

## MODELAGEM DO CONGELAMENTO DA BETERRABA

Vagner J. Neckel<sup>a</sup> e Viviana C. Mariani<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, Rua Imaculada Conceição, 1155  
Prado Velho, CEP: 80215-901, Curitiba, Paraná.  
vagnerneckel@yahoo.com.br, viviana.mariani@pucpr.br*

**Palavras-chave:** Congelamento, coeficientes de troca térmica, modelo entálpico, transferência de calor.

**Resumo.** Equações empíricas dependentes da composição da beterraba foram pesquisadas e empregadas neste trabalho para obter a condutividade térmica, densidade e o calor específico da beterraba em função da temperatura. Aliando estas equações foi possível obter a entalpia (H) em função da temperatura para o produto em questão. Após, um código computacional tridimensional, em diferenças finitas explícita foi desenvolvido e implementado para resolver a equação da condução de calor em geometrias tridimensionais, em regime transitório. O código computacional foi validado através da comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais dos campos de temperatura no centro e em uma superfície do produto durante o congelamento. Os resultados mostram que a associação do método de predição das propriedades termofísicas e a equação entálpica de transferência de calor em regime transitório utilizadas neste trabalho permitem prever com razoável precisão a evolução da temperatura no interior de um alimento submetido ao processo de congelamento.

## 1 INTRODUÇÃO

Na indústria o resfriamento e o congelamento de produtos alimentícios são tratamentos de preservação amplamente utilizados. Ambos processos tem por objetivo manter o produto com certa qualidade até o consumo. A seleção de um método apropriado de resfriamento ou congelamento depende da utilização futura do produto a ser submetido a tal processo. Para selecionar um método de resfriamento ou congelamento eficiente e rápido, alguns fatores devem ser considerados, incluindo a temperatura do produto na colheita, a fisiologia do produto, a vida pós-colheita desejada, os custos de equipamentos e operações, bem como o resfriamento ou congelamento exigido (Mitchell, 1992). A deterioração de alimentos pode ser retardada por baixas temperaturas durante o armazenamento, assegurada também no transporte e durante a comercialização (Hardenburg *et al.*, 1986). O efeito desejável da baixa temperatura é a redução da respiração, o retardamento da maturação e a redução da taxa de incidência de doenças pós-colheita.

Especificamente, durante o congelamento de um produto alimentício, suas propriedades termofísicas mudam constantemente. Isto se deve ao fato da variação contínua da fração de sólido e, conseqüentemente, da fração de líquido no interior do material, até que o mesmo esfrie por completo. A temperatura do produto é o maior determinante da taxa respiratória, na qual uma redução de 10°C na temperatura causa uma redução de 2 a 4 vezes na atividade respiratória. Assim, o bom gerenciamento da refrigeração e da temperatura é importante para uma lenta deterioração fisiológica dos produtos frescos (Mitchell, 1992). É devido a essa estreita relação entre atividade metabólica e vida comercial útil, que estudos mostram que a vida comercial útil de frutos conservados a 10°C é aproximadamente vinte e cinco por cento da que se consegue quando se conserva a 0°C (Binotti, 2000).

Grande parte da refrigeração industrial dos alimentos é feita por jato de ar (convecção forçada), água de pulverização e resfriamento por imersão. A técnica de resfriamento por imersão é simples, com baixo custo operacional, resfriando o produto de forma rápida. Laurindo *et al.* (2010) investigaram a influência da agitação da água (injeção de água, injeção de ar e injeção de água acoplada a um ejetor Venturi) sobre o coeficiente de transferência de calor, onde observaram que a injeção de ar e injeção de água aumentou significativamente o coeficiente de transferência de calor entre o alimento e a água de imersão. Outro método de resfriamento é a vácuo, baseado no efeito de resfriamento devido à evaporação da água, que utiliza uma câmara especial, onde a pressão interna é reduzida até que atinja um valor correspondente à temperatura de saturação desejada. O resfriamento por imersão em água gelada e o resfriamento a vácuo são os mais rápidos métodos de resfriamento com um grande uso principalmente em produtos com a superfície rígida (Kays, 1991).

Vigneault *et al.* (1994) afirmaram que o resfriamento com ar forçado tem custo inferior contudo exige duas a três vezes mais tempo de congelamento quando comparado ao resfriamento por imersão em água gelada e resfriamento a vácuo. Chanteloup e Mirade (2009) avaliaram a eficiência da convecção forçada em instalações industriais de alimentos, concluindo que a idade média do ar é um parâmetro mais sensível que a velocidade média do ar destacando as áreas com ventilação inadequada nestas instalações. Dirita *et al.* (2007) investigaram a influência do jato de refrigeração e aquecimento do ar nos coeficientes local de troca térmica. Notaram que a taxa de transferência de calor é alterada pela condução de calor do alimento, pelo local e tempo de incidência do jato, assim como existem áreas onde o resfriamento (ou aquecimento) é mais lento em função das condições de contorno.

