

## ANÁLISE DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO RESFRIAMENTO/CONGELAMENTO DO MORANGO

**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

**Adriano da Silva**

Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais - PPGCA  
Universidade Comunitária Regional de Chapecó – UNOCHAPECÓ  
Rua Senador Atilio Fontana, 591 E, CEP: 89809-000, Chapecó, SC, Brasil  
adriano@unochapeco.edu.br

**Resumo.** Este trabalho analisa o campo transiente de temperatura presente no processo de resfriamento rápido e congelamento do morango por convecção. As propriedades termofísicas do morango, em um primeiro momento são mantidas constantes, para o processo de resfriamento e são variáveis com a temperatura, para o processo de congelamento. A equação que governa o fenômeno de transferência de calor transiente durante o processo de resfriamento do morango baseia-se na lei de Fourier em coordenadas esféricas unidimensional. Tal equação juntamente com as condições iniciais e de contorno é resolvida através do método de diferenças finitas. A modelagem matemática e numérica do processo de congelamento foi feita através de um modelo entálpico. A influência da modificação do coeficiente de transferência de calor é avaliada através dos perfis de temperatura no centro e na superfície do morango. A transferência de calor na superfície do morango é significativamente afetada pela modificação do coeficiente de transferência de calor, principalmente para o processo de congelamento. Os resultados mostram que 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 resfriamento ou congelamento.

**Palavras chave:** resfriamento, congelamento, coeficiente de transferência de calor, diferenças finitas, morango.

### 1. Introdução

A modelagem e simulação do resfriamento ou congelamento de um alimento é de extrema importância para o projeto, adaptação e otimização de congeladores industriais. Alguns métodos simples de modelagem, para geometrias regulares e para condições de contorno fixas e uniformes são encontrados na bibliografia. No entanto, o centro térmico dos produtos alimentícios é muito sensível à variação dos coeficientes de transferência de calor. Isto faz que o tempo de resfriamento ou congelamento dos alimentos submetidos a campos não uniformes de coeficientes de troca térmica possa sofrer acréscimos significativos.

Logo, como o tempo de resfriamento ou congelamento tem um impacto preponderante no dimensionamento de um sistema de resfriamento/congelamento, a simulação levando em conta a geometria do produto e a variabilidade dos coeficientes de transferência de calor poderá fornecer informações valiosas para o desenho e adaptação destes sistemas. Ademais, tempos estendidos de resfriamento/congelamento podem comprometer a segurança do alimento (elevados tempos de exposição a temperaturas propícias para o crescimento de microrganismos) e a qualidade do produto (crescimento de cristais de gelo de tamanho maior e/ou desidratação do produto).

Os campos variáveis de coeficientes de transferência de calor (variação do coeficiente local de transferência de calor) são encontrados principalmente em produtos processados na forma de produtos de grandes dimensões, o que não será considerado ainda neste trabalho. Assim, no presente trabalho primeiramente será desenvolvido um método de modelagem e simulação numérica do congelamento/resfriamento de um produto alimentício de pequenas dimensões e geometria regular, submetido a campo uniforme de coeficiente de troca térmica a fim de validar tal metodologia.

O morango foi escolhido porque no Brasil a produção do morango é voltada basicamente ao mercado interno, tanto para o consumo in natura como para a industrialização, cujos principais produtores são os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul. Apesar da produção e do consumo serem relativamente escassos Binotti (2000) observou que as perdas pós-colheita são grandes, indicando que o período entre a colheita e o início do resfriamento rápido do morango deve ser o mais breve possível, evitando a perda de qualidade e desperdícios. Devido a grande fragilidade do morango após a colheita e durante o período de comercialização e pela característica da planta apresentar um período de produção restrito, de junho a outubro, juntamente com a necessidade da preservação de suas qualidades nutritivas, torna-se necessário o desenvolvimento de tecnologias para a produção e conservação de produtos de boa qualidade

tanto no aspecto sensorial como nutritivo e econômico dentre os quais o resfriamento rápido é uma alternativa viável e vantajosa, tanto para a extensão da vida útil quanto para a manutenção da qualidade do produto *in natura*.

O resfriamento e o congelamento reduzem a taxa de respiração dos morangos, retardando a ação dos agentes deteriorantes e o amadurecimento após a colheita. Para melhorar ou propor novas tecnologias de resfriamento e congelamento é necessário o conhecimento dos processos físicos envolvidos o que pode ser feito experimentalmente ou com o auxílio de ferramentas matemáticas. O presente trabalho, visando estudar o processo de transferência de calor, baseado na lei de Fourier, utiliza a segunda abordagem alterando algumas propriedades térmicas do morango.

A validação do modelo matemático (unidimensional, em coordenadas esféricas) se dá através da comparação com resultados experimentais de resfriamento do morango (Binotti, 2000) extraídos do trabalho de (Pirozzi, 2002). Em um primeiro momento o coeficiente de transferência de calor por convecção,  $h$ , foi otimizado e as demais propriedades termofísicas do morango foram mantidas constantes. Em um segundo momento o processo de congelamento do morango é modelado com as propriedades termofísicas variáveis com a temperatura. Os resultados numéricos obtidos para o resfriamento do morango acompanham a solução experimental. A simulação computacional é menos dispendiosa que o experimento, mostrando-se uma promissora ferramenta para o desenvolvimento de equipamentos na área de resfriamento.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma. Na próxima seção é descrito o modelo matemático e físico para resolver a transferência de calor durante o resfriamento/congelamento do morango. Na seção 3 apresenta-se a discretização numérica via método das diferenças finitas da equação de Fourier e do modelo entálpico. Na quarta seção os principais resultados numéricos obtidos na realização deste trabalho são expostos, mostrando uma boa concordância com os resultados experimentais. A última seção é destinada as principais conclusões e trabalhos futuros.

