

CARGA TÉRMICA VARIÁVEL COM O TEMPO DE MODELOS DE POLPAS DE FRUTAS EM CAIXAS COMERCIAIS DURANTE O CONGELAMENTO COM AR FORÇADO

Jaime Vilela de Resende

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica, - CEP 38400-089 - Uberlândia, MG
jvresende@mecanica.ufu.br

Vivado Silveira Jr.

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos
Caixa Postal 6121, Cid. Universitária Zeferino Vaz – CEP 13083-970 – Campinas, SP
vivaldo@ceres.fea.unicamp.br

Resumo. A carga térmica do produto é a maior carga submetida ao sistema de refrigeração. Neste trabalho dois métodos experimentais para a avaliação da carga térmica de modelos de polpas de frutas em túneis de congelamento com corrente forçada de ar foram empregados. O primeiro método é baseado no princípio do calorímetro de fluxo. A diferença de temperatura antes e após a passagem da corrente de ar de resfriamento pelo produto foi medida. O segundo método é baseado na resolução da equação diferencial ordinária (ODE) e os históricos de temperaturas experimentais descrevendo as variações da temperatura no produto foram usados para calcular os perfis de carga térmica de resfriamento e congelamento. Os resultados obtidos pelos dois métodos foram comparados. Um empilhamento de três caixas contendo 7, 5 e 3 camadas de produto foi congelado com diferentes temperaturas do ar de resfriamento e a velocidade do ar foi estabelecida pelo número de camadas do produto no interior das caixas. A análise percentual da remoção de calor permitiu verificar que para a configuração com maior quantidade de produto, praticamente 50% de todo o calor necessário para reduzir a sua temperatura até o nível desejado, ocorreu durante as duas horas iniciais do processamento e na média a maior diferença entre os valores medidos (método 1) e calculados (método 2) esteve em torno de 16,6%.

Palavras chave: carga térmica, alimentos congelados, transferência de calor, polpa de fruta

1. Introdução

A qualidade global de polpas de frutas congeladas pode ser afetada durante a preparação pré-congelamento, congelamento, transporte, distribuição e armazenamento posterior. Atualmente, o objetivo primário é o uso de técnica operacional do processo que mantenha tão próxima quanto possível as características de qualidade do produto original. Na etapa de congelamento, a principal área de atividade está nos estudos dos tempos de congelamento e na troca térmica do produto variável com o tempo, usando modelos matemáticos baseados em estudos da transferência de calor e mudança de fase simultaneamente.

Segundo Cleland e Özilgen (1998), os métodos de predição do tempo de congelamento têm sido melhorados significativamente nas últimas décadas e já não são os fatores que limitam a exatidão dos sistemas. O efeito das condições variáveis com o tempo também é importante. O projeto industrial freqüentemente necessita além do valor da carga térmica média do processo, estimativas das taxas de remoção de calor em função do tempo, para produtos e formas geométricas muito complexas.

A carga térmica do produto é geralmente, a maior carga submetida ao sistema de refrigeração, sendo a maior parte da remoção do calor verificada durante as primeiras horas do processo (Davey e Pham, 1997) e o conhecimento da sua variação durante este período torna-se necessária. Portanto, a carga térmica do produto afeta os custos inicial e operacional, sendo de vital importância para o dimensionamento do sistema (Cleland, 1990).

No congelamento de polpas de frutas embaladas, se o sistema é projetado incorretamente, problemas relativos à qualidade do processo ou produto podem surgir tais como taxa de resfriamento inadequada, crescimento microbiológico, alteração na consistência da polpa e mudanças em suas composições causadas por reações químicas durante o armazenamento posterior.

Atualmente um método simples e preciso de avaliação da variação da carga térmica não está disponível e a sua avaliação tem sido baseada em dados limitados e regras empíricas. Em vista da necessidade de condições adequadas para cada etapa do processo, exigidas pelo produto, o presente estudo tem como objetivos, determinar a variação da carga térmica variável com o tempo, durante o congelamento de sistemas modelo de polpas de frutas embaladas em sacos de polietileno (100 gramas) e acondicionados em caixas plásticas comerciais em túnel de congelamento com corrente forçada de ar; e, verificar a aplicabilidade de metodologias, desenvolvidas previamente para esta situação

específica tais como vazão de ar, coeficientes de transferência de calor e configurações geométricas do produto sobre o cálculo da carga térmica devido ao produto durante o congelamento.

2. Material e métodos

2.1. Determinação da carga térmica a partir da diferença da temperatura do ar de resfriamento

2.1.1. Sistema de medidas usando associação de termopares em série

A medida da carga térmica do produto neste estudo foi baseada no procedimento descrito por Lovatt et al (1993b) e Davey e Pham (1997). O método é baseado na medida da carga térmica sensível do produto, usando o ambiente do túnel como um calorímetro de fluxo. A temperatura do ar foi medida antes e após a passagem pelo produto (ΔT_{ar}), e a velocidade do escoamento de ar (v) no túnel também foi medida. A partir destas medidas a seguinte equação pode ser usada para o cálculo da carga térmica (Q):

$$Q = C_{p,ar} \rho_{ar} A_{tun} v \Delta T_{ar} \quad (1)$$

onde, A_{tun} é a área da seção do túnel de congelamento, e, $C_{p,ar}$ e ρ_{ar} são a capacidade térmica volumétrica específica e a densidade do ar respectivamente.

A variação na temperatura do ar foi quantificada por um arranjo de termopares dispostos na câmara antes e após a passagem da corrente de ar pelo produto (Fig. 1), sendo este arranjo, constituído de 24 ($n = 12$ pares) termopares tipo T (cobre-constantan) acoplados em série e espaçados de forma ponderada na seção da câmara de congelamento de acordo com o perfil da velocidade do ar obtido previamente (Resende, 2001).