Logo, o projeto de equipamentos de refrigeração de alimentos exige a estimativa dos tempos de resfriamento e congelamento de alimentos, bem como as cargas de refrigeração

correspondente. A precisão dessas estimativas, por sua vez, depende de estimativas precisas do coeficiente de transferência de calor da superfície para a operação de resfriamento ou congelamento. Assim, Becker e Fricke (2004) analisaram 777 curvas de resfriamento de 295 alimentos e desenvolveram nove correlações envolvendo número de Nusselt, Reynolds e Prandtl que podem ser utilizadas pelos projetistas de sistemas de refrigeração e congelamento de alimentos.

Por fim o objetivo deste trabalho é empregar equações clássicas para obter a condutividade térmica e o calor específico em função da temperatura para um alimento em específico, a beterraba. Aliando estas equações é possível estabelecer as relações de entalpia em função da temperatura para o produto em questão. Um código computacional tridimensional, em diferenças finitas explícito foi desenvolvido e implementado em linguagem FORTRAN 95 para resolver a equação da condução de calor em regime transitório. Com o objetivo de validar o código computacional e ilustrar a utilização das equações de predição das propriedades termofísicas foram empregados dados experimentais do congelamento da beterraba. Os resultados numéricos mostraram-se adequados quando comparados com os dados experimentais.

## 2 MODELAGEM MATEMÁTICA

A temperatura é um dos fatores mais importantes para conservação dos alimentos. Quando há um aumento de temperatura a deterioração do alimento se acelera deixando-o vulnerável a agentes patogênicos. Segundo Fennema (1992) o conhecimento das taxas de transferência de calor e massa e dos respectivos coeficientes de trocas térmicas permite a otimização do aporte dos recursos energéticos, o aumento de produtividade, a redução de perdas e o aumento da qualidade e da segurança do alimento.

A modelagem da transferência de calor em alimentos sólidos de geometria simples, sem mudança de fase e na ausência de transferência de massa é classicamente realizada pela resolução da equação de condução de calor em regime transitório fazendo uso tanto de soluções analíticas quanto numéricas. Trabalhos propondo a modelagem de alimentos em três dimensões e, em consequência fugindo das geometrias clássicas unidimensionais, são raros na literatura. A modelagem usando condições de contorno sujeita a campos variáveis de coeficientes de troca térmica pode ser considerada quase inexistente. Esta variabilidade de coeficientes de troca térmica pode ter um impacto preponderante no tempo de resfriamento de um produto alimentício de grandes dimensões, como por exemplo, uma carcaça bovina. Segundo Nicolai e Baerdemaeker (1996) a carcaça pode servir de anteparo à velocidade do ar e, na região não atingida diretamente pelo fluxo de ar, as condições superficiais de troca térmica podem ser próximas da convecção natural.

Como dito anteriormente, na abordagem adotada neste trabalho, iremos tratar da modelagem e simulação do congelamento por convecção forçada de um alimento, em específico a beterraba, no formato de um paralelepípedo sujeita a um campo variável de coeficientes de transferência de calor.

O problema físico a ser estudado neste trabalho é a transferência de calor (durante o congelamento) num corpo sólido em forma de paralelepípedo, como ilustrado na Fig. 1. O modelo matemático utilizado para simular numericamente o resfriamento de um paralelepípedo de beterraba foi a equação diferencial de transferência de calor baseada no modelo entálpico tridimensional em regime transitório expressa por

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

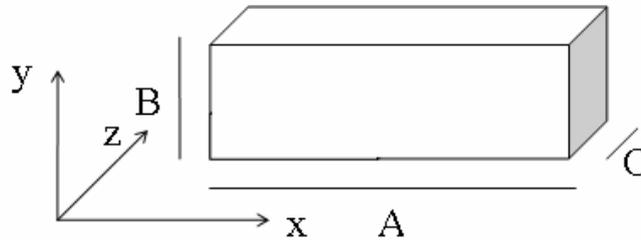


Figura 1: Domínio computacional

onde  $x$ ,  $y$  e  $z$  indicam as componentes nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  (m);  $t$  é o tempo em (s);  $T(x,y,z)$  é a temperatura em ( $^{\circ}\text{C}$ );  $k$  é a condutividade térmica em ( $\text{W/mK}$ ) e  $H$  é a entalpia em ( $\text{J/m}^3$ ). A Eq. (1) é a formulação em entalpia para equação da energia, neste tipo de formulação existem duas variáveis dependentes, ou seja, a entalpia é a variável primária e a temperatura é a variável secundária.

