

Coeficientes de Transferência de Calor Efetivos no Congelamento com Ar Forçado de Modelos de Polpas de Frutas em Caixas Comerciais

Effective Heat Transfer Coefficients in the Air Blast Freezing of Fruit Pulp Models in Commercial Boxes

AUTORES AUTHORS

✉ **Jaime Vilela de RESENDE**
LEST/FEMEC/UFU - Av. João Naves de Ávila, 2160,
Bloco 1M - Campus Santa Mônica
CEP: 38400-089 Uberlândia/MG
e-mail: jvresende@mecânica.ufu.br

Lincoln de Camargo NEVES FILHO **Vivaldo SILVEIRA JÚNIOR**

DEA/FEA/UNICAMP – Caixa Postal 6121
Cidade Universitária Zeferino Vaz – Distrito Barão
Geraldo - CEP: 13083-970 Campinas/SP
e-mail: neveslin@ceres.fea.unicamp.br
vivaldo@ceres.fea.unicamp.br

RESUMO

Os coeficientes de transferência de calor efetivos durante o congelamento com corrente forçada de ar de amostras de solução-modelo de polpas de frutas embaladas e acondicionadas em caixas foram medidos sob condições operacionais encontradas na prática comercial. Um corpo de prova de alumínio foi usado para determinação dos coeficientes de transferência de calor superficiais efetivos entre o topo e o fundo de cada caixa do empilhamento. Os resultados foram apresentados como correlações adimensionais baseadas no diâmetro hidráulico de canais retangulares formados entre as caixas do empilhamento. Os efeitos da temperatura, velocidade do ar, posição no interior das caixas e posição da caixa no empilhamento sobre os coeficientes de transferência de calor foram analisados. Os coeficientes de transferência de calor, que preditos pelas correlações adimensionais baseadas no diâmetro hidráulico, foram usados satisfatoriamente para representar as características do leito, principalmente para arranjos de 5 e 3 camadas de produto. Os coeficientes de transferência de calor superficiais efetivos variaram entre o topo e o fundo das caixas e foram influenciados pela quantidade de produto estabelecida pelo número de camadas dos arranjos.

SUMMARY

The effective surface heat transfer coefficients during air blast freezing of plastic polyethylene packages containing fruit pulp models, conditioned inside multi layer boxes, were evaluated under conditions encountered in commercial practice. The results were presented as non-dimensional correlations based on the hydraulic diameter of the rectangular ducts. The effects on the surface heat transfer coefficient of the air temperature, air velocity, transducer position inside the boxes and box position in the pillage on the surface, were analyzed. The results show: the effect of air-cooling temperature on the surface heat transfer is negligible in the range encountered in blast freezing practice. The effective surface heat transfer coefficients predicted by the non-dimensional correlations based on hydraulic diameter were successfully used to represent the bed irregularities, mainly in arrangements of 5 and 3 layers. The effective surface heat transfer coefficients varied according to the position between the top and the bottom of the boxes and was influenced by the number of layers in the arrangements.

PALAVRAS-CHAVE KEY WORDS

Alimentos congelados; Calor-transmissão;
Frutas-indústria / Frozen foods; Heat transfer;
Fruit industries.

1. INTRODUÇÃO

O coeficiente global de transferência de calor entre a superfície do produto e o meio de resfriamento é um importante parâmetro nos estudos do tempo de congelamento de alimentos. Em sistemas nos quais o meio de transferência é ar frio, como nos túneis de congelamento, um dos fatores que controlam a taxa de congelamento é o coeficiente de transferência de calor convectivo (CHAVARRIA, HELDMAN, 1984).

Em condições normais, os coeficientes de transferência de calor variam com a temperatura, com a umidade do ar e principalmente com a velocidade do ar. No congelamento de sistemas particulados (leito fixo ou fluidizado), os coeficientes de transferência dependem ainda da porosidade do leito e das propriedades do escoamento de ar. Segundo KONDJOYAN, DAUDIN (1997), deve-se distinguir o coeficiente de transferência de calor convectivo do coeficiente efetivo. Além do calor transferido por convecção, o último inclui o calor transferido por condução entre os corpos em contato, radiação ou por mudança de fase, quando esta ocorre.

Poucos valores experimentais de coeficientes de transferência de calor convectivos foram obtidos nos últimos anos e são freqüentemente relacionados a um tipo de operação específica. Os valores dos coeficientes fornecidos na literatura de engenharia química na forma de números adimensionais, tal como Nusselt em função do número de Reynolds para placas, cilindro ou esfera, são raramente utilizados em modelos porque levam a valores calculados diferentes dos resultados experimentais (KONDJOYAN, DAUDIN, BIMBENET, 1993).