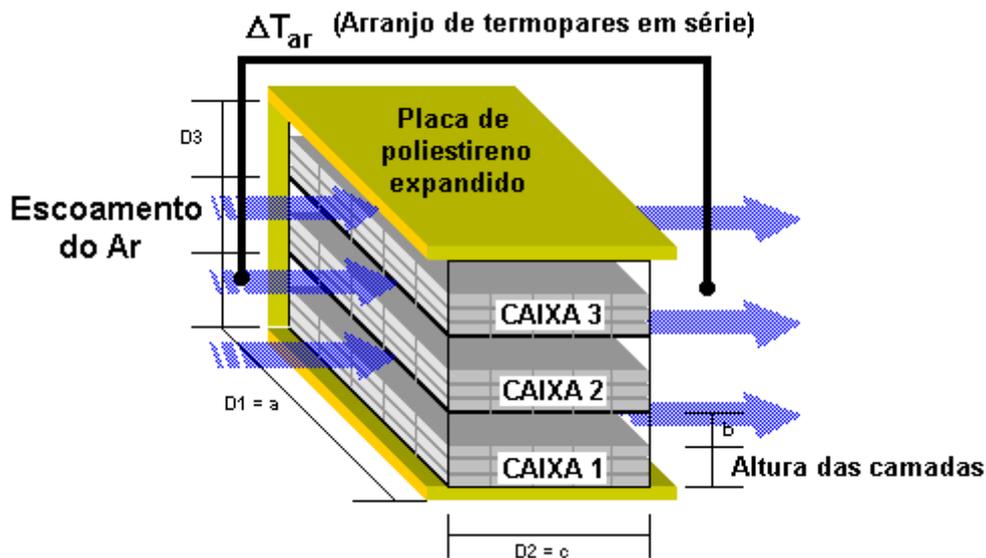


Figura 1. Montagem experimental para a medida da diferença da temperatura do ar.

2.1.2. Congelamento do produto

Um sistema modelo constituído de k-carrageenan e sacarose 10% (massa/volume de água) foi utilizado para simular amostras de polpas de frutas. Após a estabilização na temperatura de operação, o equipamento foi desligado e as caixas contendo as amostras já pesadas foram colocadas na câmara de congelamento. Para minimizar a entrada de calor proveniente do ambiente externo ao túnel, a operação completa de carregamento do produto na câmara, compreendendo o desligamento do sistema de refrigeração, abertura da porta da câmara, carregamento do produto, fechamento da porta e nova partida do equipamento, foi realizada em um tempo máximo de 70 segundos. Para evitar a formação de canais preferenciais, placas de poliestireno expandido foram colocadas nas seções laterais das caixas de forma que todo o fluxo de ar passasse por entre as amostras na câmara de congelamento. As placas de poliestireno expandido prensadas nas laterais das caixas também contribuíram para a redução das influências externas sobre as medidas da variação da temperatura do ar passando por entre as amostras (isolamento térmico).

Três níveis de temperaturas do ar de resfriamento (-30, -25 e -20 °C) foram testadas e a velocidade do ar foi estabelecida de acordo com a quantidade de produto, 7, 5 e 3 camadas de amostras colocadas em cada caixa, sendo o empilhamento o principal obstáculo ao fluxo de ar.

Os sinais dos sensores para a variação da temperatura diferencial foram obtidos pelo sistema de aquisição de dados com intervalos entre aquisições de 60 segundos. O encerramento dos ensaios foi estabelecido após a equalização das temperaturas do ar antes e após a passagem pelo produto detectada quando o valor da tensão correspondente ao

diferencial de temperatura na câmara de congelamento se aproximasse do valor da junção de referência (junta fria), observado através dos registros no sistema de aquisição de dados.

Para o planejamento experimental foram tomadas como variáveis a temperatura do ar e a quantidade de produto. Foram realizados 9 ensaios para cada condição experimental de arranjos de 7, 5 e 3 camadas de produto no interior das caixas e 3 níveis de temperatura, totalizando 81 ensaios do planejamento.

2.2. Cálculo da carga térmica liberada pelo produto durante o processo de congelamento

O procedimento é baseado na resolução de equações diferenciais ordinárias (ODE) apresentado por Lovatt et all (1993a). O método é extensivo a diferentes formas do produto e considera o calor trocado com o produto durante o processo de resfriamento como um todo (resfriamento (Φ_{resf}) (equação 2) e congelamento (Φ_{cong}) (equação 3)).

$$\phi_{resf} = VC_1 \frac{dT_{ma}}{dt} = \frac{E}{3} \frac{VZ_1 k_1}{L^2} (T_{ar} - T_{ma}) \quad (2)$$

$$\phi_{cong} = \lambda \frac{dV_f}{dt} = \lambda \frac{dV_f}{dx_f} \frac{dx_f}{dt} \quad (3)$$

onde, V é o volume do produto (m^3), C_1 é a capacidade térmica específica do produto descongelado (J/m^3), E é o equivalente de dimensionalidade de transferência de calor (EHTD) (Equivalent Heat Transfer Dimension), L é a dimensão característica paralela ao fluxo de ar (m), Z_n são raízes das equações transcendentais do tipo $\alpha \tan \alpha = C$, λ é avaliado pela equação (11) (J/kg) e x_f é a distância da frente de congelamento do centro térmico (m).

$$\frac{dx_f}{dt} = \frac{T_a - T_{ic}}{\lambda x_f^p \left[\frac{1}{hL^p} - \frac{(x_f^{1-p} - L^{1-p})}{k_s(1-p)} \right]} \quad (4)$$

e

$$\frac{dV_f}{dx_f} = N \left(\frac{x_f}{L} \right)^{N-1} \frac{V}{L} \quad (5)$$

Os valores dos coeficientes de transferência de calor efetivos (h) foram obtidos a partir de correlações Nusselt (Nu) versus Reynolds (Re) desenvolvidas considerando o diâmetro hidráulico (D_H) para estas situações específicas (equações 6 e 7) sendo utilizados valores médios entre as posições superiores e inferiores do arranjo de camadas no interior das três caixas do empilhamento (Resende, 2001).

$$\text{Para o topo: } Nu = 0,01575Re^{0,81439} \quad (6)$$

$$\text{Para o fundo: } Nu = 0,00754Re^{0,85461} \quad (7)$$

Quando $L'/D_H \leq 60$, $h = h_{2(eq)}[1+1,4(D_H/L)']$, onde $h_{2(eq)}$ é o valor obtido a partir das equações (6) e (7) e L' é o comprimento do duto.

As Tabelas (1) e (2) mostram as condições experimentais aplicadas aos modelos para todas as configurações experimentais testadas.

2.2.1. Cálculo da troca térmica de resfriamento

O cálculo da troca térmica de resfriamento foi feito através da equação (2) na qual o valor da temperatura do ar (T_{ar}) é obtida a partir das medidas experimentais e o valor da temperatura média do produto (T_{ma}) em cada etapa de tempo é proveniente da equação (8):

$$T_{ma} = \frac{H - H_{ic}}{C_1} + T_{ic} \quad (8)$$

onde H é a entalpia do produto (J/m^3) à temperatura (T), H_{ic} é a entalpia do produto na temperatura de início de congelamento (T_{ic}), e, C_1 é a capacidade térmica específica volumétrica ($J/m^3^{\circ}C$) do produto não congelado. Valores da entalpia e das demais propriedades termofísicas (condutividade térmica (k), densidade (ρ)) para o modelo de polpas de frutas em termos de funções polinomiais da temperatura de congelamento foram determinadas para todo o cenário experimental e podem ser encontradas com detalhes em Resende (2001).