Na solução da Eq. (1) é necessário especificar a condição inicial e condições de contorno que são:

$$T(x, y, z, t) = T_0, t = 0 \quad (2)$$

$$k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = h[T_{\infty} - T(x, y, z, t)], x = A, t > 0 \quad (3)$$

$$k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} = h[T_{\infty} - T(x, y, z, t)], y = B, t > 0 \quad (4)$$

$$k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} = h[T_{\infty} - T(x, y, z, t)], z = C, t > 0 \quad (5)$$

$$k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = h[T_{\infty} - T(x, y, z, t)], x = 0, t > 0 \quad (6)$$

$$k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} = h[T_{\infty} - T(x, y, z, t)], y = 0, t > 0 \quad (7)$$

$$k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} = h_c [T_{\infty} - T(x, y, z, t)], z = 0, t > 0 \quad (8)$$

Nas Eqs. (6) a (8)  $h(\text{W/m}^2\text{C})$  representa o coeficiente de convecção térmica nas superfícies livres do material enquanto  $h_c$  é o coeficiente de convecção térmica na superfície  $z = 0$  e  $T_{\infty}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) é a temperatura do meio refrigerante. No presente trabalho as equações foram resolvidas usando o método das diferenças finitas explícito.

### 3. APARATO EXPERIMENTAL

Todos os procedimentos experimentais descritos foram realizados por Strapasson (2006). Para o procedimento experimental utilizou-se os equipamentos descritos na Tabela 1.

Equipamentos	Quantidade
PC com software Matlab versão 5.3 e pacote Office	1

Freezer horizontal Electrolux de 300 l (-20°C)	1
PC para aquisição de dados	1
Central para aquisição de dados HP Agilent 3792 <sup>a</sup>	1
Termopares tipo T	8
Fluxímetros RdF 27032-3	2
Ventilador Arno com 3 velocidades	1
Paquímetro, <i>cutter</i> , molde para corte	1 cada
Papel alumínio e filme plástico	1 rolo cada

Tabela 1: Equipamentos e instrumentos.

O freezer horizontal necessitou de modificações internas para ser utilizado dentro das condições de experimentação planejadas. Foi necessário dividir o volume interno em duas câmaras, de modo a ter condições controladas de ventilação e, conseqüentemente, de coeficientes de troca térmica em cada uma destas câmaras. A Fig. 2 mostra o arranjo interno do freezer, com o posicionamento do ventilador para a movimentação de ar em diferentes velocidades e com uma amostra de beterraba instrumentada e pronta para o experimento de congelamento, isto é, ilustra-se o arranjo usado, evidenciando a superfície ventilada do paralelepípedo de beterraba.



Figura 2: (a) Arranjo interno do freezer com uma amostra de beterraba tridimensional pronta para o experimento de congelamento. (b) Amostra em forma de paralelepípedo recortada de bulbos de beterraba

Ao dispositivo experimental mostrado acima, foi conectada a central de aquisição de dados ligada ao PC que faz as aquisições de todos os sinais dos instrumentos ligados à amostra sob congelamento. A leitura e o registro de dados foram realizados a cada 5 segundos pelo *software* Benchlink versão 3.1. Para os experimentos práticos foi utilizado o tubérculo da beterraba como amostra, cortado em geometria tridimensional no formato de um paralelepípedo com dimensões de  $3 \times 5 \times 2$  cm, conforme descrito na Fig. 2b. Nas amostras foram introduzidos termopares tipo T para a verificação das temperaturas no seu interior: um na posição central da amostra (ponto de cruzamento de todas as suas diagonais) e outros 2, respectivamente, a 0,5 cm à esquerda e 0,5 cm à direita do primeiro termopar, segundo o lado de menor dimensão do paralelepípedo. A amostra teve uma de suas faces isoladas, com o fluxo convectivo forçado atuando diretamente sobre a mesma. Nas outras faces foi induzido o fluxo convectivo natural do ambiente do freezer, pela ausência de ventilação.

