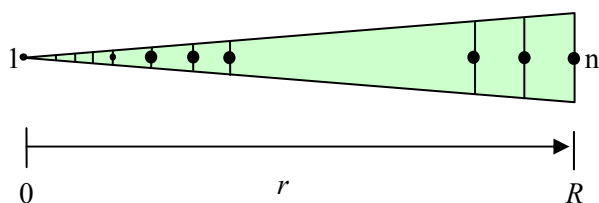


Figura 1 - Representação radial na vagem.

O balanço de energia, na Eq. (7), para cada um dos elementos i localizados no interior da malha numérica entre os níveis de tempo j a $j+1$ pode ser escrito conforme (Smith, 1985) e a solução é apresentada a seguir.

Para o ponto nodal $i = 1$ (no centro da vagem) tem-se a condição de simetria, Eq. (9) juntamente com o uso da série de Maclaurin obtém-se,

$$\frac{H^{j+1} - H^j}{\Delta t} = \frac{4}{\Delta r^2} (E_{i+1} - E_i). \quad (11)$$

Para o ponto nodal $i = n$ (na superfície externa da vagem) tem-se a condição de convecção, Eq. (10), que resulta em,

$$\frac{H^{j+1} - H^j}{\Delta t} = \frac{1}{r_i \Delta r^2} \left[r_{i+1/2} \Delta r h (T_\infty - T_S) - r_{i-1/2} (E_i - E_{i-1}) \right]. \quad (12)$$

Para os demais pontos nodais internos ($i = 2$ a $n-1$) tem-se,

$$\frac{H^{j+1} - H^j}{\Delta t} = \frac{1}{r_i \Delta r^2} \left[r_{i+1/2} (E_{i+1} - E_i) - r_{i-1/2} (E_i - E_{i-1}) \right]. \quad (13)$$

4. Predição das Propriedades Térmicas

As propriedades termofísicas são significativamente dependentes da fração de gelo formado em uma determinada temperatura. Para prever a fração de gelo formado abaixo da temperatura de início de congelamento da vagem foi utilizada a Eq. (14), estabelecida empiricamente por Tchigeov (1979), a qual é geralmente aceita e recomendada pela ASHRAE (2002).

$$X_{gelo} = \frac{1,105 \cdot X_{wtot}}{1 + \frac{0,8765}{\ln(T_{cc} - T + 1)}} \quad (14)$$

onde X_{gelo} é a fração mássica de gelo formada na temperatura T [°C], X_{wtot} é a fração mássica total de água do produto no estado não congelado e T_{cc} [°C] é a temperatura de início de congelamento.

As predições das propriedades calor específico $c(T)$ e condutividade térmica $k(T)$ foram baseadas nas equações destas propriedades para os componentes isolados do produto (proteínas, lipídios, carboidratos, fibras, cinzas, água e gelo), obtidas do trabalho de compilação destas equações elaborado por Choi e Okos (1986). A propriedade $k(T)$ foi obtida usando-se a média aritmética entre a condutividade do produto calculada usando-se os modelos série e paralelo segundo a metodologia apresentada por Murakami e Okos (1989). Para a obtenção de $c(T)$ foi usado um modelo aditivo das propriedades isoladas, tomando em consideração a participação em massa de cada componente no produto. Conhecendo-se a função $c(T)$, foi possível estabelecer a função entalpia $H(T)$ empregando-se a Eq. (15) (Fikiin e Fikkin, 1999),

$$H(T) = m_{MS} \int_{-40}^T c_{MS} dT + m_{wnc} \int_{T_{cc}}^T c_w dT + \int_{-40}^{T_{cc}} m_{wnc}(T) c_w(T) dT + m_{gelo}(T) H_L + \int_{-40}^{T_{cc}} m_{gelo}(T) c_{gelo}(T) dT. \quad (15)$$

onde m [kg/kg] é a fração mássica do componente, e os índices MS representam a matéria seca, wnc a água não congelada, w relativo à água, e $gelo$ à fração de gelo formada após a temperatura de início de congelamento T_{cc} .