## 2. Modelo Matemático e Físico

Através da lei de Fourier, a equação diferencial parcial é obtida fazendo um balanço de calor sobre uma região (volume elementar) do morango, a forma desta região depende do sistema de coordenadas adotado. Assim, o problema de condução de calor não linear, em coordenadas esféricas, sem geração interna de calor, considerando a condutividade térmica, o calor específico e a densidade do morango, constantes, pode ser descrito em um domínio espacial  $\Omega$  pela Eq. (1),

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \tag{1}$$

tal equação será usada para modelar o resfriamento do morango, onde  $\alpha (= k/\rho c_p, \text{ m}^2/\text{s})$  é a difusividade térmica do morango,  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) é a densidade do morango,  $c_p$  ( $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ) é o calor específico aparente do morango,  $k$  ( $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$ ) é a condutividade térmica do morango,  $T$  ( $^\circ\text{C}$ ) é a temperatura no interior do morango e  $t$  (s) é o tempo.

No presente trabalho é considerada uma geometria unidimensional no sistema esférico de coordenadas, conforme ilustrado na Fig. 1, onde a condição inicial associada a Eq. (1) é:

$$T(r, t) = T_0 \quad \text{em } t = t_0, r \in [0, R] \tag{2}$$

onde  $T_0$  ( $^\circ\text{C}$ ) é a temperatura conhecida no tempo inicial obtida geralmente através de dados experimentais,  $t_0$  (s) é o tempo inicial e  $R$  (m) é o raio do morango.

Considerou-se neste trabalho uma temperatura inicial constante em todos os pontos nodais do domínio e utilizando o valor  $17^\circ\text{C}$  conforme extraído do trabalho de Binotti (2000), contudo naquele trabalho a temperatura inicial dos morangos foi medida apenas no centro (em  $r = 0$ ) e estas ficaram no intervalo [ $13,82^\circ\text{C}$ ;  $17,20^\circ\text{C}$ ].

Na superfície do morango ( $r = R$ ) a condição de contorno convectiva é considerada, onde apenas o coeficiente de transferência de calor é considerado porque segundo Pirozzi e Amendola (2002) o coeficiente de transferência de massa é muito pequeno não interferindo na simulação,

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_R - T_\infty) \quad \text{em } r = R; t \geq 0 \tag{3}$$

onde  $T_\infty = 0$  ( $^\circ\text{C}$ ) é a temperatura ambiente na câmara de resfriamento,  $T_R$  ( $^\circ\text{C}$ ) é a temperatura na superfície do morango e  $h$  ( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ) é o coeficiente de transferência de calor na superfície do morango.

Considerou-se no centro do morango a condição de simetria ou fluxo de calor nulo,

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{em } r = 0, t \geq 0 \tag{4}$$

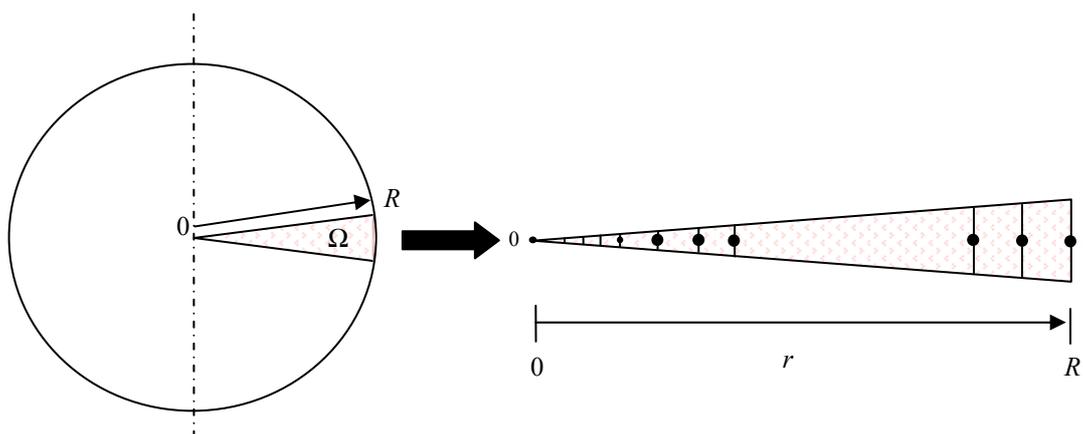


Figura 1 - Domínio computacional.

### 3. Discretização Numérica

O método das diferenças finitas explícito foi utilizado para resolver numericamente a equação (1) que governa o fenômeno de transferência de calor no morango. Esquemas implícito e de Crank-Nicolson não foram utilizados na solução numérica, tal análise poderá ser feita em outro trabalho. Acredita-se porém que a precisão da solução numérica não foi prejudicada pela adoção do método explícito apenas o tempo computacional poderia ter sido menos dispendioso, contudo em tais simulações numéricas o tempo computacional não é grande.

Fez-se uso do balanço de energia nos nós da malha uniforme elementar finita. Uma região representativa da geometria do morango, aproximada por uma esfera de raio  $R$  (m) utilizada neste trabalho é apresentada na Fig. 1, onde o espaço entre a superfície do morango ( $r = R, i = n$ ) e o centro ( $r = 0, i = 0$ ) está igualmente dividido, onde o índice  $i$  indica a localização dos pontos nodais na direção radial e  $n$  é o último ponto nodal na direção radial.

O balanço de energia, na Eq. (1), para um elemento  $i$  localizado no interior da malha numérica entre os níveis de tempo  $j$  a  $j+1$  pode ser escrito conforme apresentado em Smith (1985),

$$T_i^{j+1} = FT_{i-1}^{j+1} + \left[1 - 2F - 2\frac{F\Delta r}{r}\right]T_i^j + \left[F + 2\frac{F\Delta r}{r}\right]T_{i+1}^j, \quad (5)$$

onde  $F = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta r^2}$  é o número de Fourier.

