

ESTUDO DO CONGELAMENTO DE UM PRODUTO SUJEITO A DIFERENTES COEFICIENTES DE TROCA TÉRMICA

¹Vagner Jorge Neckel, vagnerneckel@yahoo.com.br

¹Viviana Cocco Mariani, viviana.mariani@pucpr.br

²Álvaro Cesar Camargo do Amarante, alvaro.amarante@pucpr.br

³Adriano da Silva, adrianodasilva.ufsj@gmail.com

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM

Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR

Rua Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, CEP: 80215-901, Curitiba, PR

²Programa de Graduação em Engenharia de Alimentos

Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR

Rua Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, CEP: 80215-901, Curitiba, PR

³Universidade Federal de São João Del Rei – UFSJ

Av. Sebastião Gonçalves Coelho, 400, CEP: 35501-296, Divinópolis, MG, Brazil

Resumo: Neste trabalho equações clássicas dependentes da composição de um alimento, foram pesquisadas e empregadas para obter a condutividade térmica e o calor específico 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 implícita foi desenvolvido e implementado para resolver a equação da condução de calor em geometrias tridimensionais, em regime transiente. 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 do produto, foram empregados dados experimentais do congelamento do produto exposto a diferentes velocidades de ar. O conhecimento prévio dos coeficientes de convecção, obtidos experimentalmente, permitiram ter como incógnitas somente as propriedades termofísicas do produto. 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, coeficientes de troca térmica, modelo entálpico, transferência de calor

1. INTRODUÇÃO

Tratamentos de preservação amplamente utilizados na indústria são o resfriamento e o congelamento de produtos alimentícios. Este processo tem por objetivo manter o produto com qualidade. 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 somente 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 térmicas 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 resfrie 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 e 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 menos custo quando comparado ao resfriamento por imersão em água gelada e resfriamento a vácuo, o resfriamento é mais rápido que em câmara frigorífica, contudo exige duas a três vezes mais tempo que o resfriamento por imersão em água gelada ou a vácuo. Chanteloup e Mirade (2009) avaliaram a eficiência da ventilação forçada em instalações industriais de alimentos, concluindo que a idade média do ar local é um parâmetro mais sensível que a velocidade média do ar para destacar 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. 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 implícita foi desenvolvido e implementado em FORTRAN 95 para resolver a equação da condução de calor em geometrias tridimensionais, em regime transiente. 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 do produto exposto a diferentes velocidades de ar. O conhecimento prévio dos coeficientes de convecção, obtidos experimentalmente, permitem ter como incógnitas somente as propriedades termofísicas do produto. Os resultados numéricos mostraram-se adequados quando comparados com os dados experimentais.

2. MODELO MATEMÁTICO

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 transiente fazendo uso tanto de soluções analíticas quanto numéricas. Trabalhos propondo a modelagem de alimentos em três dimensões e, em conseqüência 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. Para isso foi desenvolvido um código computacional em FORTRAN 95 para analisar o problema, paralelamente, uma série de experimentos de congelamento foi elaborada (Strapasson, 2006) para testar o modelo desenvolvido.

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 transiente expressa por

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

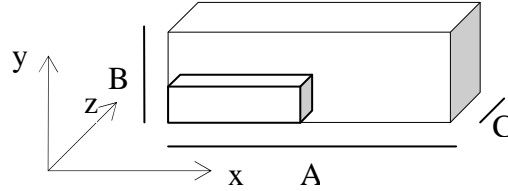


Figura 1. Domínio computacional do problema físico.

onde x é a componente segundo a direção x em [m]; y é a componente segundo a direção y em [m]; z é a componente segundo a direção z em [m]; t é o tempo em [s]; $T(x,y,z)$ é a temperatura em [°C]; k é a condutividade térmica em [W/m°C] e $H(T(x,y,z))$ é a entalpia em [J/m³]. 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:

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

$$-k \frac{\partial T(x = \frac{A}{2}, y, z, t)}{\partial x} = 0, t > 0, 0 \leq y \leq \frac{B}{2}, 0 \leq z \leq \frac{C}{2} \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T(x, y = \frac{B}{2}, z, t)}{\partial y} = 0, t > 0, 0 \leq x \leq \frac{A}{2}, 0 \leq z \leq \frac{C}{2} \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z = \frac{C}{2}, t)}{\partial z} = 0, t > 0, 0 \leq x \leq \frac{A}{2}, 0 \leq y \leq \frac{B}{2} \quad (5)$$

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

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

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

Nas Eqs. (6) a (8) h (W/m²°C) representa o coeficiente de convecção térmica na superfície livre do material, h_c o coeficiente de convecção térmica na superfície $z = 0$ e T_∞ (°C) é a temperatura do meio refrigerante. No presente trabalho as equações foram resolvidas usando o método das diferenças finitas. Note que apesar do código computacional implementado em diferenças finitas ser relativamente simples para especialistas na área de Dinâmica dos Fluidos Computacional e Transferência de Calor tal simplicidade não é sentida por alunos que estão tendo iniciação na área numérica.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Todos os procedimentos experimentais descritos a seguir foram realizados por Strapasson (2006). Para o procedimento experimental utilizou os materiais apresentados na Tab. 1 e os equipamentos apresentados na Tab. 2.

Tabela 1. Materiais de consumo.

Material	Quantidade
Beterraba <i>in natura</i>	20 kg
Placas de isopor de $1,20 \times 1,20 \times 0,03$ m	6 peças

Tabela 2. Equipamentos e instrumentos.

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 ^a	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

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 [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 [W/m^2], a temperatura de superfície T_s [$^{\circ}\text{C}$] e a temperatura ambiente T_{∞} [$^{\circ}\text{C}$] a cada instante de medição.

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

Como incógnita tem-se apenas o coeficiente de transferência de calor por convecção.

4. PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

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 que portam 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). Tais dados foram obtidos em USDA Nutrient Database for Standard Reference, Release 14; Julho de 2001.

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, um modelo puramente baseado nas leis termodinâmicas clássicas (Relação de Clausius-Clapeyron e equação de Raoult) não foi empregado neste trabalho para se prever a temperatura de início de congelamento dos produtos. Adotou-se então uma equação empírica obtida por Pham (1996), 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 Tab. 3 são descritas estas equações e o calor específico é obtido como segue

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

Tabela 3. Calores específicos dos componentes isolados dos alimentos.

Componente	Calor específico ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$) [*]
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 $^{\circ}\text{C}$.

De modo prático, seguindo a recomendação de muitos artigos disponíveis na literatura, 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 Tab. 3 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°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 [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$] o calor específico, T [$^\circ\text{C}$] a temperatura e H [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$] 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 série 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 Tab. 4 a condutividade térmica em função dos componentes isolados de qualquer produto são descritas pelas equações.

Tabela 4. Condutividade térmica dos componentes isolados dos alimentos.

Componente	Condutividade Térmica ($\text{Wm}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)*
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 $^\circ\text{C}$.

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 a seguir:

Tabela 5. Densidades dos componentes isolados dos alimentos.

<i>Componente</i>	Densidade (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.

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.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

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 coma junção de medição colocada à altura do plano da superfície. A Fig. 3 mostra um experimento, no qual a amostra de beterraba sofre a ação da convecção forçada até congelar. Tais resultados foram obtidos porque é possível usar tais valores para a modelagem do congelamento (neste trabalho) e para a modelagem do congelamento (em futuros trabalhos). Na Fig. 3a se iniciou o congelamento da amostra de beterraba com a velocidade 1 (alta), em seguida passou-se para a velocidade 2 (média) e, finalmente, para a velocidade 3 (baixa) do ventilador. Nesta figura estão ilustradas as curvas da temperatura ambiente, temperatura de superfície e fluxo térmico na superfície da amostra. 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. Percebe-se que o sinal do fluxímetro oscila com razoável amplitude, em torno de um valor médio. Isto decorre da pulsação do ventilador em alta frequência e, também pelo fato de não se dispor de nenhum filtro de sinal. Um possível tratamento que poderia ser realizado é a aplicação de um algoritmo para suavização do sinal, por exemplo, um algoritmo de média móvel. Isto não foi realizado e será alvo de pesquisas futuras com o sinal dos fluxímetros sob condições de convecção.