A determinação da condição de contorno convectiva nas superfícies das amostras foi

realizada por fluximetria. O fluxímetro é um sensor baseado no princípio do termopar diferencial, no qual um grande número de junções mede a temperatura nas duas faces do sensor. Como o sensor pode ser considerado termicamente fino (espessura de 0,3 mm), a medida da diferença de temperatura entre uma das superfícies, a qual é colada ao produto, e a outra, que fica exposta ao ar ambiente da câmara, é proporcional ao fluxo térmico que atravessa a superfície do produto. Como o fluxímetro é fornecido pelo fabricante com sua constante de calibração, é possível se medir o fluxo térmico [ $\text{W/m}^2$ ] com uma precisão de aproximadamente  $\pm 5\%$  (Modelo 27032-3, RdF Corporation, USA). Juntamente com o fluxímetro colado na superfície das amostras dos produtos, usamos a técnica de elaborar um termopar tipo T inserido em uma agulha hipodérmica, o qual foi introduzido na amostra até a junção quente coincidir com o nível superficial da amostra. Então, com a medição do fluxo térmico superficial, da temperatura de superfície do produto e da temperatura ambiente da câmara, foi possível determinar-se o coeficiente de transmissão de calor por convecção na superfície estudada. Pode-se então aplicar a Equação de Newton para a convecção, Eq. 9, aos dados dos experimentos realizados para este fim, tendo como dados medidos o fluxo superficial  $q$  ( $\text{W/m}^2$ ), a temperatura de superfície  $T_s$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) e a temperatura ambiente  $T_{\infty}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) a cada instante de medição.

$$q = h \cdot (T_{\infty} - T_s) \quad (9)$$

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As propriedades termofísicas dos alimentos são estritamente dependentes da composição química e da temperatura. A grande diversidade de alimentos existentes, a variação de composição entre os diferentes produtos, as diferenças de variedades de um mesmo produto e a grande quantidade de condições possíveis de tratamentos tornam praticamente impossível a determinação experimental e a constituição de um catálogo de propriedades. Assim, modelos matemáticos dependentes da temperatura foram desenvolvidos para a predição destas propriedades, geralmente baseados na composição do alimento.

As propriedades de interesse para o presente trabalho são: a temperatura de início de congelamento, o calor específico, a condutividade térmica e a entalpia. Diferentes equações são encontradas na bibliografia simulando estas propriedades. Na abordagem deste trabalho, adotaram-se os modelos compilados e recomendados pela ASHRAE (ASHRAE, 2002). Uma primeira inovação que este trabalho propôs foi colocar este conjunto de equações em um único código computacional de modo a se entrar com a composição do alimento e obter-se diretamente todas as propriedades. Uma última inovação na abordagem das propriedades termofísicas consiste no cálculo direto da entalpia do produto em função da temperatura pela integração da relação  $c_p \cdot dT$  a partir do cálculo do calor específico.

Com relação à condutividade térmica, pelo fato da ASHRAE especificar respectivamente que o modelo série superestima e o modelo paralelo subestima esta propriedade, optou-se por adotar uma média aritmética dos valores da condutividade térmica calculada por estes dois modelos. Logo, as composições (% massa) da beterraba no estado *in natura*, usadas para o cálculo das diferentes propriedades termofísicas são água (87,58), proteínas (1,61), lipídios totais (0,17), carboidratos (6,76), cinzas (1,08) e fibras totais (2,80).

Devido ao comportamento dos alimentos não poder ser comparado aos das soluções ideais, pelo fato de não se poder negligenciar os efeitos de interações entre as diferentes

moléculas que o compõem, então adotou-se uma equação empírica obtida por Pham (1996) para obter a temperatura crítica de congelamento, o qual, em um estudo reunindo 43 tipos diferentes de alimentos (carnes, peixes, frutas, vegetais e produtos lácteos desengordurados), obteve a seguinte relação por análise de regressão ( $R^2 = 0,92$ ) para a temperatura de início de congelamento baseada na composição dos alimentos analisados:

$$T_{cc} = -4,66(X_o/X_{wtot}) - 46,4(X_m/X_{wtot}) \quad (10)$$

onde  $X (-)$  é a fração mássica, com os índices  $m =$  minerais,  $o =$  outros componentes,  $wtot =$  água total;  $T_{cc}$  é expressa em ( $^{\circ}\text{C}$ ). Assim, a temperatura teórica de início de congelamento obtida para a beterraba foi de  $-1,18^{\circ}\text{C}$  enquanto que experimentalmente obteve-se o valor de  $1,19^{\circ}\text{C}$ .