Para obter a temperatura no elemento nodal “0” utiliza-se a condição de simetria expressa na Eq. (4) surgindo,

$$T_0^{j+1} = T_1^{j+1}, \quad (6)$$

Um procedimento semelhante aos pontos nodais internos é executado para o elemento nodal 1. Assim, a Eq. (6) é substituída na Eq. (5) surgindo,

$$T_i^{j+1} = \left[1 - F - 2\frac{F\Delta r}{r}\right]T_i^j + \left[F + 2\frac{F\Delta r}{r}\right]T_{i+1}^j; i = 1. \quad (7)$$

A temperatura no ponto nodal  $n$  ( $r = R$ ) é obtida a partir da condição de contorno da Eq. (3), tal como segue,

$$T_i^{j+1} = \frac{\left[T_{i-1}^{j+1} + \frac{h\Delta r}{k}T_\infty\right]}{\left[1 + \frac{h\Delta r}{k}\right]}. \quad (8)$$

Para obter a temperatura no ponto nodal  $n-1$  substitui-se a Eq. (8) na Eq. (5) resultando em,

$$T_i^{j+1} = FT_{i-1}^{j+1} + \left[1 - 2F - 2\frac{F\Delta r}{r}\right]T_i^j + \left[F + 2\frac{F\Delta r}{r}\right] \frac{\left[T_{i-1}^{j+1} + \frac{h\Delta r}{k}T_\infty\right]}{\left[1 + \frac{h\Delta r}{k}\right]} \quad (9)$$

Após a discretização da Eq. (1), para o resfriamento do morango, é necessário escolher os valores apropriados aos parâmetros geométricos ( $\Delta r$ ,  $n$ ) e temporal ( $\Delta t$ ,  $nt$ ), onde  $nt$  é o último passo no tempo, bem como as propriedades térmicas do morango ( $k$ ,  $\alpha$ ) e o coeficiente de transferência de calor  $h$ . Assim, na próxima seção tais parâmetros são especificados juntamente com os resultados numéricos obtidos.

No congelamento do morango existe uma contínua modificação das propriedades termofísicas do produto em função da temperatura. Em função destas modificações no presente trabalho será utilizado um modelo entálpico (Scheerlinck *et al.*, 2001; Agnelli e Mascheroni, 2001).

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,  $H$  ( $J/m^3$ ),

$$H(T(r,t)) = \int_{T^*}^T \rho(T(r,t))c_p(T(r,t))dT. \text{ Assim, para o congelamento do morango obtém-se após a discretização da}$$

Eq. (1) com o modelo entálpico as seguintes equações para os nós no centro, meio e superfície do morango, respectivamente (Mannapperuma e Singh, 1988),

$$H_0^{j+1} = H_0^j + \frac{6\Delta t}{\Delta r^2}k_{1/2}(T_1^j - T_0^j) \quad (10)$$

$$H_i^{j+1} = H_i^j + \frac{\Delta t}{(i^2 + 1/12)\Delta r^2} \left[ (i + 1/2)^2 k_{i+1/2} (T_{i+1}^j - T_i^j) - (i - 1/2)^2 k_{i-1/2} (T_i^j - T_{i-1}^j) \right] \quad (11)$$

$$H_n^{j+1} = H_n^j + \frac{2\Delta t}{(n^2 - n/2 + 1/12)\Delta r^2} \left[ n^2 h \Delta r (T_\infty - T_n^j) - (n - 1/2)^2 k_{i-1/2} (T_1^j - T_0^j) \right] \quad (12)$$

#### 4. Resultados Numéricos

Os dados experimentais para o resfriamento do morango utilizados neste trabalho foram extraídos do trabalho de Pirozzi (2002) que apresentam os dados do experimento realizado por Binotti (2000), onde morangos são resfriados rapidamente com ar forçado. Binotti (2002) mediu a temperatura inicial no centro de 12 morangos, nos quais a temperatura variou entre [13,8; 17,2] °C enquanto a temperatura do ar de resfriamento,  $T_\infty$ , assumiu o valor de 0 °C; as temperaturas no centro dos 12 morangos,  $T_{exp}$ , foram medidas ao longo do resfriamento e são utilizadas no presente trabalho.

Neste trabalho considerou-se que o diâmetro da esfera (morango) equivale ao maior diâmetro do morango, que é o seu diâmetro longitudinal. Assim, utilizou-se o valor médio do maior diâmetro entre 60 morangos medidos experimentalmente por Binotti (2000), para dois testes efetuados. Logo foi utilizado para o raio  $R = 0,024526$  (m). Os valores utilizados para a condutividade térmica e a difusividade térmica do morango são, respectivamente, 0,54 ( $W/m^{\circ}C$ ) e  $1,72 \cdot 10^{-7}$  ( $m^2/s$ ) (Miles *et al.*, 1983). A temperatura inicial utilizada em todos os pontos nodais do morango é apresentada na Tab. 1 para 6 casos investigados em Binotti (2000) onde iniciou-se o processo de convecção forçada duas horas após a colheita da fruta.

Tabela 1. Temperatura inicial dos morangos.

Casos	Temperatura inicial (°C)
1	16,21
2	14,74
3	16,13
4	14,87
5	15,76
6	15,06

O coeficiente de transferência de calor,  $h$ , a priori foi obtido através do número de Nusselt,  $Nu$ , conforme segue,

$$h = \frac{k_a Nu}{d}, \quad (13)$$

onde  $k_a$  ( $= 0,0241 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) é a condutividade térmica do ar de resfriamento (Incropera e DeWitt, 1998),  $d$  ( $= 2R \text{ m}$ ) é o diâmetro do morango e o número de Nusselt é calculado a seguir,

$$Nu = 0,97 + 0,68(Re^{0,52})(Pr^{0,3}), \quad (14)$$

onde  $Pr$  ( $= 0,72$ ) é o número de Prandtl (Incropera e DeWitt, 1998) e  $Re$  é o número de Reynolds calculado conforme segue,

$$Re = \frac{\rho_a U d}{\mu}, \quad (15)$$

onde  $\rho_a$  ( $= 1,251 \text{ kg/m}^3$ ) é a densidade do ar de resfriamento,  $U$  ( $= 0,8 \text{ m/s}$ ) é a velocidade do ar de resfriamento (Binotti, 2000),  $\mu$  ( $= 176.10^{-7} \text{ Ns/m}^2$ ) é a viscosidade dinâmica do ar de resfriamento.