Assim, a entalpia, $H(T)$, conforme Eq. (15), é variável com a temperatura e o mesmo pode-se afirmar sobre a temperatura, $T(H)$, que é variável com a entalpia, logo as seguintes expressões algébricas foram utilizadas no presente trabalho para a entalpia e a temperatura, respectivamente,

$$H(T) = \begin{cases} 70,93 + 2,01T - 314,33/T; & \text{se } T \in [-40; -0,8] \\ 384,775 + 4,33T; & \text{se } T \in [-0,8; 80] \end{cases} \quad (16)$$

$$T(H) = \begin{cases} -0,0022H^2 + 0,5823H - 42,383; & \text{se } H \in [0; 84,6) \\ 0,1428H - 21,315; & \text{se } H \in [84,6; 107,22) \\ 0,0518H - 11,549; & \text{se } H \in [107,22; 165,19) \\ 0,0093H - 4,5391; & \text{se } H \in [165,19; 384,78) \\ 0,2387H - 92,847; & \text{se } H \in [384,78; 1000) \end{cases} \quad (17)$$

A Fig. 2 ilustra o comportamento da condutividade térmica da vagem com a variação da temperatura notando que há uma queda abrupta da condutividade térmica em um intervalo bem definido de temperaturas. Assim, ao usar a formulação numérica dependente da condutividade térmica tal oscilação pode não ser percebida dependendo do passo de tempo que é utilizado na simulação. Para evitar a obtenção de soluções não realísticas ou com muitas oscilações opta-se então pelo uso da função de Kirchhoff apresentada pela Eq. (6).

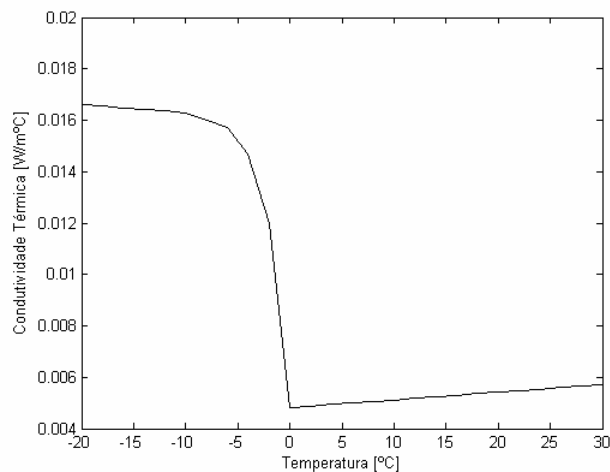


Figura 2 – Condutividade térmica da vagem.

A Fig. 3 ilustra o comportamento da entalpia em função da temperatura onde nota-se que a entalpia é representada por uma curva contínua, o mesmo não ocorrendo para o calor específico que apresenta uma descontinuidade próxima da temperatura crítica de congelamento. Assim, optou-se pelo uso da entalpia que substitui a descontinuidade presente na curva do calor específico. A Fig. 4 apresenta a relação da função de Kirchhoff para a vagem com a variação da temperatura, tal função foi obtida através da integração da condutividade térmica variando com a temperatura, onde percebe-se que a função é contínua e monotônica.

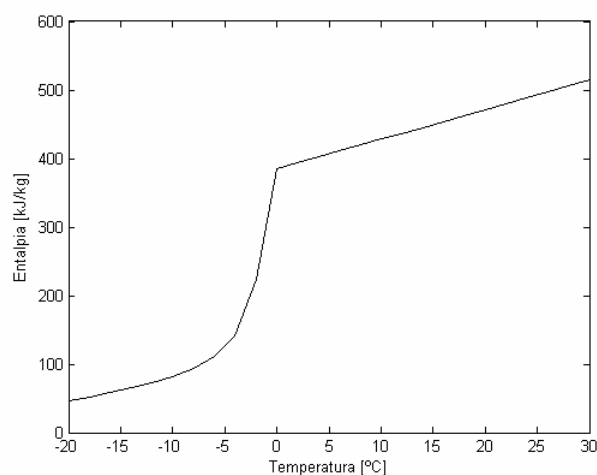


Figura 3 – Entalpia da vagem.

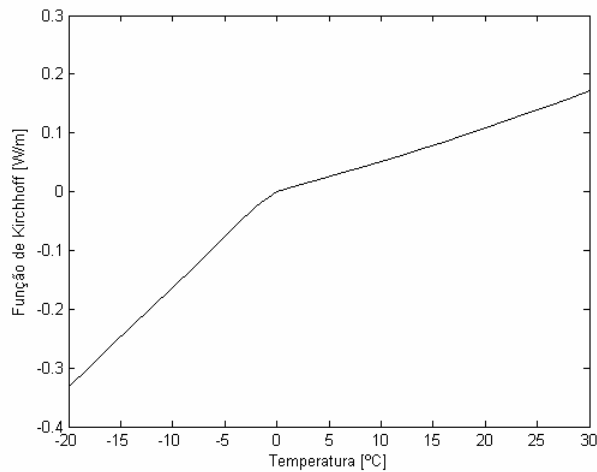


Figura 4 – Função de Kirchhoff para a vagem.