A configuração geométrica do produto considerada em todos os cálculos foi o conjunto de 5 blocos retangulares com a maior dimensão paralela ao fluxo de ar igualmente espaçados no interior das caixas. Este tipo de configuração geométrica foi a que produziu os melhores acordos nas estimativas dos tempos de congelamento (Resende, 2001). Os valores dos parâmetros geométricos dependentes da forma do produto para os arranjos testados e usados nas equações estão apresentados na Tab. (3) e na Fig. (2).

Tabela 1. Condições experimentais para todas as configurações testadas

Configurações experimentais								
Arranjos de 7 camadas			Arranjos de 5 camadas			Arranjos de 3 camadas		
Exp.	T _{ar} (°C)	Massa(kg)*	Exp.	T _{ar} (°C)	Massa(kg)*	Exp.	T _{ar} (°C)	Massa(kg)*
01	-27,7	56,840	01	-26,3	42,630	01	-29,9	26,525
02	-27,2	56,705	02	-26,8	41,840	02	-30,6	27,160
03	-26,7	57,180	03	-28,2	41,635	03	-31,1	27,685
04	-27,2	57,345	04	-26,7	41,565	04	-30,6	26,655
05	-27,3	57,025	05	-29,0	42,031	05	-31,3	27,485
06	-27,4	57,335	06	-30,2	41,880	06	-31,8	27,140
07	-26,9	57,200	07	-28,4	41,265	07	-30,4	26,955
08	-27,9	56,470	08	-29,7	41,115	08	-32,4	27,175
09	-28,1	56,975	09	-29,4	41,510	09	-30,6	27,630
10	-22,7	57,105	10	-23,7	41,770	10	-20,7	26,895
11	-21,9	57,105	11	-21,6	41,455	11	-21,1	26,880
12	-25,0	57,275	12	-22,7	41,895	12	-20,9	26,995
13	-24,1	56,970	13	-22,9	42,075	13	-22,2	26,915
14	-25,2	56,950	14	-22,5	42,000	14	-21,1	27,085
15	-25,3	56,770	15	-21,7	42,070	15	-20,9	27,190
16	-25,7	56,330	16	-23,8	42,160	16	-22,8	26,990
17	-23,9	56,530	17	-23,8	41,665	17	-21,9	26,810
18	-24,6	56,250	18	-20,8	42,280	18	-23,4	27,095
19	-17,0	56,440	19	-18,7	41,950	19	-15,0	26,575
20	-17,1	56,700	20	-17,9	42,030	20	-15,2	26,825
21	-17,6	56,790	21	-16,4	41,440	21	-15,3	26,980
22	-17,1	56,655	22	-17,9	41,520	22	-17,8	26,720
23	-16,2	56,950	23	-17,8	41,660	23	-16,2	26,805
24	-16,7	56,645	24	-17,0	41,970	24	-16,8	26,915
25	-16,4	57,125	25	-17,5	41,565	25	-16,5	26,730
26	-16,5	56,690	26	-16,3	41,630	26	-19,1	26,920
27	-16,3	56,930	27	-17,2	41,795	27	-19,9	27,005
Total = 81 ensaios experimentais								

- Massa total do empilhamento de caixas/ensaio.

Tabela 2. Parâmetros para o ar de resfriamento aplicado aos modelos para a determinação da carga térmica (Resende, 2001).

Nº de camadas	$V_{ar} (m^3 / s)$	$h_{efetivo}$ (superior)	$h_{efetivo}$ (inferior)	$\bar{h}_{efetivo} (W / m^2 \cdot ^\circ C)$
7	0,2137	36,83	25,32	31,08
7	0,2220	36,02	24,69	30,35
7	0,1914	35,26	25,35	30,31
5	0,4258	32,99	23,08	28,04
5	0,4564	32,01	22,57	27,29
5	0,3941	31,68	21,91	26,79
3	0,5060	32,54	21,46	27,00
3	0,6521	28,80	21,45	25,13
3	0,5959	28,94	20,74	24,84

Tabela 3. Parâmetros geométricos referentes à forma do produto aplicada aos modelos para o cálculo da carga térmica do produto.

Camadas	V (m³)*	A (m²)	Bi	E	L (m)
7	0.004334	0.182275	0.806183	1.831218	0.0536
5	0.003096	0.15231	0.538633	1.610262	0.04
3	0.001858	0.122346	0.302889	1.316487	0.024

* Volume para um bloco individual.

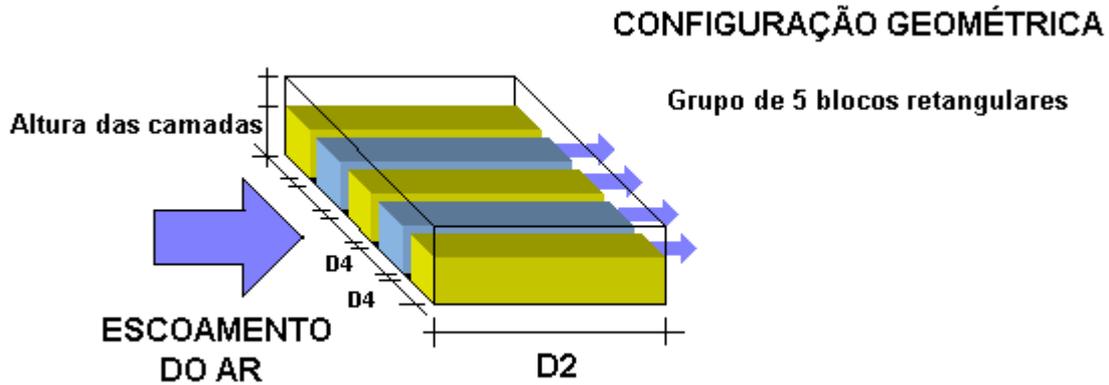


Figura 2. Configuração geométrica do produto considerada nos cálculos.