A partir das curvas experimentais de dispersão utilizou-se curvas de ajuste para a avaliação da influência do refino da malha nos resultados numéricos. Para determinar um ajuste adequado aos dados experimentais, foram utilizados o ajuste polinomial e exponencial e estes foram comparados com a curva experimental do primeiro caso. A curva que será utilizada para ajustar os dados experimentais foi selecionada tanto pela representatividade do fenômeno físico em questão quanto pelo valor do coeficiente de correlação múltipla (ou coeficiente de Pearson),

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (T(i) - T_{aj}(i))^2}{\sum (T(i) - \bar{T})^2} \quad (16)$$

onde  $k$  é o total de medidas para cada um dos casos analisados,  $T_{aj}(i)$  é a temperatura obtida pela curva de ajuste e  $\bar{T}$  é a média das temperaturas experimentais ou numéricas, conforme apresentado a seguir.

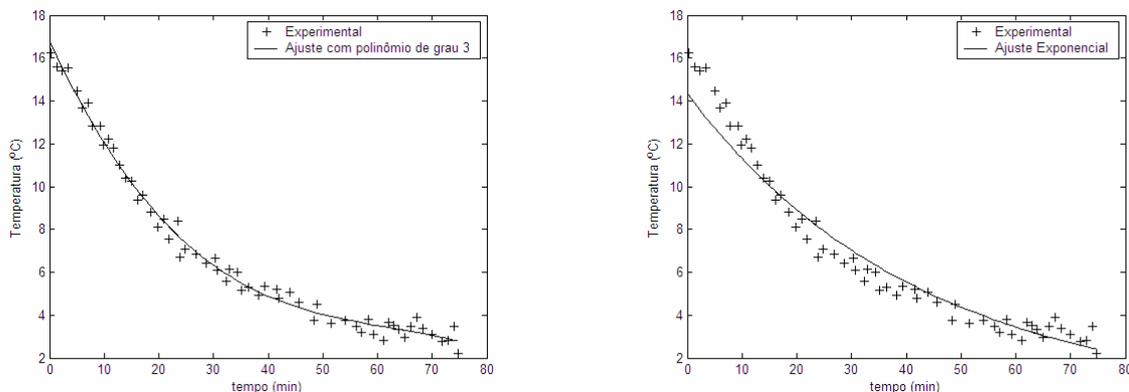


Figura 2 - Ajustes polinomial e exponencial para o caso 1.

Observando a Fig. 2 não é possível identificar diferenças significativas entre as curvas ajustadas, contudo os valores obtidos para o coeficiente de correlação múltipla são 0,991 e 0,9526, respectivamente. Analisando o coeficiente de correlação múltipla percebe-se que o ajuste com o polinômio de 3º grau fornece um valor mais próximo de 1 que o ajuste exponencial, porém este último ajuste será utilizado para cada um dos 6 casos investigados pela representatividade do fenômeno físico, já que a função é decrescente.

Na Fig. 3 apresenta-se o ajuste exponencial para cada um dos 6 casos investigados. Na Tab. 2 são apresentados os coeficientes obtidos para cada uma das funções exponenciais indicadas na Fig. 3 e o coeficiente de correlação múltipla. Nota-se que tais valores estão próximos de 1 exceto o segundo caso que obteve um resultado pouco inferior.

A estabilidade numérica da Eq. (1) é conseguida considerando o coeficiente do termo que acompanha  $T_i^j$  positivo. Como este coeficiente é dependente de  $\alpha$  (fixo),  $\Delta t$  e  $\Delta r$  é necessário escolher  $\Delta t$  e  $\Delta r$  de tal forma que esta condição seja satisfeita, isto é,

$$\Delta t < \frac{(i-1)\Delta r^2}{2i\alpha}; i = 1, \dots, n \quad (17)$$

obtendo um valor de  $\Delta t$  para cada ponto da malha e escolhendo o menor valor que satisfaça a Eq. (17) para todos os pontos nodais da malha. A escolha da malha numérica mais adequada foi feita através do cálculo do coeficiente de correlação múltipla entre a simulação numérica e a temperatura obtida pelo ajuste exponencial para o Caso 1.