Os sinais obtidos nos experimentos exemplificados na Fig. 3a foram alimentados na equação de Newton da convecção e o resultado foi a obtenção dos coeficientes de transferência de calor para as diferentes velocidades do ventilador. A Fig. 3b mostra os coeficientes de convecção obtidos para o teste apresentado na Fig. 3a. Ambas as figuras mostram claramente que, no momento da abertura do freezer para se fazer a mudança de velocidade do ventilador, há uma grande perturbação no fluxo térmico e na temperatura ambiente. Para o cálculo das médias dos valores do coeficiente de transferência de calor, tomaram-se apenas pontos a partir de 2,5 minutos da abertura do freezer, para não levar em conta as perturbações causadas pela abertura de portas. A superfície isolada é considerada todas as superfícies que não recebem o ar por convecção forçada.

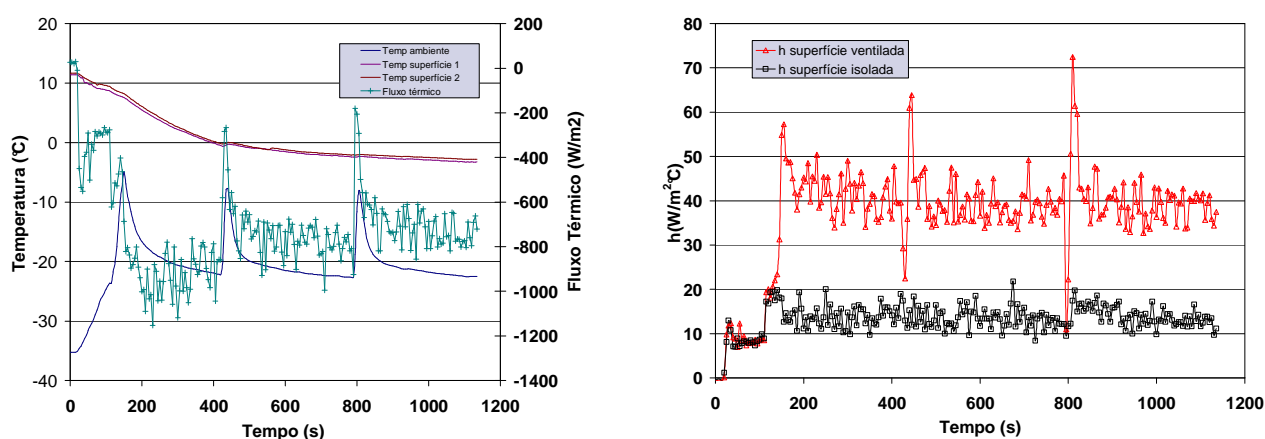


Figura 3. (a) Medição da temperatura de superfície, da temperatura ambiente e do fluxo de calor na superfície de uma amostra de beterraba. (b) Coeficientes de transferência de calor encontrados na superfície ventilada (velocidades 1, 2, e 3) e na superfície isolada da amostra de beterraba.

A Tab. 6 resume os coeficientes de transferência de calor encontrados no freezer, nas 3 velocidades utilizadas para os testes com as amostras de beterraba. Nas superfícies que não estavam sujeitas a convecção forçada o coeficiente de transferência de calor obtido aproximou-se de $10 \text{ (W/m}^2\text{°C)}$.

Tabela 6. Coeficientes de transferência de calor no freezer.

Velocidade	Coeficiente de Transferência de Calor ($\text{W/m}^2\text{°C}$)
V1	$41,3 \pm 5,5$
V2	$38,9 \pm 4,7$
V3	$38,1 \pm 3,8$
Convecção natural	$12,8 \pm 2,8$

Na Fig. 4 são apresentados os perfis (numérico e experimental) de temperatura na (a) superfície e (b) centro da amostra de beterraba, respectivamente, usando os dados para a velocidade 1 descrita na Tab. 6. Vale destacar que os resultados numéricos foram obtidos para um incremento no tempo de 0,1 (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. Logo para os 5000 (s) de tempo do experimento foram necessárias aproximadamente 3 bilhões de iterações para se obter o resultado numérico da simulação computacional, sem contar o laço interno para a precisão temporal. Além do que foram acrescentadas várias operações para cada ponto nodal, segundo a arquitetura do programa (transformação da temperatura em entalpia e sua operação inversa para cada ponto), este número é ainda multiplicado por dois. Logo as simulações foram extremamente lentas.