2.2.2. Cálculo da troca térmica de congelamento

O objetivo de se aplicar o método de cálculo baseado na variação da temperatura média do produto foi comparar os resultados obtidos por estas equações com as medidas experimentais da carga térmica do produto variável com o tempo provenientes das medidas das mudanças da temperatura do ar de resfriamento após a passagem pelo produto. Se h_{efetivo} e T_{ar} são considerados constantes a equação (9) derivada da equação de Plank para a avaliação da distância da frente de congelamento em relação ao centro térmico (x_f) pode ser utilizada Lovatt et all (1993a).

$$x_f = \left[\frac{2h \left(\frac{t(T_{\text{ar}} - T_{\text{ic}})}{Q_L} + \frac{L(1 + Bi/2)}{h} \right) + x_f^2 \frac{h}{k}}{2(1 + Bi)} \right] \quad (9)$$

A determinação do valor de x_f por este meio permite o cálculo da carga térmica de congelamento usando as equações (3), (4) e (5), onde o valor de λ é avaliado pela equação:

$$\lambda = H_{\text{ic}} + C_1 (T_{\text{ma}} - T_{\text{ic}}) - C_s (T_{\text{ic}} - T_{\text{ref}}) \quad (10)$$

Os valores de T_{ma} da equação (10) são obtidos segundo o seguinte critério:

$$T_{\text{ma}} = T_{\text{ic}} \quad \text{se } H > H_{\text{ic}} \quad (11)$$

$$T_{\text{ma}} = \frac{(H - a) - \sqrt{(H - a)^2 - 4bc}}{2b} \quad \text{se } H \leq H_{\text{ic}} \quad (12)$$

onde

$$c = \frac{H_{\text{ic}} - C_s (T_{\text{ic}} - T_{\text{ref}})}{\frac{T_{\text{ic}} - T_{\text{ref}}}{T_{\text{ref}}^2} + \left(\frac{1}{T_{\text{ic}}} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right)} \quad (13)$$

$$b = \frac{H_{\text{ic}} - \frac{c}{T_{\text{ic}}} + \frac{c}{T_{\text{ref}}}}{T_{\text{ic}} - T_{\text{ref}}} \quad (14)$$

$$a = -bT_{\text{ref}} - \frac{c}{T_{\text{ref}}} \quad (15)$$

Nas equações acima, H_{ic} é a entalpia (J/m^3) do produto na temperatura de início de congelamento (T_{ic}), e, T_{ref} é a temperatura na qual a entalpia do produto é fixada como 0 J/m^3 ($T_{\text{ref}} = -40 \text{ }^\circ\text{C}$).

Para a construção das curvas de carga térmica *versus* tempo a partir dos históricos da temperatura média do produto e temperatura do ar, a troca térmica calculada é ϕ_{resf} (equação 2) até que ϕ_{cong} seja maior que ϕ_{resf} . Após isto então a carga térmica é ϕ_{cong} , calculada pela equação (3).

2.3. Comparação dos métodos experimentais e calculados para a carga térmica variável com o tempo

Segundo Davey e Pham (1997), a rápida taxa de variação da carga térmica do produto com o tempo torna difícil a comparação dos erros entre os valores instantâneos, tais como os picos de carga térmica. Como estão sendo comparadas duas metodologias para a determinação da carga térmica a ser retirada do produto pelo sistema de refrigeração, uma alternativa é tomar o calor total (J) removido durante as primeiras horas (2 horas) e usá-lo na equação (14).

$$\Delta(\%) = \frac{(Q_{T,2h,exp} - Q_{T,2h,calculado})}{Q_{T,2h,exp}} \times 100\% \quad (14)$$

2.4. Calor removido do produto durante o processo de congelamento

O calor total removido do produto obtido por integração numérica das curvas de carga térmica *versus* tempo foi dividido em duas etapas: a primeira relacionada à remoção do calor sensível do resfriamento, ou o calor trocado com o ar necessário para resfriar o produto da temperatura inicial até a temperatura de início de congelamento. O ponto final deste estágio é marcado pela temperatura de início de congelamento ($T_{ic} = -0,73 \text{ }^\circ\text{C}$ para a solução modelo) que pode ser facilmente identificada nos históricos de temperatura para a caixa toda monitorada. Uma média dos valores apresentados nos históricos foi utilizada para a localização do ponto relativo ao tempo de processamento onde a transição para o estágio de congelamento ocorre. A integração é feita no intervalo compreendido entre o instante em que é feito o carregamento do produto na câmara de congelamento e o tempo correspondente ao último registro da temperatura desejada do produto ($T_f = -18 \text{ }^\circ\text{C}$) verificado nos históricos de temperatura.

3. Resultados e discussão

3.1. Medidas experimentais da carga térmica variável com o tempo

Os resultados das medidas experimentais das temperaturas diferenciais do ar na câmara de congelamento pelo arranjo de termopares ligados em série para um experimento com arranjo de 7 camadas de amostras no interior das caixas pode ser visualizado no gráfico da Fig. 3.

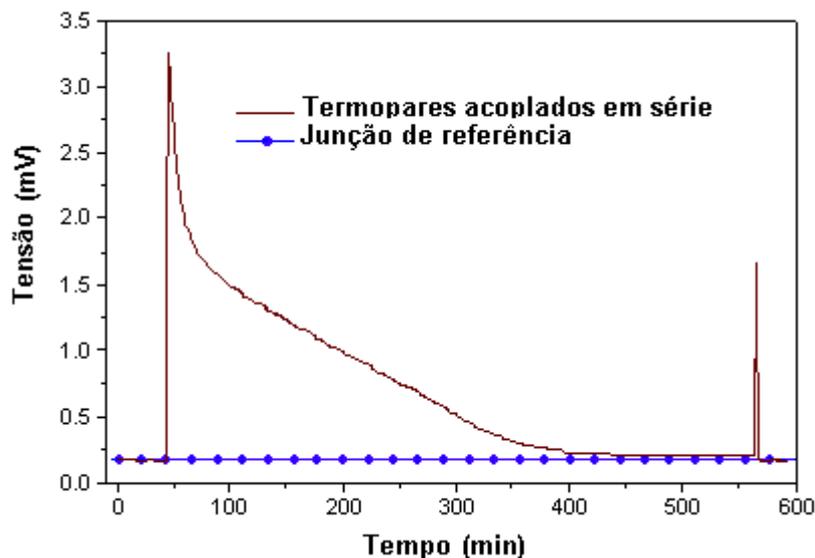


Figura 3. Medidas dos sinais gerados pela associação de 24 termopares acoplados em série para a determinação do diferencial de temperatura na câmara de congelamento para ensaios com arranjos de 7 camadas de produto.

Os picos observados na Fig. (3) nos pontos $t = 45$ e $t = 565$ min representam os instantes em que foram realizadas a carga e a descarga, respectivamente, do produto na câmara de congelamento.