Uma grande faixa de magnitudes para valores de coeficientes de transferência de calor superficiais ("h") tem sido relatada. NICOLAÏ, De BAERDEMAEKER (1996) citam valores típicos de 300 W/ m² °C obtidos durante o hidrorresfriamento de frutas e hortaliças, enquanto no resfriamento com ar forçado, "h" pode variar entre 8 e 68 W/m² °C.

Informações envolvendo valores de "h" para as superfícies de alimentos com formas regulares encontram-se disponíveis na literatura (ARCE, SWEAT, 1980, LIND, 1988, CLELAND, 1990, LEBLANC, KOK, TIMBERS, 1990a,b, KONDJOYAN, DAUDIN, 1993, CLELAND, CLELAND, JONES, 1994, SALVADORI, MASCHERONI, De MICHAELIS, 1996). Valores de "h" associados a diferentes geometrias, superfícies e arranjos dos espaçamentos das embalagens não têm sido determinados.

A determinação dos coeficientes de transferência de calor em volta de produtos alimentares ainda tem sido um tópico restrito a condições específicas de processamento. Para o congelamento de produtos alimentares em caixas, valores obtidos da literatura têm mostrado que os coeficientes de transferência de calor superficiais variam notavelmente, quando a medida é feita em diferentes localizações ao longo das camadas de produto no interior da caixa. Assim, valores dos coeficientes são diferentes entre o topo e o fundo da caixa e, portanto, estudos que ignoram estas variações devem ser tratados com bastante cuidado (PHAM, WILLIX, 1985, MANNAPERUMA, SINGH, REID, 1994a,b).

Neste trabalho os objetivos foram: 1) Desenvolver uma metodologia para a estimativa dos coeficientes de transferência de calor efetivos (h_{efetivo}) aplicáveis ao congelamento de polpas de frutas embaladas em sacos de polietileno (100g) e acondicionadas em caixas, examinando o comportamento da distribuição de temperaturas, das variáveis no estado transiente, avaliando-o no centro térmico com um corpo de prova metálico. 2) Caracterizar o processo por meio da determinação dos coeficientes de transferência de calor efetivos em um túnel de congelamento com corrente forçada horizontal. 3) Quantificar os coeficientes de transferência de calor efetivos, levando em consideração a localização entre as camadas dos produtos embalados no interior das caixas (topo e fundo).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Montagem do corpo de prova metálico para a determinação de h_{efetivo}

O corpo de prova consiste de uma placa de alumínio com as mesmas dimensões das amostras no qual foram feitas cinco perfurações, onde foram inseridos termopares tipo T (cobre-constantan, diâmetro 32 AWG). A Figura 1 mostra um esquema da construção do corpo de prova metálico. Os espaços vazios em volta dos termopares no interior da placa foram preenchidos com pasta térmica para evitar a formação de bolsas de ar dentro do corpo de prova. A montagem (corpo de prova + termopares) foi posicionada no interior da caixa contendo as amostras em localizações preestabelecidas de forma a quantificar os valores dos coeficientes de calor convectivos e suas variações ao longo das diferentes posições (topo e fundo) nas camadas de produto no interior das caixas de acordo com o empilhamento. Para assegurar o fluxo de calor unidirecional, o corpo de prova foi revestido com isolante térmico de poliestireno expandido (Figura 2). A cada ensaio experimental a posição do corpo de prova foi variada no interior de cada caixa do empilhamento, que possuíam arranjos de 3, 5 e 7 camadas de produtos.

2.2 Processo de congelamento do produto

2.2.1 Preparo das amostras pré-congelamento

As amostras foram constituídas de soluções-modelo compostas por 0,5% (massa/volume de H₂O) de K-carrageenan (DANISCO) e 10% (massa/volume H₂O) de sacarose, embaladas em sacos de polietileno de 100 gramas.

Anterior ao processo de congelamento, para criar uma diferença de temperatura apreciável entre o corpo de prova metálico e a temperatura do ar de resfriamento na câmara de congelamento e assegurar uma uniformidade e homogeneidade térmica da temperatura inicial das amostras

no interior das caixas, estas foram imersas em um tanque com agitação com fluxo contínuo de água à temperatura constante (26°C) proveniente do sistema de refrigeração por um período de 3 horas. A seguir, as amostras foram rapidamente organizadas em arranjos de 7, 5 ou 3 camadas no interior das caixas, e o corpo de prova foi posicionado entre as amostras e as caixas levadas para a câmara de congelamento.

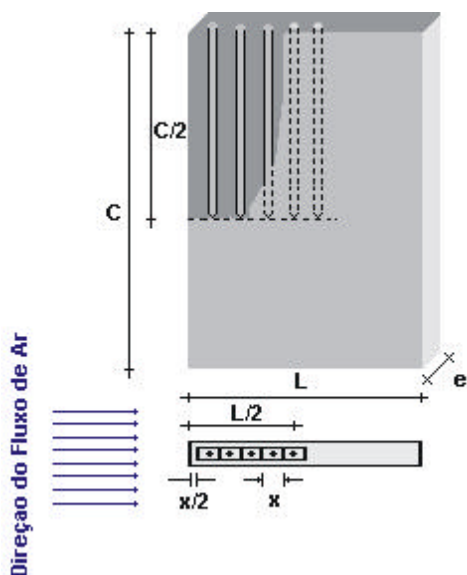


FIGURA 1. Regiões de localização de termopares no corpo de prova metálico (placa de alumínio) para determinação dos coeficientes de transferência de calor efetivos.