Para obtenção dos resultados numéricos apresentados na Fig. 4 foi utilizada a temperatura ambiente medida durante o experimento, a qual foi variável no intervalo $[-23, 17] \text{ (°C)}$. 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.

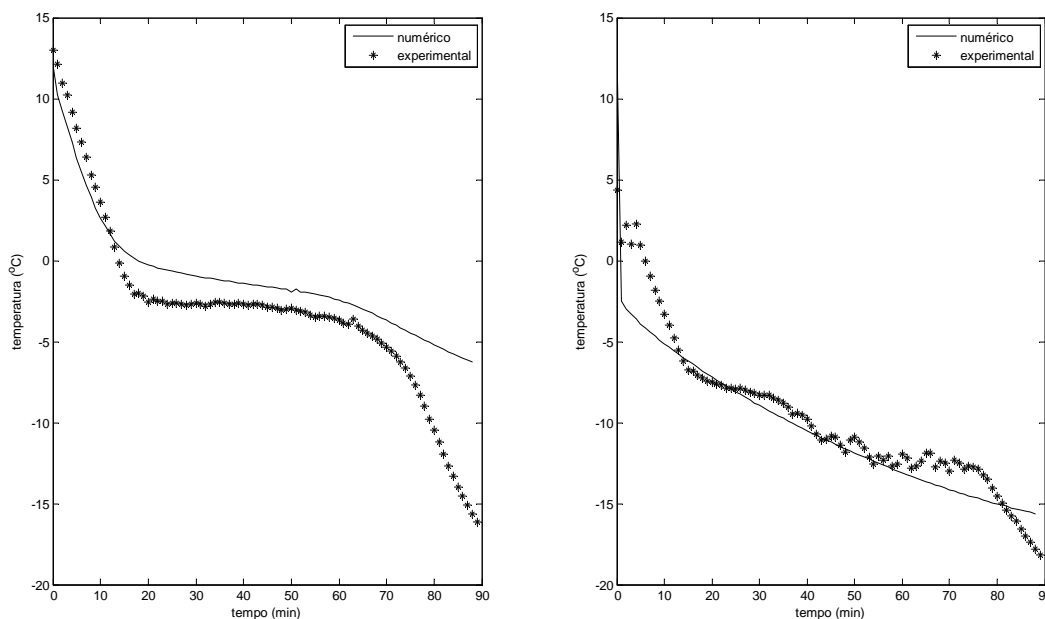


Figura 4. Perfis de temperatura na (a) superfície e (b) centro da amostra de beterraba usando os dados experimentais referentes à velocidade 1.

6. CONCLUSÕES

No desenvolvimento deste trabalho foi possível notar que a modelagem das propriedades termofísicas dos alimentos, baseado 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. Verificou-se também que a medição de temperatura é um fator importante, pois o erro entre o modelo e o experimento deve ter origem na medição de temperatura principalmente no centro do produto. Quanto maior a velocidade de congelamento, maior é o número de Biot atuando no produto, fazendo que os gradientes internos de temperatura sejam maiores que para pequenas velocidades. Então, um pequeno desvio da ponta do termopar do centro do produto deve ocasionar um grande erro de medida. A simulação computacional do congelamento tridimensional com coeficientes variáveis 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.