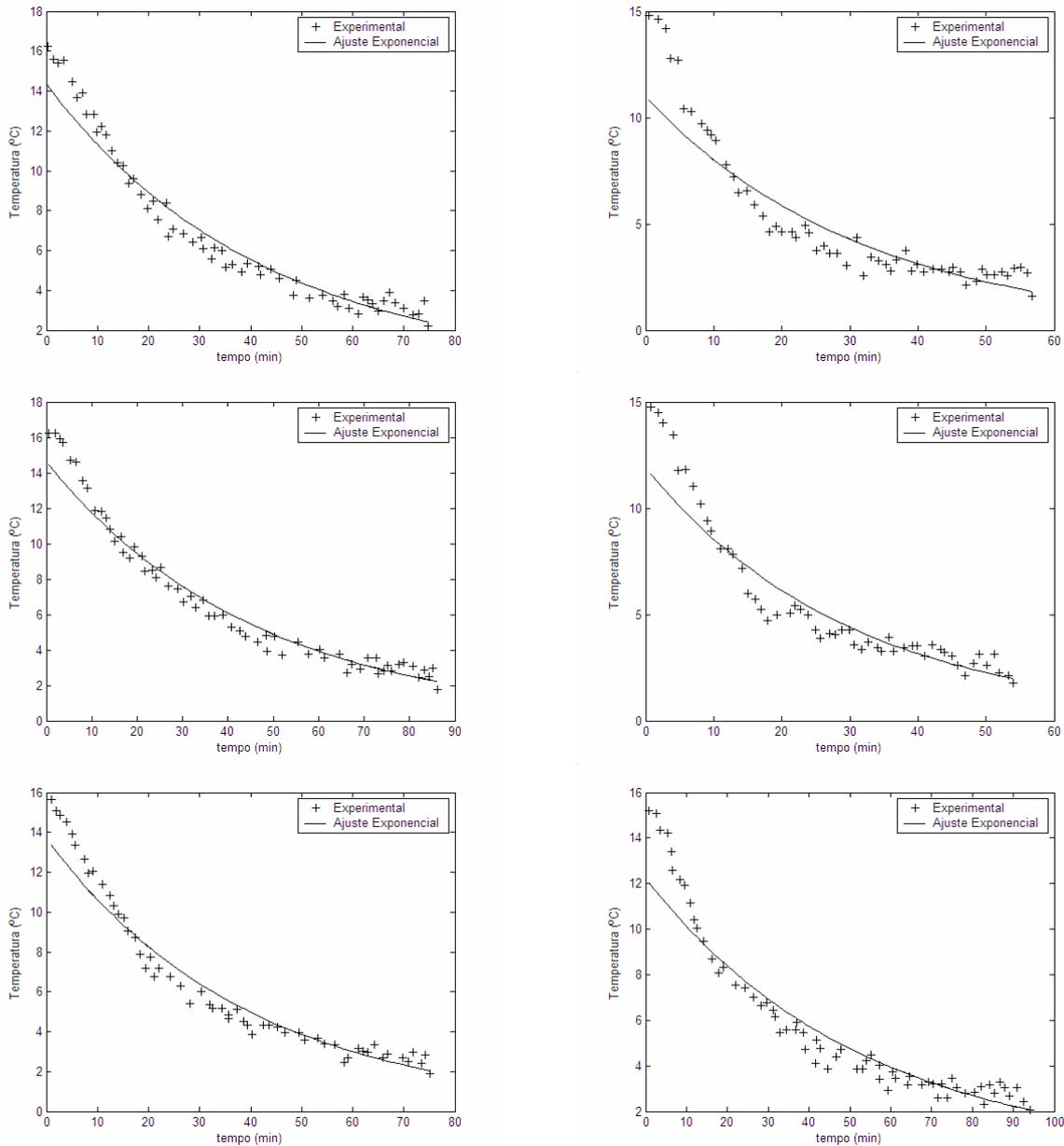


Figura 3. Ajuste exponencial para os 6 casos analisados.

Na Tab. 3 são apresentados os resultados obtidos para o refino da malha utilizando o Caso 1 para  $h = 21 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . A simulação numérica foi executada em um computador Intel Celeron, 1.20 GHz com 248 MB de RAM e o tempo (s) representa o tempo de processamento numérico obtido através do uso das funções *clock* e *etime* do Matlab. Observa-se nesta tabela que o refino da malha não garante o melhor coeficiente de correlação múltipla, valor 1. Para o Caso 1 a malha formada por 32 pontos nodais é a que produz o melhor  $R^2$  entre as temperaturas experimentais ajustadas pela função exponencial e as temperaturas numéricas, logo esta será a malha adotada para os demais casos investigados. Todas as malhas utilizadas para avaliar o Caso 1 tiveram um tempo de processamento considerado pequeno (tempo em segundos) se comparado com o tempo utilizado no experimento que durou aproximadamente 80 minutos para obter 7/8 do resfriamento do morango.

Na Fig. 4 estão ilustrados os perfis de temperatura experimental, ajustado e numérico para o Caso 1 com 4 diferentes malhas numéricas, onde nota-se que a malha formada por 32 pontos nodais é a mais adequada.

Tabela 2. Coeficientes do ajuste exponencial,  $T_{aj} = ae^{bt}$

Casos	$a$	$b$	$R^2$
Caso 1	14,346	-0,0238	0,9526
Caso 2	10,987	-0,0315	0,8714
Caso 3	14,613	-0,0219	0,9590
Caso 4	11,904	-0,0332	0,9147
Caso 5	13,684	-0,0253	0,9562
Caso 6	12,226	-0,0189	0,9214

Tabela 3. Análise do refino da malha ( $\Delta r$ ) e do tempo ( $\Delta t$ ) para o Caso 1 com  $h = 21$  (W/m<sup>2</sup>°C).

$n$	$\Delta r(m)$	$\Delta t(s)$	$nt$	tempo (s)	$R^2$
8	0,00350	31	155	0,001	0,255
16	0,00163	6	800	0,01	0,584
32	0,00079	1	4800	0,08	0,895
64	0,00039	0,4	12000	0,21	0,653
128	0,00019	0,108	44624	1,782	0,668