O calor específico é geralmente dado em função dos componentes isolados dos produtos pelas equações testadas experimentalmente e obtidas por análise de regressão por Choi e Okos (1986), na Tabela 2 são descritas estas equações e o calor específico é obtido como segue:

$$c_p = \sum c_{p_j} X_j \quad (11)$$

Componente	Calor específico ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{^{\circ}\text{C}}^{-1}$ )*
Proteínas	$c_{prot} = 2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3}T - 1,3129 \times 10^{-6}T^2$
Lipídios	$c_{lip} = 1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3}T - 4,8008 \times 10^{-6}T^2$
Carboidratos	$c_{ch} = 1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3}T - 5,9399 \times 10^{-6}T^2$
Fibras	$c_{fi} = 1,8459 + 1,8306 \times 10^{-3}T - 4,6509 \times 10^{-6}T^2$
Minerais	$c_m = 1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3}T - 3,6817 \times 10^{-6}T^2$
Água	$c_w = 4,1762 + 9,0864 \times 10^{-5}T - 5,4731 \times 10^{-6}T^2$
Gelo	$c_{gelo} = 2,0623 + 6,0769 \times 10^{-3}T$

\*As temperaturas são expressas em  $^{\circ}\text{C}$ .

Tabela 2: Equipamentos e instrumentos.

De modo prático foi convertido no código computacional os dados puramente de calor específico para o calor específico aparente. Esta última propriedade embute na curva de calor específico o calor latente que é liberado ao longo do processo de congelamento, devido à mudança de estado da água em gelo. No código computacional, então, nós associamos as equações da Tabela 2 com a Eq. (11) para o cálculo do calor específico para a beterraba. A integração dos valores de  $c_p$  aparente com a temperatura leva a outra propriedade de interesse, a qual é também calculada pela rotina computacional desenvolvida. Trata-se da entalpia, para a qual toma-se a convenção que seu valor vale 0 na temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$ . A fórmula usada para este cálculo, levando em conta a composição do alimento em matéria sólida ( $MS$ ), água não congelada ( $wnc$ ) e gelo formado ( $gelo$ ) em função da temperatura é a seguinte:

$$H(T) = m_{MS} \int_{-40}^T c_{MS} dT + m_{wnc} \int_{T_{cc}}^T c_w dT + \int_{-40}^{T_{cc}} m_{wnc}(T) c_w(T) dT + m_{gelo}(T) H_L + \int_{-40}^{T_{cc}} m_{gelo}(T) c_{gelo}(T) dT \quad (12)$$

onde  $m$  (kg) é a massa,  $c$  ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ) o calor específico,  $T$  ( $\text{°C}$ ) a temperatura e  $H$  ( $\text{J.kg}^{-1}$ ) a entalpia.

A condutividade térmica, por sua vez, foi calculada em função da aplicação dos modelos série e paralelo revistos por Murakami e Okos (1989), os quais fazem analogia da condutividade térmica em um produto alimentício com um circuito elétrico. Esta comparação leva em conta que o produto é composto de diferentes resistências, ligadas em serie ou paralelo, segundo cada um dos dois modelos e, que as resistências têm um valor nominal em função da temperatura o qual é relacionado à composição em função das fórmulas estabelecidas por Choi e Okos (1986). Na Tabela 3 a condutividade térmica em função dos componentes isolados de qualquer produto são descritas pelas equações.

Componente	Condutividade Térmica ( $\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$ )*
Protínas	$k_{prot} = 1,7781 \times 10^{-1} + 1,1958 \times 10^{-3}T - 2,7178 \times 10^{-6}T^2$
Lipídios Totais	$k_{lip} = 1,8071 \times 10^{-1} - 2,7604 \times 10^{-3}T - 1,7749 \times 10^{-7}T^2$
Carboidratos	$k_{ch} = 2,0141 \times 10^{-1} + 1,3874 \times 10^{-3}T - 4,3312 \times 10^{-6}T^2$
Fibras Totais	$k_{fi} = 1,8331 \times 10^{-1} + 1,2497 \times 10^{-3}T - 3,1683 \times 10^{-6}T^2$
Minerais	$k_m = 3,2962 \times 10^{-1} + 1,4011 \times 10^{-3}T - 2,9069 \times 10^{-6}T^2$
Água	$k_w = 5,7109 \times 10^{-1} + 1,7625 \times 10^{-3}T - 6,7036 \times 10^{-6}T^2$
Gelo	$k_{gelo} = 2,2196 \times 10^{-1} - 6,2489 \times 10^{-3}T + 1,0154 \times 10^{-4}T^2$

\*As temperaturas são expressas em  $\text{°C}$ .

Tabela 3: Condutividade térmica dos componentes isolados dos alimentos.

O modelo paralelo de condutividade térmica é representado pela soma das condutividades térmicas dos componentes, multiplicadas pelas suas respectivas frações em volume:

$$k = \sum X_j^v k_j \quad (13)$$

O modelo série é dado pelo inverso da soma das frações em volume dos componentes divididas pelas respectivas condutividades térmicas:

$$k = \frac{1}{\sum (X_j^v / k_j)} \quad (14)$$

A fração em volume de cada componente pode ser calculada em função das respectivas frações em massa e densidades, pela equação:

$$X_j^v = \frac{X_j / \rho_j}{\sum (X_j / \rho_j)} \quad (15)$$

Choi e Okos (1986) estabeleceram igualmente as densidades para os componentes dos alimentos, segundo as fórmulas apresentadas na Tabela 4.