3.2. Carga térmica do produto variável com o tempo

A Figura (4) mostra as curvas da variação da carga térmica com o tempo calculada pela equação (1) a partir das medidas experimentais dos diferenciais de temperatura e das vazões do ar de resfriamento para um empilhamento de três caixas contendo arranjos de 7, 5 e 3 camadas de embalagens do produto no nível 2 de temperatura do ar de

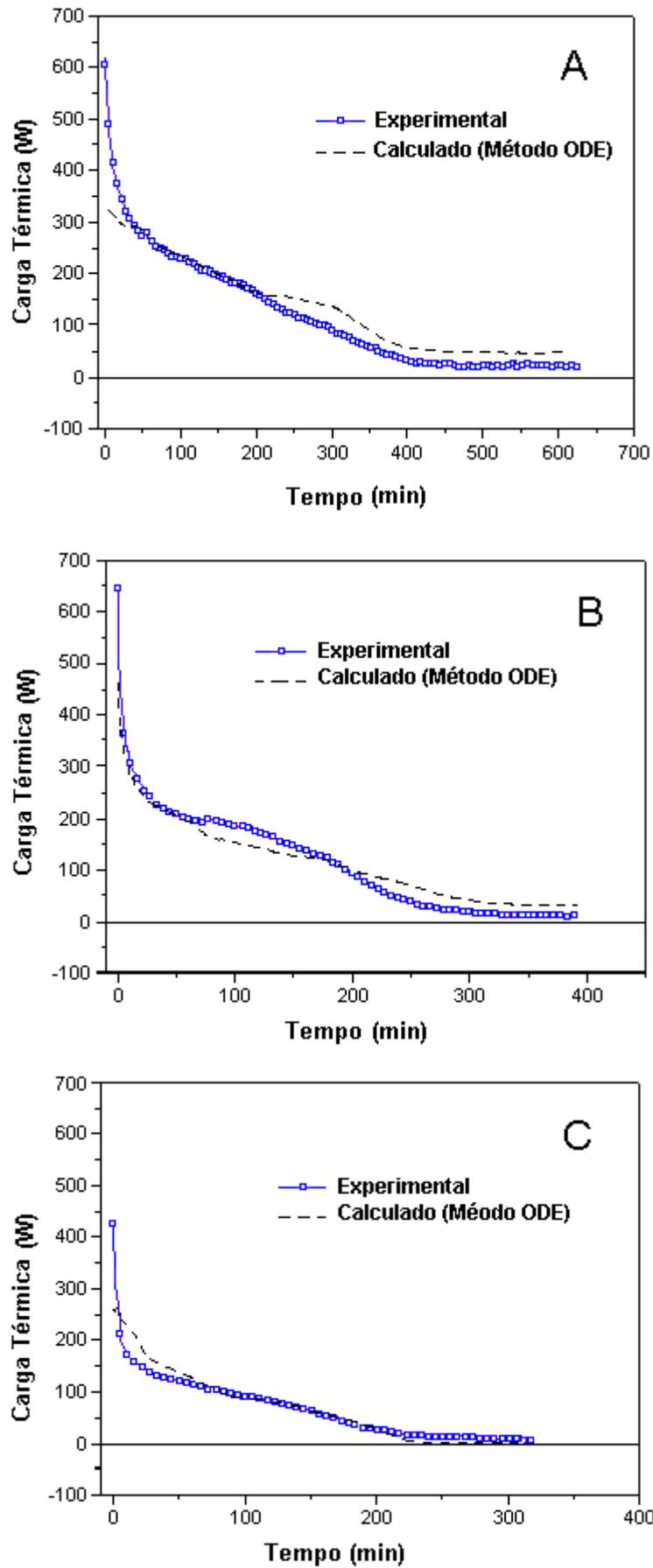


Figura 4. Comparação entre os métodos para a medida da carga térmica de um empilhamento de 3 caixas com arranjos de (A) 7, (B) 5 e (C) 3 camadas de produto e nível 2 de temperatura do ar de resfriamento.

resfriamento do planejamento experimental. Também estão mostradas, as curvas das cargas térmicas resultantes dos cálculos pelo método ODE, proposto por Lovatt et all.(1993a) para as respectivas configurações experimentais.

Observa-se nos gráficos da Fig. (4), que as curvas da variação da carga térmica sensível do produto com o tempo apresentaram comportamentos distintos para as diferentes condições experimentais. As curvas da carga térmica calculada pela resolução de equações diferenciais, utilizando dados dos históricos de temperaturas experimentais não se apresentaram uniformes durante o processo.

Diversos autores (Cleland , 1985; Lovatt et all 1993 a,b, e Davey e Pham, 1997) apontam como a principal fonte de erros nos balanços de energia as medidas nas taxas do fluxo do ar de resfriamento e a infiltração de calor proveniente do ambiente externo. A resolução destes problemas tem sido levada em consideração desde a montagem experimental desenvolvendo uma metodologia para uma avaliação mais precisa da vazão de ar passando pelo produto, eliminação de canais preferenciais e isolamento térmico das laterais do empilhamento dirigindo o fluxo de ar e forçando-o a passar por entre as caixas contendo o produto

Observa-se das curvas da Fig. (4), que em muitas situações os modelos usados no método ODE subestimam os valores da carga térmica do produto nos estágios iniciais do processamento e superestimam posteriormente. Este comportamento pode ser visualizado através da diferença percentual em relação aos valores experimentais avaliados durante todo o tempo de processamento como mostrado no gráfico da Fig. (5).

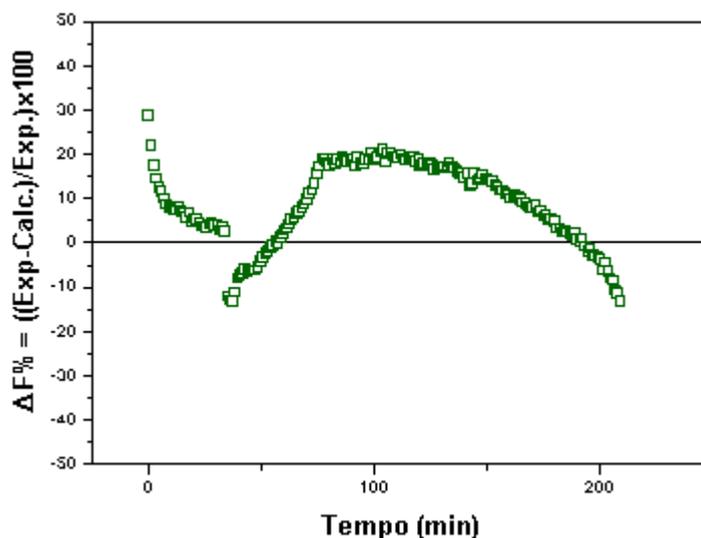


Figura 5. Diferença percentual entre os valores da carga térmica calculados pelo método ODE em relação aos valores experimentais durante o processo de congelamento para a configuração com arranjos de 5 camadas.