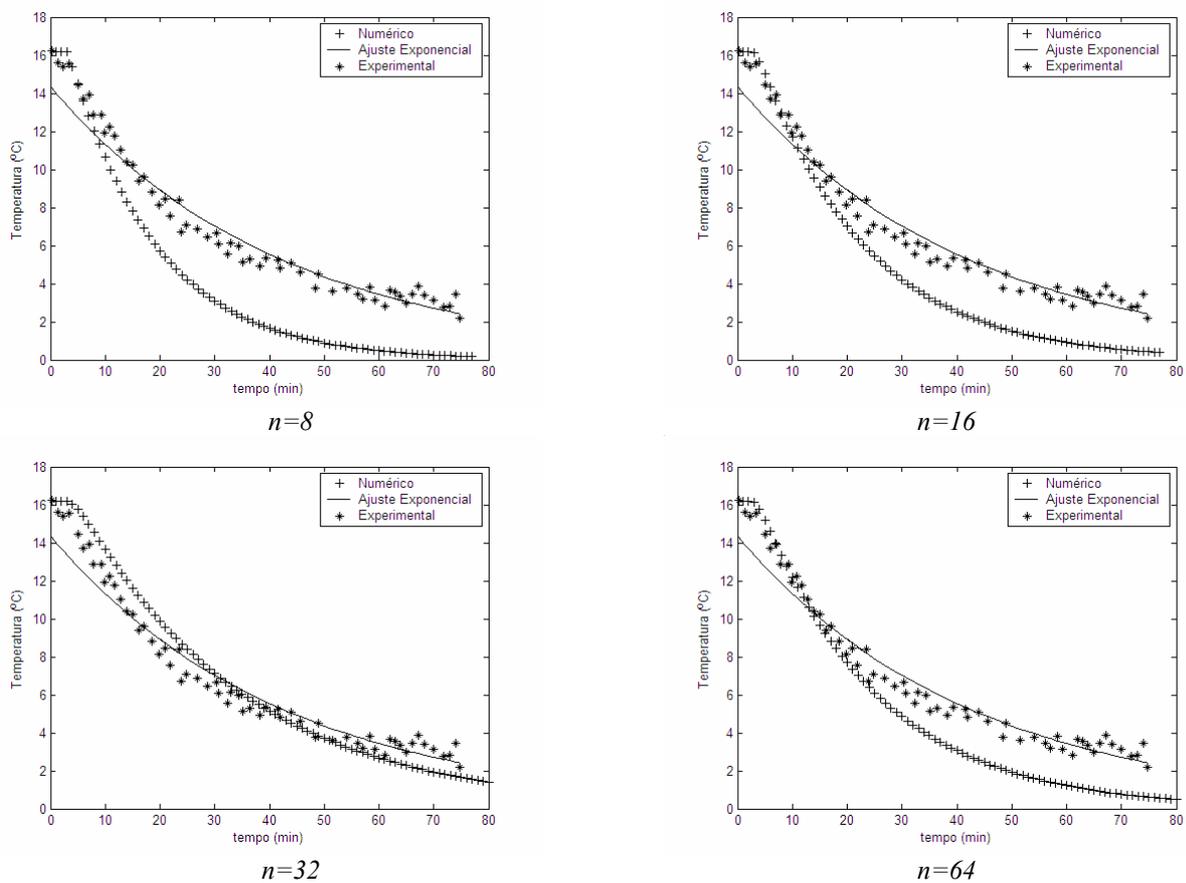


Figura 4. Comparação do refino da malha para o Caso 1.

Na Tab. 4 são indicados os valores obtidos para o coeficiente de correlação múltipla calculado pela Eq. (17) e os respectivos valores de  $h$ . Na Fig. 5 ilustra-se a solução gráfica obtida para cada valor de  $h$ , respectivamente, notando que o resultado numérico mais ajustado aos valores experimentais é obtido usando  $h = 21$  (W/m<sup>2</sup>°C) proposto por Binotti (2000).

Tabela 4. Avaliação do coeficiente de transferência de calor para o Caso 1,  $h$ , e  $R^2$

$h$ (W/m <sup>2</sup> °C)	$R^2$
16,5039 fornecendo $Re = 2789$ ; $Nu = 39$	0,852
19,8238 (Binotti, 2000)	0,899
21 (Pirozzi, 2002)	0,895
22	0,885

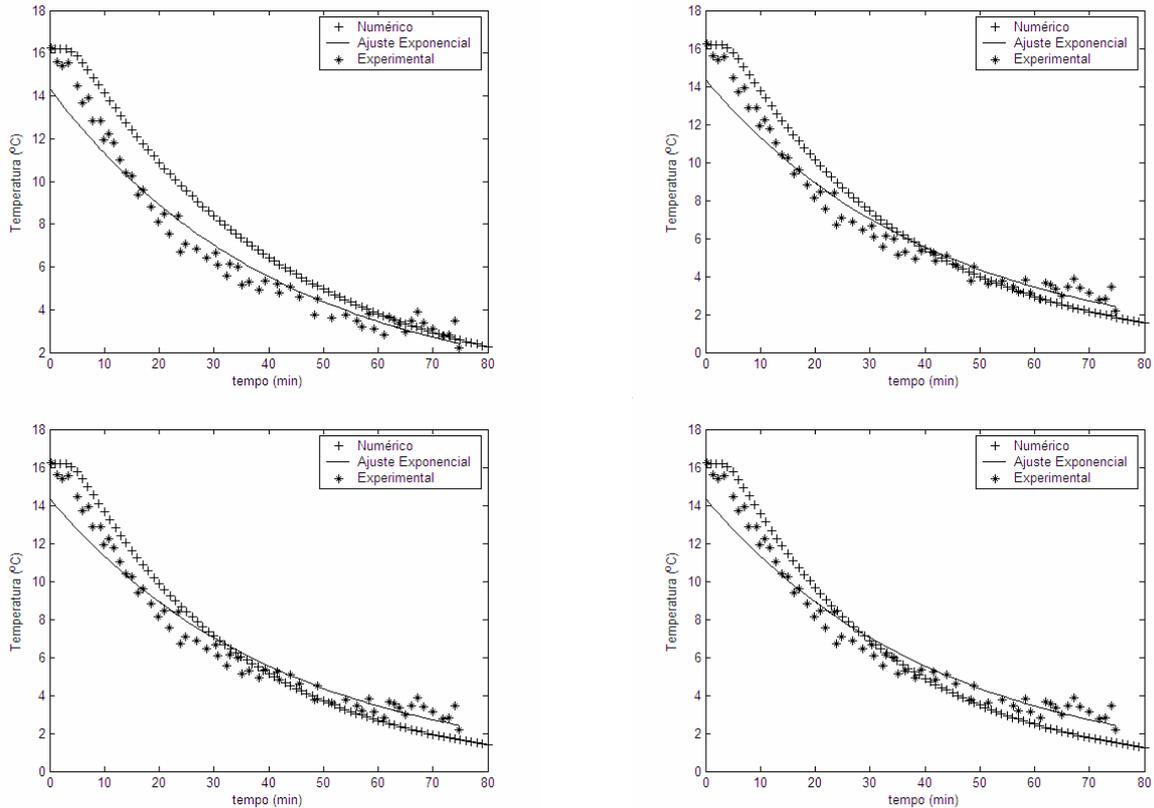


Figura 5. Perfil de temperatura para o Caso 1 para diferentes valores de  $h$ .