7. AGRADECIMENTOS

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

8. REFERÊNCIAS

- ASHRAE, 2002, ASHRAE Handbook: Refrigeration. ASHRAE: Atlanta.
- Becker, B.R., Fricke, B.A., 2004, "Heat transfer coefficients for forced-air cooling and freezing of selected foods", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 27, pp. 540-551.
- 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 em Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas.
- Chanteloup, V., Mirade, P., 2009, "Computational fluid dynamics (CFD) modeling of local mean age of air distribution in forced-ventilation food plants", *Journal of Food Engineering*, Vol. 90, pp. 90-103.
- Choi Y., Okos M.R., 1986, "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, Vol. 1, pp. 93-101.
- Dirita, C., De Bonis, M.V., Ruocco, G., 2007, "Analysis of food cooling by jet impingement, including inherent conduction", *Journal of Food Engineering*, Vol. 81, pp. 12-20.
- Fennema O.R., 1996, "Water and Ice". In: Fenemma O.R. (Ed.). *Food Chemistry*. 3ª Ed. Marcel Dekker: New York, pp. 17-94.
- Hardenburg, R.E. Watada, A.E., Wang, C.Y., 1986, "The commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks", USDA Agric., Handbook no. 66, Washington, D.C.

- Kays, S. J., 1991, "Heat, heat transfer and cooling". In: S. J. Kays (ed.). Postharvest physiology of perishable plant products. Van Nostrand, New York, pp. 457-505.
- Laurindo, J. B., Carciofi, B.A.M., Silva, R.R., Dannenhauer, C.E., Hense, H., 2010, "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*, Vol. 96, pp. 59-65.
- Mitchell, G., 1992, "Cooling horticultural commodities need for cooling". In: Post harvest technology of horticultural crops. Kader, A.A. (ed.) California. University of California, publ. 3311, pp. 53-68.
- Murakami E.G., Okos M.R., 1989, "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, pp. 3-48.
- Nicolai, B. M. e De Baerdemaeker, J., 1996, "Sensitivity analysis with respect to the surface heat transfer coefficients as applied to thermal process calculations". *Journal of Food Engineering*, Vol. 28, pp. 21-33.
- Pham Q.T., 1996, "Prediction of calorimetric properties and freezing time of foods from composition data", *Journal of Food Engineering*, Vol. 30, pp. 95-107.
- Strapasson, F. A., 2006, "Modelagem do congelamento de um alimento de forma geométrica tridimensional submetido a um campo variável de coeficientes de troca térmica". Relatório Final apresentado ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Paraná.
- Vigneault, C., Goyette, B., 1994, "Fruit and Vegetable Precooling". Training Seminar of the NB Fruit Growers Association. Inc. Fredericton, Canada.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores Vagner Jorge Neckel, Viviana Cocco Mariani, Álvaro Cesar Camargo do Amarante e Adriano da Silva são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

MODELLING OF FREEZING PROCESS OF THE FOOD SUBJECT TO DIFFERENT CONVECTIVE HEAT-TRANSFER COEFFICIENT

¹Vagner Jorge Neckel, vagnerneckel@yahoo.com.br

¹Viviana Cocco Mariani, viviana.mariani@pucpr.br

²Álvaro Cesar Camargo do Amarante, alvaro.amarante@pucr.br

³Adriano da Silva, adrianodasilva.ufsj@gmail.com

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR
Rua Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, CEP: 80215-901, Curitiba, PR

²Programa de Graduação em Engenharia de Alimentos
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR
Rua Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, CEP: 80215-901, Curitiba, PR

³Universidade Federal de São João Del Rei – UFSJ
Av. Sebastião Gonçalves Coelho, 400, CEP: 35501-296, Divinópolis, MG, Brazil

Abstract: *In this work classical equations dependent on the composition of a food, were investigated and used for thermal conductivity and specific heat as a function of temperature. Combining these equations it was possible to obtain the enthalpy (H) as a function of temperature for the product in question. After a three-dimensional computer code using implicit finite difference method was developed and implemented to solve the equation of heat conduction in three-dimensional geometries in unsteady state. In order to validate the computational code and illustrate the use of prediction equations for thermophysical properties, associated with the method of numerical simulation during freezing of the product, it was employed experimental data of freezing of the product exposed to different air velocities. Prior knowledge of the convective heat-transfer coefficients, obtained experimentally, allowed to have as unknowns only the thermophysical properties of the product. The results show that the combination of the method to predict the thermophysical properties and modified equation of heat transfer used in this paper can predict with reasonable accuracy the evolution of temperature of the food before the freezing process.*

Key-words: *freezing, convective heat-transfer coefficient, enthalpy model, heat transfer*