As diferenças percentuais entre os valores obtidos pela resolução de equações diferenciais em relação aos valores medidos apresentam resultados mais regulares, para configurações com arranjos de 5 camadas que apresentaram variações na faixa de 20 a -15% como mostrado na Fig. (5). Para experimentos com arranjos de 3 camadas, superestimativas pontuais de 40% dos resultados calculados em relação aos valores medidos são verificadas nos estágios iniciais do processo. As variações foram mais pronunciadas para arranjo de 7 camadas, principalmente nos instantes finais, em alguns pontos resultando dispersões de até 90% entre os métodos.

Davey e Pham (1997) mencionam que é a rápida variação da carga térmica com o tempo que dificulta estes tipos de comparações e propõem a metodologia descrita na seção 2.3 como a melhor forma de avaliar estas diferenças. A Tabela (4) mostra os parâmetros estatísticos das diferenças médias ($\bar{\Delta}\%$) entre os métodos para todas as configurações testadas.

Tabela 4. Parâmetros estatísticos para todas as configurações testadas.

Temperatura	Nº_Exp.	7 Camadas		5 Camadas		3 Camadas	
		$\bar{\Delta}\%$ (%)	DP(%)	$\bar{\Delta}\%$ (%)	DP(%)	$\bar{\Delta}\%$ (%)	DP(%)
Nível 1	9	12,9	19,2	1,02	15,8	5,4	23,6
Nível 2	9	16,6	7,2	0,9	6,3	13,6	15,0
Nível 3	9	-9,7	14,8	7,6	16,7	14,1	15,9

Uma diferença negativa indicou que a carga térmica calculada para este período foi maior que o valor experimental. Na Tab. (4), verifica-se que na média, o calor removido calculado pelo método ODE durante as duas primeiras horas de resfriamento foi menor que o valor medido, sendo a maior diferença em torno de 16,6 % para uma diferença média, que apresentou um desvio padrão razoável quando comparado com outros tratamentos. A melhor

aproximação entre os métodos ocorreu para arranjos de 5 camadas de produto em experimentos com o nível 2 de temperatura apresentando um erro médio inferior a 1% e um desvio padrão relativamente pequeno. Estas diferenças podem ser atribuídas às simplificações do modelo e considerações geométricas.

3.3. Efeito da quantidade de produto sobre a carga térmica variável com o tempo

A Figura (6) mostra o gráfico da carga térmica sensível do congelamento no nível 2 de temperatura do ar de resfriamento dos empilhamentos de 3 caixas de produto contendo arranjos de 7, 5 e 3 camadas, obtidas a partir das medidas experimentais da diferença da temperatura do ar medida antes e após a passagem pelo empilhamento, da vazão e das propriedades de transporte do ar (equação 1). No gráfico também estão mostrados, os pontos que determinam o calor total removido até duas horas de processamento ($Q_{T,2h,exp}$) e o calor total removido durante todo o experimento ($Q_{T,Proc,exp}$) provenientes da integração numérica sob as curvas, delimitadas por estes pontos.

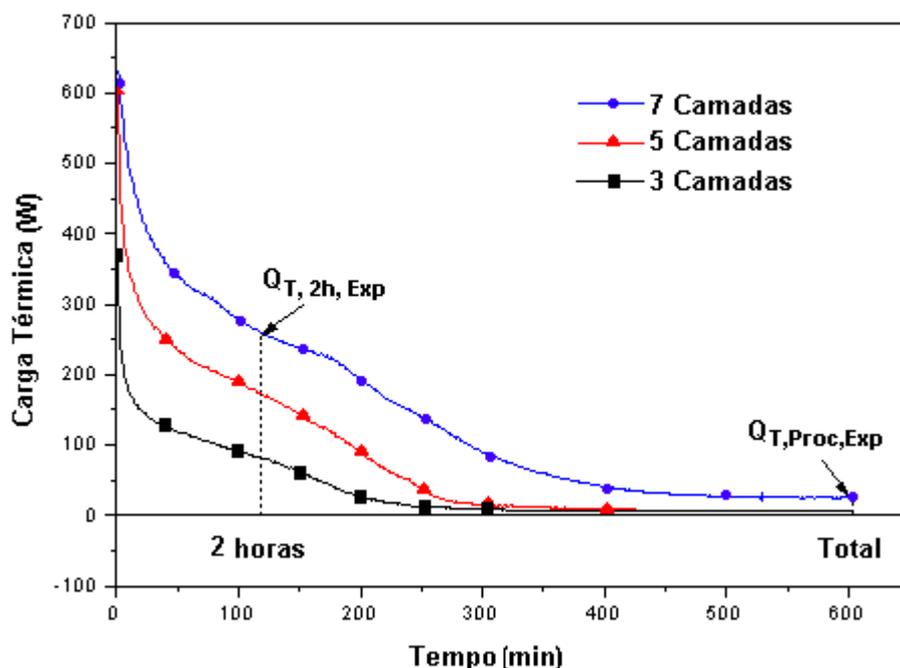


Figura 6. Medidas experimentais da carga térmica sensível do produto do empilhamento de 3 caixas contendo 7, 5 e 3 camadas de produto e nível 2 da temperatura do ar de resfriamento.

A Tabela (5) mostra os resultados obtidos da integração numérica.

Tabela 5. Resultados da integração numérica sob as curvas da Fig.(6).

Calor removido do produto durante o processamento				
Nº de camadas	Massa média(kg)	$Q_{T,2h,exp}$ (MJ)	$Q_{T,Proc,exp}$ (MJ)	QR _{2h} (%)
7	56,809	2,55	5,21	48,9
5	41,930	1,78	2,82	63,1
3	26,984	0,89	1,36	65,4

Para as mesmas condições operacionais, considerando a parcela do calor retirada do produto no estágio inicial do congelamento, a quantidade de produto e o tempo de processamento, os dados apresentados na Tab. (5) mostram e reafirmam a importância de se avaliar a carga térmica do produto variável com o tempo durante as primeiras horas do processamento. A análise da última coluna da direita da Tab. (5) que descreve o percentual de remoção do calor do produto (QR_{2h}) em relação ao calor total removido durante todo o processo, permite verificar que para a configuração com maior quantidade de produto (mais difícil de congelar), praticamente 50% de todo o calor necessário para o produto reduzir a sua temperatura até o nível desejado, foi removido durante este período inicial.