Na Tab. 5 são apresentados os valores de  $h$  ( $W/m^2\text{°C}$ ) obtidos para os demais casos investigados no presente trabalho, tais valores representam o  $R^2$  mais próximo de 1 obtido entre as temperaturas experimentais e numéricas. Nota-se nesta tabela que o coeficiente de transferência de calor tem uma variação acentuada de um morango para o outro e tal parâmetro é dependente, por exemplo, da temperatura inicial da amostra, da área superficial etc.

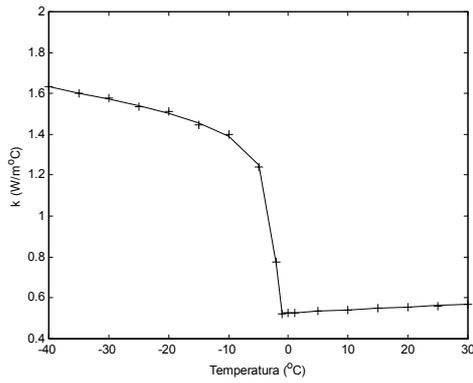
Tabela 5. Valores do coeficiente de transferência de calor para os casos 2 a 6.

Casos	2	3	4	5	6
$h$ ( $W/m^2\text{°C}$ )	40	18	39	23	18

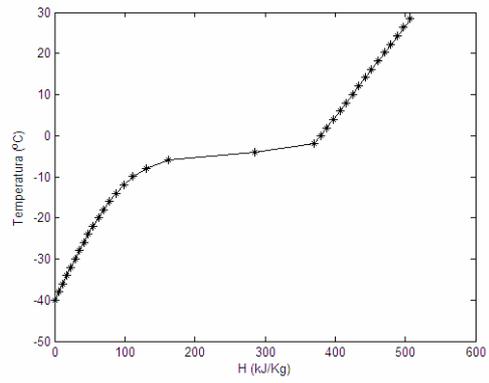
Após a investigação do resfriamento do morango decidiu-se investigar o processo de congelamento, porém as propriedades termofísicas não são constantes durante o congelamento. Assim optou-se pelo uso de equações de predição das propriedades termofísicas baseadas exclusivamente na composição do morango e tais equações foram testadas no âmbito deste trabalho (Choi e Okos, 1986; Murakami e Okos, 1989). Estas propriedades foram desenvolvidas na forma de funções tendo por variável dependente a temperatura.

Assim, a Fig. 6(a) ilustra o comportamento da condutividade térmica do morango (91% de água) com a variação da temperatura durante o congelamento, notando que há uma queda abrupta da condutividade térmica em um intervalo bem definido de temperaturas. Já a Fig. 6(b) ilustra o comportamento da temperatura com a variação da entalpia. A Fig. 7(a) ilustra o comportamento da entalpia volumétrica ( $H$ ) 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 conforme Fig. 7(b). Assim, neste trabalho optou-se pelo uso da entalpia que substitui a descontinuidade presente na curva do calor específico.

A Fig. 8 ilustra os perfis de temperatura no centro e superfície do morango durante o processo de congelamento para diferentes coeficientes de transferência de calor, onde nota-se que quanto maior o coeficiente de transferência de calor mais rápido será o congelamento do produto. Na Fig. 9 ilustra-se o comportamento da temperatura em 10 pontos distintos durante o processo de resfriamento e congelamento do morango, respectivamente, onde percebe-se que o resfriamento é um processo mais lento que o congelamento e tem um comportamento quase linear.

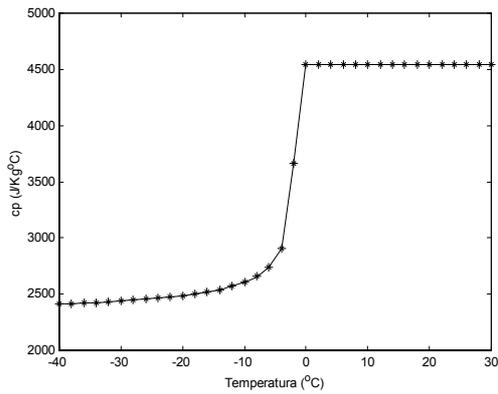


(a)

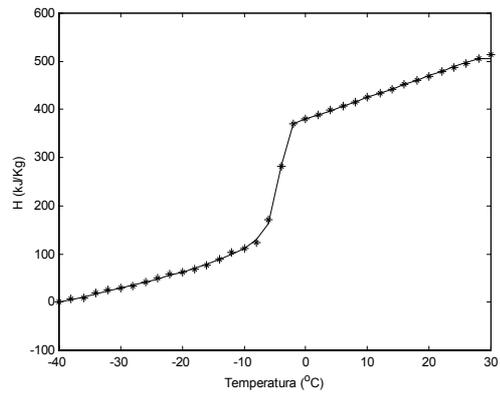


(b)

Figura 6 – Perfis da (a) condutividade térmica e (b) temperatura do morango.

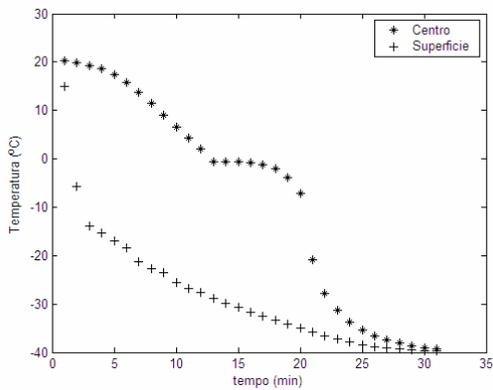


(a)

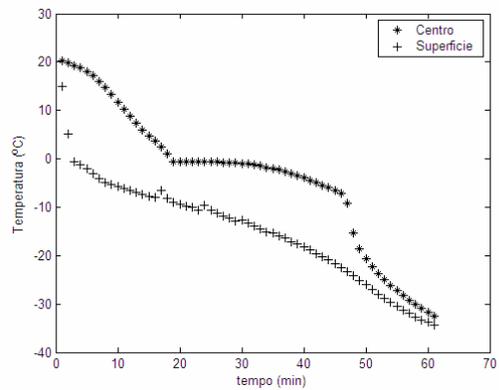


(b)

Figura 7 – Perfis do (a) calor específico e (b) entalpia para o morango.