5. Resultados Numéricos

Com o objetivo de validar e ilustrar o emprego das equações de predição das propriedades termofísicas, associadas ao método numérico de simulação dos campos de temperatura durante o congelamento, foram empregados dados experimentais do congelamento da vagem exposta a diferentes velocidades de ar. De acordo com a velocidade do ar obteve-se experimentalmente, através do uso de fluxímetro, o coeficiente de transferência de calor (h) na superfície da vagem, alguns destes dados para a vagem são indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficiente de transferência de calor na superfície da vagem durante o congelamento.

| Velocidade [m/s] | h [W/m ² °C] |
|------------------|---------------------------|
| 0 | 17,44 ± 2,52 |
| 1 | 39,36 ± 4,64 |
| 3 | 84,19 ± 9,62 |
| 5 | 106,64 ± 16,08 |
| 7 | 127,49 ± 10,66 |

O conhecimento prévio dos coeficientes de convecção para as condições de escoamento nos experimentos, medidos por fluximetria, permitiram neste trabalho ter como incógnitas as propriedades termofísicas da vagem que foram obtidas através de equações de predição disponíveis na literatura e descritas na seção anterior.

A solução numérica foi obtida utilizando o método de diferenças finitas explícito. Uma malha numérica formada por 10 pontos nodais, estes armazenados nas faces, foi utilizada. O objetivo principal deste trabalho é validar os resultados experimentais através dos resultados numéricos. Assim, em um primeiro momento não foram feitos estudos do refino da malha (Δr) e da variação do tempo (Δt), bem como os esquemas: implícito e de Crank-Nicolson não foram utilizados na solução numérica. Acredita-se que a precisão da solução numérica não foi prejudicada pela adoção do método explícito, conforme verificado no trabalho de Cleland e Earle (1984). Ao usar um esquema explícito deve-se ter cuidado para o mesmo não violar o critério de estabilidade, e este critério não foi violado.

A Fig. 5 ilustra o comportamento numérico e experimental do congelamento da vagem usando a velocidade 1[m/s], conforme apresentado na Tabela 1. Nota-se na Fig. 5 que os resultados obtidos usando a função de Kirchhoff, Eq. (8), se aproximam mais dos resultados experimentais que os resultados numéricos sem o uso da função de Kirchhoff, Eq. (6), apesar das soluções numéricas serem semelhantes.

Acredita-se que a semelhança entre as soluções numéricas aconteceu porque o passo de tempo, Δt , utilizado nas simulações numéricas é pequeno (0,025 [s]) e o tempo de congelamento da vagem também é rápido, contudo este tempo é altamente dependente da velocidade e conseqüentemente do coeficiente de transferência de calor por convecção o que será ilustrado na Fig. 6, para os dados apresentados na Tabela 1. No restante do trabalho optou-se pelo uso da função de Kirchhoff já que a solução numérica aproxima-se mais da experimental. Sabe-se que tal função é vantajosa principalmente próxima à superfície do alimento onde as oscilações são maiores, contudo devido à vagem ter um diâmetro pequeno tal temperatura não foi possível de ser obtida experimentalmente, apenas no centro do produto obteve-se os dados experimentais da temperatura.

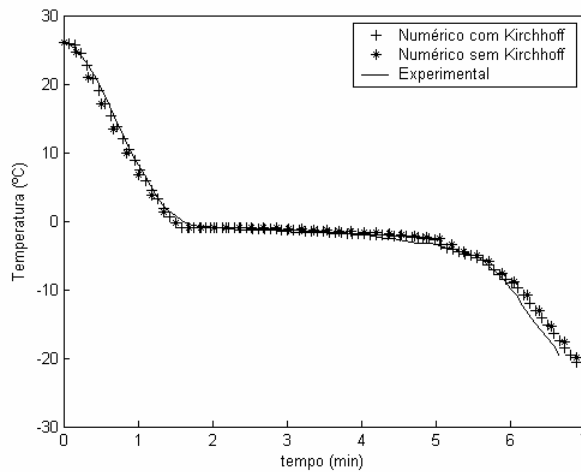


Figura 5 – Simulação numérica com e sem o uso da função de Kirchhoff para o congelamento da vagem.