3.4. Análise da carga térmica de resfriamento e congelamento

O gráfico da Fig. (7) mostra a variação da carga térmica do produto variável com tempo, avaliadas pelas medidas experimentais, para configurações com arranjos de 5 camadas nos diferentes níveis de temperatura do ar de resfriamento.

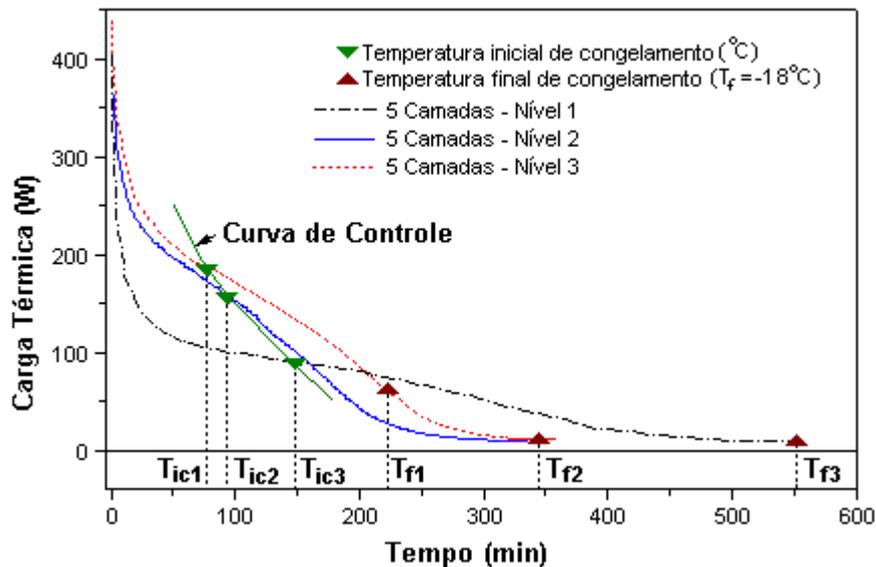


Figura 7. Carga térmica do produto variável com o tempo para ensaios com arranjos de 5 camadas e diferentes níveis de temperatura do ar.

A principal aplicação dos métodos de medidas é a visualização das condições do resfriamento do produto. Para este tipo de análise o processo de congelamento foi dividido em dois estágios, resfriamento e congelamento, sendo a temperatura de início de congelamento, o ponto correspondente a transição dos estágios.

No gráfico da Fig. (7) o calor removido do produto durante a etapa de resfriamento é determinado pelas curvas da carga térmica variável com o tempo nos intervalos delimitados entre o momento do carregamento do produto na câmara de congelamento ($t = 0$ min) e o ponto correspondente ao instante em que o produto atinge a temperatura de início de congelamento (T_{ic1} para o nível 1, T_{ic2} para o nível 2 e T_{ic3} para o nível 3 de temperatura do ar de resfriamento). O calor removido durante o período de mudança de fase é avaliado nos intervalos definidos de T_{ic1} a T_{f1} ($T_{f1} = T_{f2} = T_{f3} = -18$ °C, temperatura final de congelamento) para o nível 1, T_{ic2} a T_{f2} para o nível 2 e de T_{ic3} a T_{f3} para o nível 3 de temperatura do ar de resfriamento. Os instantes correspondentes a T_{ic} e T_f são obtidos dos históricos de temperaturas das caixas monitoradas e são determinados pela média dos tempos correspondentes ao valor de T_{ic} fornecidas pelas leituras dos termopares localizados nas diferentes posições no interior das caixas.

A Tabela (6) mostra os instantes em que T_{ic} e T_f ocorrem durante o processo e o calor removido durante os estágios de resfriamento e congelamento para o tipo de configuração experimental da Fig. (7).

Tabela 6. Parâmetros usados para a determinação do calor removido durante as etapas de resfriamento e congelamento para experimentos com arranjos de 5 camadas e diferentes níveis de temperatura do ar de resfriamento.

Temperatura (°C)	$t(T_{ic})$ (min)	$t(T_f)$ (min)	Q_{resf} (MJ)	Q_{cong} (MJ)	Q_{Total} (MJ)	resf/total (%)
Nível 1	78,0	221,1	1,12	1,11	2,23	49,8
Nível 2	94,1	343,2	1,20	0,80	2,00	40,0
Nível 3	147,5	553	1,09	1,00	2,09	52,2

A relação entre o calor removido em cada estágio e a quantidade de produto (kJ/kg) processada para todas as configurações testadas está mostrada na Fig. (8). Se a quantidade de produto é a mesma, independente do nível de temperatura do ar de resfriamento, as barras que representam a quantidade de calor removido durante um determinado estágio (resfriamento ou congelamento) deveriam ou tenderiam a se igualarem.

Vários fatores poderiam influenciar as pequenas diferenças observadas na Fig. (8), entre estes podemos atribuir ao controle da temperatura inicial do produto, à infiltração de calor na câmara, e à identificação do tempo que define a transição do estágio de resfriamento para congelamento através da temperatura de início de congelamento que produz resultados que variam de acordo com a localização dos sensores para as medida das temperaturas.