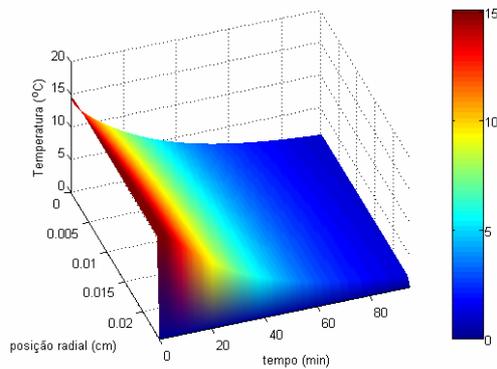


(a)

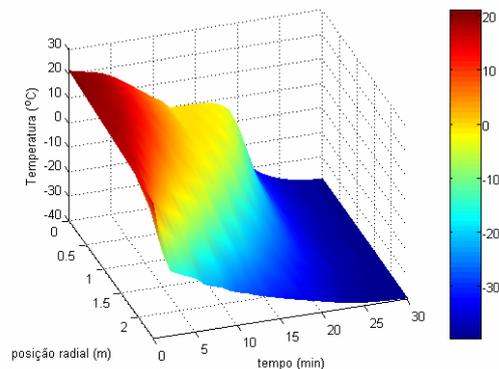


(b)

Figura 8 - Temperatura para (a)  $h = 190 \text{ W/m}^2\text{°C}$  e  $T_\infty = -40^\circ\text{C}$  e (b)  $h = 40 \text{ W/m}^2\text{°C}$  e  $T_\infty = -40^\circ\text{C}$ .



(a)



(b)

Figura 9 - Temperatura durante o (a) resfriamento e (b) congelamento na direção radial do morango.

## 5. Conclusões

A metodologia numérica utilizada neste trabalho mostrou-se promissora predizendo com razoável precisão a evolução da temperatura em regime transiente com mudança de fase em um alimento submetido ao processo de resfriamento ou congelamento. Tal metodologia poderá ser usada no projeto de equipamentos cada vez mais otimizados para resfriar ou congelar alimentos. O uso de equações de predição das propriedades termofísicas baseadas exclusivamente na composição de um alimento foi testado no âmbito deste trabalho e estas propriedades foram desenvolvidas na forma de funções tendo por variável dependente a temperatura, contudo não foi possível obter experimentalmente tais valores, o que será feito logo a seguir, em um futuro trabalho. Através dos valores experimentais do resfriamento do morango percebeu-se que o coeficiente de transferência de calor é bastante variável. A alteração deste coeficiente altera o tempo de congelamento do morango.

## 6. Referências

- Agnelli, M. E. e Mascheroni, R. H., 2001, Cryomechanical freezing. A model for the heat transfer process, *Journal of Food Engineering*, Vol. 47, p. 263-270.
- Binotti, C. S., 2000, Avaliação Quantitativa do Método de Resfriamento Rápido com Ar Forçado para Morangos (*Fragaria x ananassa Duch.*), in *Natura*, Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
- 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, p. 93-101.
- Incropera, F. P.; Dewitt, D. P., 1998, *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. 4ª Edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
- 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, p. 626-630.
- Miles, C. A., Beek, G. V., Veerkamp, C. H., Calculation of thermophysical properties, 1983. In: JANCZÓK, P.I.; SCHEERLINCK, N.; VERBOVEN, P.; NICOLAI, B.M.; DEBAERDEMAEKER, J. Shape modeling for stochastic FE computation of cooling processes of agricultural products. <<http://ageng2002.szie.hu/programme>> Acesso em: ago. 2002.
- 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, p. 3-48.
- Pirozzi, D. C. Z. e Amendola, M., 2005, Modelagem Matemática e Simulação Numérica do Resfriamento Rápido de Morango com Ar Forçado. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, Vol. 25, nº 1, p. 222-230.
- Pirozzi, D. C. Z., 2002, Modelagem Matemática e Simulação Numérica do Resfriamento Rápido com Ar Forçado de Morango, Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
- Scheerlinck, N., Verboven, P., Fikiin, K. A., 2001, De Baerdemaeker, J., Nicolai, B. M., 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, p. 429-438.

## ANALYSIS OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN THE COOLING AND FREEZING OF THE STRAWBERRY

### 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

### Adriano da Silva

Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais - PPGCA  
Universidade Comunitária Regional de Chapecó – UNOCHAPECÓ  
Rua Senador Atilio Fontana, 591 E, CEP: 89809-000, Chapecó, SC, Brasil  
adriano@unochapeco.edu.br

## Abstract

The present work analyzes the temperature transient field present in the process of convection cooling fast and freezing of the strawberry. The strawberry thermal properties at a first moment are kept constant, for the cooling process, and are changeable with the temperature, for the freezing process. Heat transfer modeling is accomplished by Fourier's equation of transient heat conduction during the process of cooling of the strawberry. Such equation with the boundary and initial conditions is solved through of the finite differences method. A numerical method based on enthalpy formulation was used to simulate the freezing of strawberry spherical. The influence of the modification of the heat transfer coefficients is evaluated through of the center and surface temperature profiles of the strawberry. The heat transfer in the interior of the strawberry is significantly affected by the modification of this coefficient,

mainly for the freezing process. This work is important because heat transfer zones were accurately detected, providing information for equipment optimization.

**Key-words:** cooling, freezing, heat transfer coefficient, finite differences, strawberry.