Percebe-se na Fig. 6 que a formulação usando a função de Kirchhoff consegue prever satisfatoriamente os resultados experimentais para a maior parte das velocidades utilizadas. A mudança de fase nos alimentos sólido/líquido ocorre progressivamente em um finito e aproximadamente bem definido intervalo de temperaturas, o que pode ser observado na Fig. 7. Neste intervalo as duas fases não são claramente separadas e ambas coexistem em uma parte finita do alimento em um dado instante, após este platô a temperatura volta a cair até o completo congelamento do produto. A Fig. 7 ilustra o comportamento da temperatura no interior do produto para a velocidade do ar de congelamento nula.

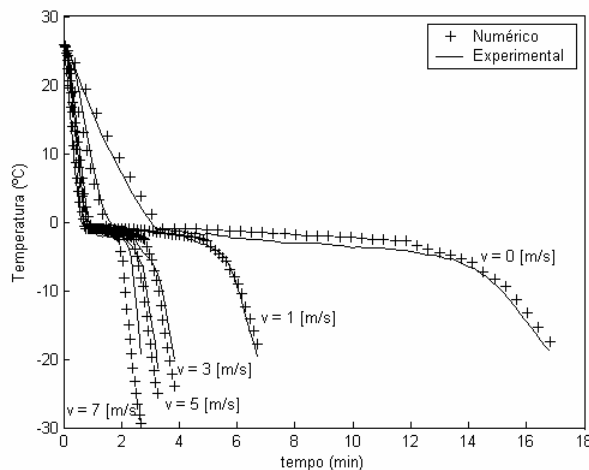


Figura 6 – Perfis de temperatura durante o congelamento da vagem para diferentes velocidades do ar de resfriamento.

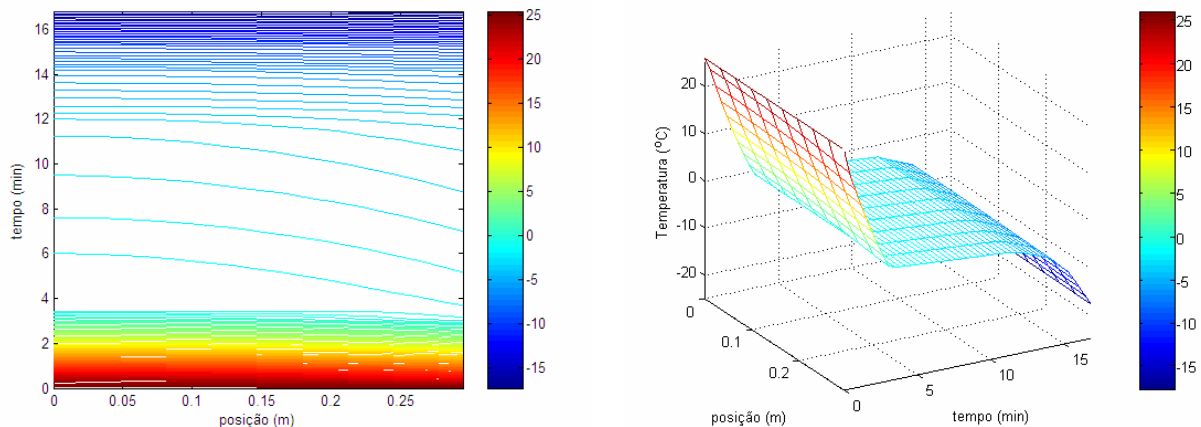


Figura 7. Perfis de temperatura durante o congelamento ao longo do raio da vagem para $v = 0$ [m/s].

6. Conclusões

O uso de equações de predição das propriedades termofísicas baseadas exclusivamente na composição de um alimento foi testado no âmbito deste trabalho. Estas propriedades foram desenvolvidas na forma de funções tendo por variável dependente a temperatura. O uso da entalpia e da função de Kirchhoff são inovações interessantes na modelagem numérica da mudança de fase em um alimento, permitindo reduzir as oscilações dos resultados computacionais, principalmente em regiões próximas à superfície do produto. Tal efeito não foi observado neste trabalho porque a vagem possui diâmetro pequeno e assim a temperatura experimental foi obtida apenas no centro do alimento. O emprego destas funções associadas a um código computacional numérico para resolver a equação de condução de calor em regime transiente com mudança de fase mostrou ser possível prever com razoável precisão a evolução da temperatura em um alimento sendo submetido ao processo de congelamento. Também percebeu-se que com o aumento da velocidade do ar de congelamento há um aumento considerável no coeficiente de transferência de calor por convecção, h , possibilitando que o alimento seja congelado mais rapidamente.

7. Agradecimentos

O primeiro autor agradece o suporte financeiro recebido através de uma bolsa PIBIC do CNPq.