Componente	Densidade ( $\text{kg.m}^{-3}$ )*
Proteínas	$\rho_{prot} = 1,3299 \times 10^3 - 5,1840 \times 10^{-1}T$
Lipídios	$\rho_{lip} = 9,2559 \times 10^2 - 4,1757 \times 10^{-1}T$

Carboidratos	$\rho_{ch} = 1,5991 \times 10^3 - 3,1046 \times 10^{-1} T$
Fibras Totatis	$\rho_{fi} = 1,3115 \times 10^3 - 3,6589 \times 10^{-1} T$
Minerais	$\rho_m = 2,4238 \times 10^3 - 2,8063 \times 10^{-1} T$
Água	$\rho_w = 9,9718 \times 10^2 + 3,1439 \times 10^{-3} T - 3,7574 \times 10^{-3} T^2$
Gelo	$\rho_{gelo} = 9,1689 \times 10^2 - 1,3071 \times 10^{-1} T$

\*As temperaturas são expressas em °C.

Tabela 4: Densidades dos componentes isolados dos alimentos.

Em função da ASHRAE (2002) recomendar os métodos paralelo e série para o cálculo da condutividade térmica de alimentos, isto se faz com alguma ressalva. Normalmente o método série superestima a condutividade e, o método paralelo a subestima. Em função disto, optamos por calcular na rotina desenvolvida a condutividade do produto a uma dada temperatura pelos dois métodos e, em seguida, calcular a condutividade final do produto pela sua média aritmética. Para introdução destas propriedades nos códigos numéricos desenvolvidos para a simulação do congelamento, houve a necessidade de se encontrar funções estabelecidas por análise de regressão para cada uma delas e adotou-se como critério de aceitação das curvas de regressão somente quando o coeficiente de ajuste  $R^2$  foi superior a 0,98 para cada curva.

Para a previsão dos coeficientes da equação da condutividade térmica foi desenvolvido um código a partir da Eq. (14) e dados descritos na Tabela 4. Os dados gerados proporcionaram estabelecer a relação entre a condutividade térmica e a temperatura no alimento em questão. A Eq. (16) descreve a função encontrada,

$$k = \begin{cases} \left( \frac{1}{0,62 - 1,27/T} \right); & -40 \leq T < -1 \\ (0,52 + 0,0016T); & -1 < T < 30 \end{cases} \quad (16)$$

A partir da Eq. (16) foi possível visualizar o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura, como mostra a Fig. 3. Nota-se que a condutividade térmica obtida para a beterraba durante o congelamento variou no intervalo de 0,4 a 1,6 W/mK.

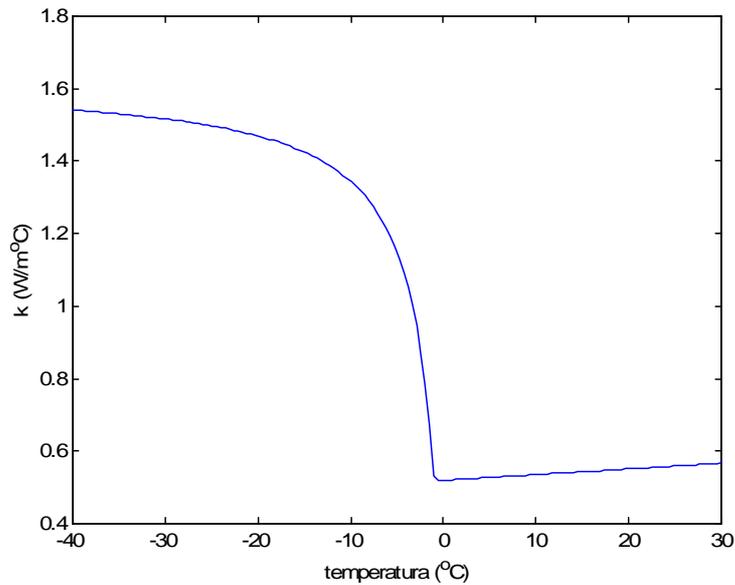


Figura 3: Condutividade térmica em função da temperatura

Os coeficientes de troca térmica por convecção foram determinados por meio da colagem de um fluxímetro na superfície do produto, sobre a qual se deseja determinar o referido coeficiente e pela implantação de um termopar de superfície com a junção de medição colocada à altura do plano da superfície.