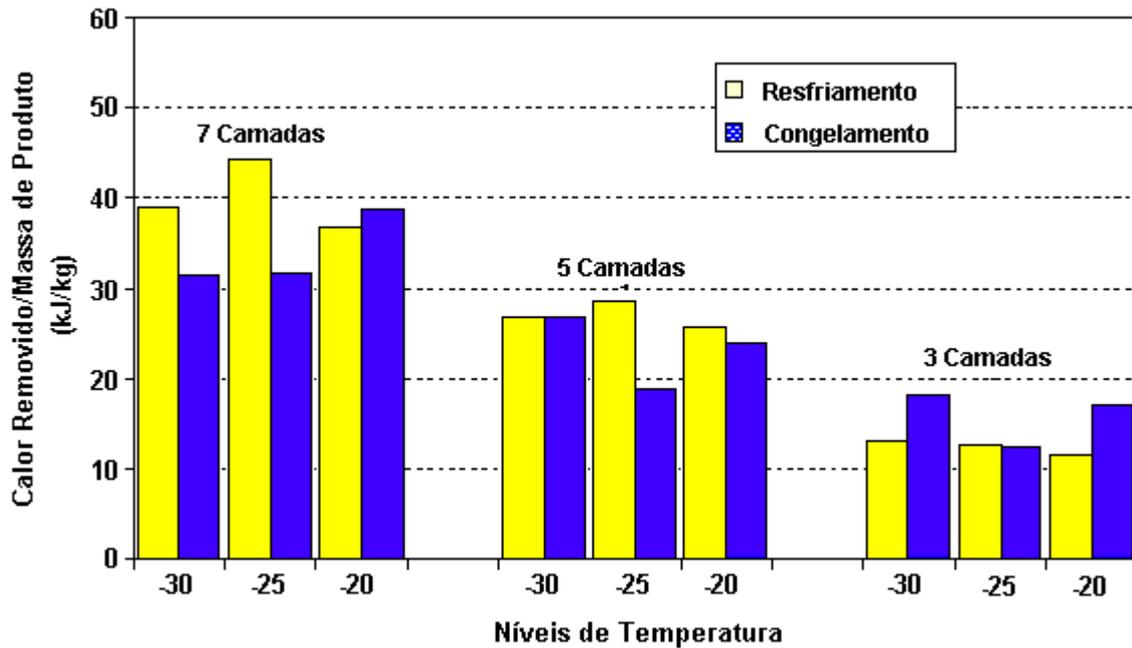


Figura 8. Relação entre o calor removido (kJ) durante as etapas de resfriamento e congelamento e a quantidade de produto (kg) processada.

4. Conclusões

A análise do percentual de remoção do calor do produto em relação ao calor total removido durante todo o processo permitiu verificar, que para a configuração com maior quantidade de produto (mais difícil de congelar), praticamente 50% de todo o calor necessário para o produto reduzir a sua temperatura até o nível desejado, foi removido durante as duas horas iniciais do processamento. As medidas experimentais e os balanços térmicos mostraram que os arranjos de 7 camadas de produto no interior das caixas apresentaram uma eficiência térmica bastante alta sugerindo a existência de grandes coeficientes de transferência de calor superficiais nos espaços vazios entre as embalagens que não foram detectados pelo método de medida.

Considerando a mesma quantidade de produto e a divisão do processo em dois estágios (resfriamento e congelamento) delimitados pelo tempo correspondente à temperatura de início de congelamento, as quantidades de calor removidas durante um determinado estágio, tendem a se igualarem independentemente do nível de temperatura do ar de resfriamento confirmando a compatibilidade entre medidas em diferentes tratamentos.

O tipo de configuração geométrica considerada, embora tenha produzido bons resultados nos cálculos, merece um estudo mais específico, devido às irregularidades do leito que geram parâmetros incertos e grandes dispersões para os balanços térmicos principalmente para arranjos de 7 camadas.

A aplicação dos métodos de medidas e dos resultados experimentais para as avaliações está voltada para situações que permitam a visualização das condições do resfriamento do produto criando a possibilidade de montar estratégias de controle do sistema de refrigeração. O princípio é baseado em se traçar curvas de controle (Fig. 7) para definir as condições de operação do sistema visando produzir o mesmo efeito esperado na remoção do calor conforme as exigências do produto quanto ao tempo de processamento.

5. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro à pesquisa.

6. References

- Cleland, A. C., 1985, "Use of Dynamic Simulation in the Design of Food Freezing Equipment. Food Engineering and Process Applications". Proceedings of the Fourth International Congress on Engineering and Food, Vol.2, Alberta, Canada, pp.55-65.
- Cleland, A. C., 1990, "Food Refrigeration Process. Analysis, Design and Simulation". Elsevier Applied Science: London e New York. 1990. 284p.
- Cleland, A.C. and Özilgen, S., 1998, "Thermal Design Calculations for Food Freezing Equipment: Past, Present and Future", International Journal of Food Refrigeration, Vol.21, No. 5, pp.359-371.
- Davey, L. M. and Pham, Q. T., 1997, "Predicting the Dynamic Product Heat Load and Weight Loss During Beef Chilling using a Multi-region Finite difference Approach", International Journal of Refrigeration. Vol.20, No. 7, pp.470-482.

- Lovatt, S. J.; Pham, Q. T.; Loeffen, M. P. F. and Cleland, A. C., 1993a, "A New Method of Predicting the Time-Variability of Product Heat Load during Food Cooling. - Part 1: Theoretical Considerations", Journal of Food Engineering, Vol.18, pp.13-36.
- Lovatt, S. J.; Pham, Q. T.; Loeffen, M. P. F. and Cleland, A. C., 1993b. "A New Method of Predicting the Time-Variability of Product Heat Load during Food Cooling - Part 2: Experimental Testing", Journal of Food Engineering, Vol.18, pp.37-62.
- Resende, J. V. (2001) Heat Transfer Analyses for the Freezing of Fruit Pulps in Commercial Boxes. D.Sc. thesis, State University of Campinas, Campinas, São Paulo, Brazil. 321p.

HEAT LOAD VARIABLE WITH THE TIME OF FRUIT PULP MODELS DURING THE AIR BLAST FREEZING

Jaime Vilela de Resende

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila 2160 – Bloco 1M – Campus Santa Mônica, CEP 38400-089 – Uberlândia/MG
jvresende@mecanica.ufu.br

Vivaldo Silveira Jr.

Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia de Alimentos
Cx.Postal 6121- Cid. Universitária Zeferino Vaz - Dist. Barão Geraldo CEP 13083-970 – Campinas/SP
vivaldo@ceres.fea.unicamp.br

Abstract. *The Product heat load is the main load submitted to the refrigeration systems. In this work, two experimental methods for the evaluation of the fruit pulp models heat load in air blast freezing were used. The first method is based on the flow calorimeter principle. Thermocouples coupled in series arrays was placed before and after the product in the airflow and differential temperature were measured. Second method is based on the resolution of ordinary differential equation (ODE) and the experimental temperatures histories describing the temperature changes in the product were used to calculate the time variable heat load profiles of cooling and freezing. The results obtained by the two methods were compared. Three plastic boxes, that are used in industry, were filled with arrays of 7, 5 and 3 layers of polyethylene bags (0,100 kg) and frozen under different air temperatures and different air velocities (determined by the product layers numbers inside of the boxes). Percentual analysis of the heat removal allowed to verify that for the configuration with greater product amount, practically 50% of all the necessary heat to reduce its temperature until the desired level, occurred during the two initial hours of processing. The heat removed during the 2 hours calculated by the second method was 16,6% lower than the experimental values obtained by the air temperatures difference in the freezing chamber.*

Keywords. *Heat load, frozen foods, heat transfer, fruit pulps*