8. Referências

- Alhama, F., Fernández, C. F. G., 2002, "Transient thermal behavior of phase-change processes in solid foods with variable thermal properties", *Journal of Food Engineering*, Vol. 54, p. 331-336.
- Amarante, A., Lanoisellé, J-L., 2005, "Heat transfer coefficients measurement in industrial freezing equipment by using heat flux sensors", *Journal of Food Engineering*, Vol. 66, pp. 377-386.
- ASHRAE, 2002, "Ashrae Handbook: Refrigeration". Ashrae, Atlanta.
- Choi Y., Okos, M.R., 1986, "Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods". In: Le Maguer, M., Jelen, P. (Eds). *Food Engineering and Process Applications*, Elsevier Applied Science Publishers, London, pp. 93-101.
- Cleland, A. C., Earle, R. L., "Assessment of Freezing Time Prediction Methods", *Journal of Food Science*, Vol. 49, pp. 1034-1042.
- Crank, J., 2004, "The Mathematics of Diffusion", 2th ed., Oxford.
- Fikiin, K. A., 1996, "Generalized numerical modelling of unsteady heat transfer during cooling and freezing using an improved enthalpy *method* and quasi-one-dimensional formulation", *Int. J. Refrig.*, Vol. 19, nº 2, pp. 132-140.
- Fikiin, K.A., Fikkin A.G., 1999, "Predictive equations for thermophysical properties and enthalpy during cooling and freezing of food materials", *Journal of Food Engineering*, Vol. 40, pp. 1-6.
- Incropera, F. P., DeWitt, D.P., 1998, "Fundamentos de Transmissão de Calor e de Massa", tradução da 4a. edição americana, Ed. Guanabara Koogan S.A, RJ, 1998.
- Mannapperuma, J. D., Singh, R. P., 1988, "Prediction of freezing and thawing times of foods using a numerical method based on enthalpy formulation", *Journal of Food Science*, Vol. 53, nº 2, pp. 626-630.
- Murakami, E. G., Okos M. R., 1989, "Measurement and prediction of thermal properties of foods". In: Singh, R. P. e Medina, A.G. (Eds). *Food Properties and Computer Aided Engineering of Food Processing Systems*, Academic Press, New York, pp. 3-48.
- Scheerlinck, N., Verboven, P., Fikiin, K. A., de Baerdemacker, J., Nicolaï, B. M., 2001, "Finite element computation of unsteady phase change heat transfer during freezing or thawing of food using a combined enthalpy and Kirchhoff transform method", *Transactions of the ASAE*, Vol. 44, nº 2, pp. 429-438.
- Smith, G. D., 1985, "Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods", 3th ed., Oxford.
- Zueco, J., Alhama, F., Fernández, C. F. G., 2004, "Inverse determination of the specific heat of foods", *Journal of Food Engineering*, Vol. 64, pp. 347-353.

MODELING OF THE THERMAL PROPERTIES AND STUDIES OF FREEZING PROCESS BY CONVECTION OF A FOOD

Fernando Strapasson

Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR
Rua Imaculada Conceição, 1155, CEP: 80215-901, Curitiba, PR, Brasil

Álvaro Cesar Camargo do Amarante

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR
Rua Imaculada Conceição, 1155, CEP: 80215-901, Curitiba, PR, Brasil
alvaro.amarante@pucpr.br

Viviana Cocco Mariani

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR
Rua Imaculada Conceição, 1155, CEP: 80215-901, Curitiba, PR, Brasil
viviana.mariani@pucpr.br

Abstract

In the present work classical equations were found in the literature, which were reported to predict the initial freezing temperature, the thermal conductivity and specific heat of a food product in function of its composition and temperature. These equations were coupled to the Tchigeov's method, which predicts the ice fraction formed below the freezing point for a food material. This procedure enabled the development of the functions enthalpy and Kirchhoff with respect to the temperature for the studied product by numerical integration. After was developed and implemented a computational code in finite differences to solve the transient heat transfer equation, transformed by the introduction of the enthalpy and Kirchhoff functions. With the objective to validate the code computational and to illustrate the use of the thermal properties prediction equations had been used surface heat transfer coefficients measured with fluxmeters. The previous knowledge of the heat transfer coefficients for convection mechanisms determined by using heat flux sensors coupled to temperature measurement devices had allowed to only have as variable the food thermal properties. The results show that the association of classical equations for predicting the thermophysical properties of a food material with the numerical solution of the modified transient heat transfer equation results in a useful method to predict the temperature evolution within a food product subjected to a freezing process.

Key-words: freezing, Kirchhoff function, enthalpy, convection, foods