Foram usados sempre dois termopares para a medição das temperaturas de superfície, uma vez que esta medida está sujeita a erros experimentais, pois a implantação da junção de medida do termopar exatamente na superfície da amostra é difícil. Os sinais obtidos nos experimentos para o fluxo de calor foram utilizados na equação de Newton da convecção e o resultado foi a obtenção dos coeficientes de transferência de calor nas superfícies da beterraba, onde há a convecção forçada e nas demais superfícies que não recebem o ar por convecção forçada. Os coeficientes de transferência de calor encontrados na superfície da beterraba no interior do freezer foram:  $50 \text{ (W/m}^2\text{K)}$  na superfície sujeita a convecção forçada e  $20 \text{ (W/m}^2\text{K)}$  nas demais superfícies.

Na Fig. 4 são apresentados os perfis (numérico e experimental) de temperatura na (a) superfície ( $z = C$ ) e (b) centro da amostra de beterraba, respectivamente. Vale destacar que os resultados numéricos foram obtidos para um incremento no tempo de  $0,1 \text{ (s)}$  e uma malha geométrica formada por  $80 \times 80 \times 80$  pontos nodais em cada direção  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente, o que resultou em  $512.000$  pontos a cada intervalo de tempo, sendo que o tempo final do congelamento se dá em aproximadamente  $5000 \text{ (s)}$  o que torna as simulações extremamente lentas. Para obtenção dos resultados numéricos apresentados na Fig. 3 foi utilizada a temperatura ambiente medida durante o experimento a qual foi variável no intervalo  $[-23, 17] \text{ (}^\circ\text{C)}$ . Note que a maior temperatura só está presente no processo no início do mesmo em seguida a temperatura é reduzida para valores inferiores à zero.

Analisando os resultados ilustrados na Fig. 4, percebe-se que estes estão provavelmente subestimados. Os dados de temperatura numérico apresentado na Fig. 4 evoluem mais lentamente que os dados experimentais, indicando que os coeficientes de transferência de calor reais provavelmente sejam um pouco mais elevados. Este erro experimental pode se explicar de duas maneiras. Primeiro a medição de temperatura de superfície é de difícil

medição, pois a junção de medição do termopar deve coincidir exatamente com a superfície do produto. Logo a realização prática é difícil. Segundo, o fluxímetro foi aderido às amostras com creme dental, cuja condutividade térmica é desconhecida. Se a condutividade térmica deste material for baixa, ou se houver pequenas bolhas de ar na zona de colagem, pode-se introduzir uma resistência térmica apreciável. Isto daria como resultado um fluxo térmico medido inferior ao real.

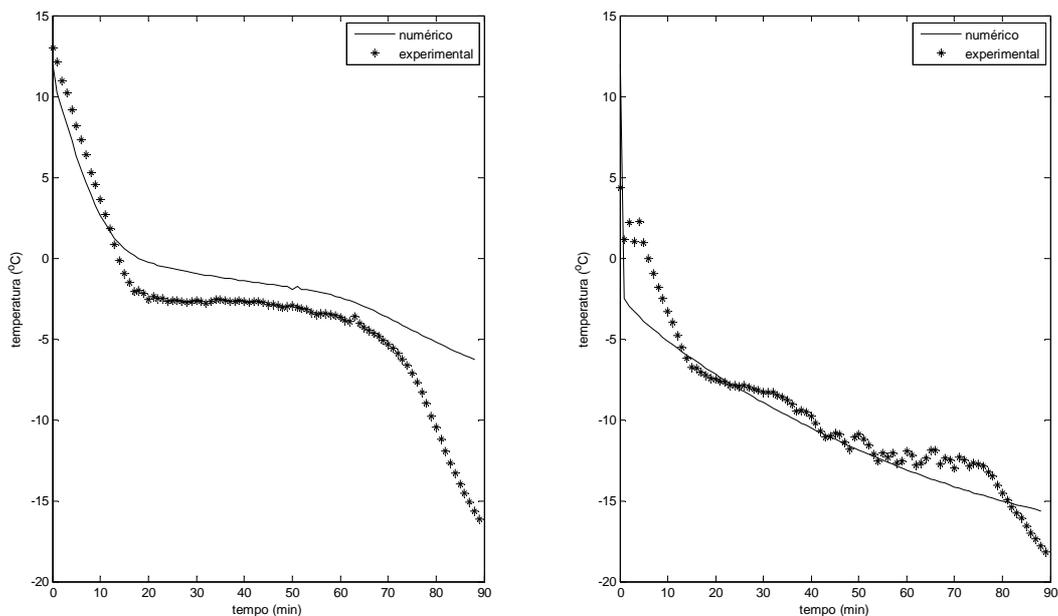


Figura 4: Perfis de temperatura (a) na superfície e (b) centro da amostra de beterraba

## 5 CONCLUSÕES

A modelagem das propriedades termofísicas dos alimentos baseada na sua composição e utilizando equações empíricas obtidas na literatura se mostrou bastante satisfatória. A medição dos coeficientes de transferência de calor mostrou que o uso do ventilador para variação da velocidade no interior do freezer teve alguns problemas, assim adotou-se apenas os valores para uma velocidade em específico. Verificou-se também que a medição de temperatura é um fator importante, pois o erro entre os resultados numéricos e experimentais deve ter origem na medição de temperatura na superfície do produto ou na aderência do fluxímetro na face da beterraba. Então, um pequeno desvio da ponta do termopar do centro do produto deve ocasionar um grande erro de medição. A simulação computacional do congelamento tridimensional com coeficientes diferenciados nas faces nas amostras de beterraba mostrou-se complexa. No entanto, a simulação foi satisfatória e reproduziu razoavelmente as condições do experimento. O modelo entálpico foi adequado para a simulação do congelamento.

## 6 AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a PUCPR pela bolsa de mestrado, e o segundo autor agradece ao CNPq pelo apoio financeiro a este trabalho através dos processos: 568221/2008-7, 474408/2008-6, 302786/2008-2 e 504102/2009-5.

**REFERENCES**

- ASHRAE, ASHRAE Handbook: Refrigeration. ASHRAE: Atlanta, 2002.
- Becker, B.R., Fricke, B.A., Heat transfer coefficients for forced-air cooling and freezing of selected foods, *International Journal of Refrigeration*, 27:540-551, 2004.
- Binotti, C.S., Avaliação quantitativa do método de resfriamento rápido com ar forçado para morangos (*Fragaria x ananassa* Duch.), in natura. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas, 2000.
- Chanteloup, V., Mirade, P., Computational fluid dynamics (CFD) modeling of local mean age of air distribution in forced-ventilation food plants, *Journal of Food Engineering*, 90:90-103, 2009.
- Choi Y., Okos M.R., Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: LeMaguer M., Jelen P. (Eds.). *Food Engineering and Process Applications*. Elsevier Applied Science Publishers: London, 1:93-101, 1986.
- Dirita, C., De Bonis, M.V., Ruocco, G., Analysis of food cooling by jet impingement, including inherent conduction, *Journal of Food Engineering*, 81:12-20, 2007.
- Fennema O.R., Water and Ice. In: Fenemma O.R. (Ed.). *Food Chemistry*. 3<sup>a</sup> Ed. Marcel Dekker: New York, 17-94, 1996.
- Hardenburg, R.E. Watada, A.E., Wang, C.Y., The commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks, USDA Agric., Handbook no. 66, Washington, D.C, 1986.
- Kays, S. J., Heat, heat transfer and cooling. In: S. J. Kays (ed.). *Postharvest physiology of perishable plant products*. Van Nostrand, New York, 457-505, 1991.
- Laurindo, J. B., Carciofi, B.A.M., Silva, R.R., Dannenhauer, C.E., Hense, H., Evaluation of the effects of water agitation by air injection and water recirculation on the heat transfer coefficients in immersion cooling, *Journal of Food Engineering*, 96:59-65, 2010.
- Mitchell, G., Cooling horticultural commodities need for cooling. In: *Post harvest technology of horticultural crops*. Kader, A.A. (ed.) California. University of California, 3311:53-68, 1992.
- Murakami E.G., Okos M.R., Measurement and prediction of thermal properties of foods. In: Singh R.P., Medina A.G. (Eds.). *Food Properties and Computer Aided Engineering of Food Processing Systems*. Academic Publishers: New York, 3-48, 1989.
- Nicolai, B. M. e De Baerdemaeker, J., Sensitivity analysis with respect to the surface heat transfer coefficients as applied to thermal process calculations, *Journal of Food Engineering*, 28:21-33, 1996.
- Pham Q.T., Prediction of calorimetric properties and freezing time of foods from composition data, *Journal of Food Engineering*, 30: 95-107, 1996.
- Strapasson, F. A., Modelagem do congelamento de um alimento de forma geométrica tridimensional submetido a um campo variável de coeficientes de troca térmica. Relatório PIBIC, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Paraná, 2006.
- Vigneault, C., Goyette, B., Fruit and Vegetable Precooling. Training Seminar of the NB Fruit Growers Association. Inc. Fredericton, Canada, 1994.