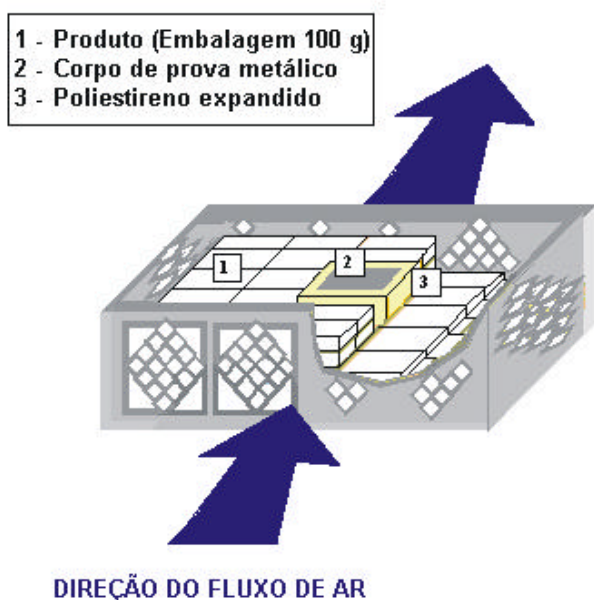


FIGURA 2. Posicionamento do corpo de prova metálico entre as embalagens de polpas de frutas, envolvido por material isolante (poliestireno expandido) para uma caixa do empilhamento.

2.2.2 Congelamento do produto

Após atingir a estabilização do equipamento na temperatura de operação, as três caixas contendo as amostras e o corpo de prova, foram empilhadas na câmara de congelamento. Para evitar a formação de canais preferenciais, placas de poliestireno expandido foram colocadas nas seções laterais das caixas, fazendo com que todo o fluxo de ar da câmara passasse por entre as aberturas das caixas contendo o produto. A monitoração da temperatura do corpo de prova foi realizada em intervalos de 1 minuto.

2.3 Medidas da velocidade do ar

As medidas da velocidade do ar foram feitas por um anemômetro de fio quente (TSI, USA, Modelo 8330-M) com leituras em toda a seção da câmara para cada corrida. As vazões do ar em cada experimento foram obtidas por integração numérica da distribuição das velocidades (RESENDE, 2001) do ar ao longo da seção da câmara de congelamento.

2.4 Planejamento experimental

A Tabela 1 mostra os níveis dos fatores de cada variável combinada, segundo um planejamento fatorial, sendo que as coordenadas do corpo de prova e posicionamento das caixas estão esclarecidas na Figura 3.

TABELA 1. Fatores e níveis dos fatores considerados no planejamento experimental.

Fatores	Níveis dos Fatores		
	+	0	-
1 - Temperatura nominal do ar (°C)	Nível 1 (-30)	Nível 2 (-25)	Nível 3 (-20)
2 - Quantidade de produto (camadas/caixa)	7	5	3
3 - Posição da caixa	Caixa 3	Caixa 2	Caixa 1
4 - Posição no interior da caixa P(x,y) (m)	Topo	-	Fundo

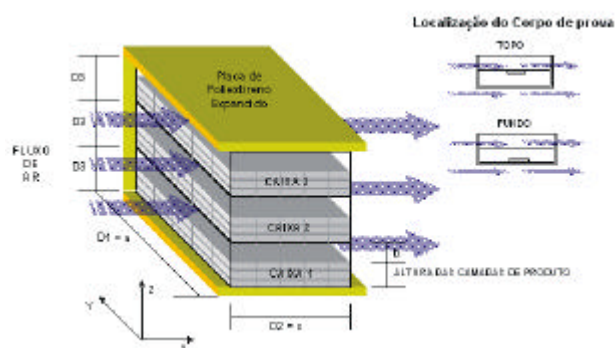


FIGURA 3. Empilhamento das caixas no interior da câmara de congelamento, arranjo das camadas de produto no interior das caixas e localização do corpo de prova no interior das caixas (topo e fundo) para avaliação dos coeficientes de transferência de calor efetivos.

2.5 Cálculo dos coeficientes de transferência de calor

Os cálculos dos coeficientes de transferência de calor foram feitos após a obtenção das curvas de resfriamento do corpo de prova metálico. Os coeficientes angulares (S_2) da regressão linear de $\ln[(T_m - T_{ar})/(T_i - T_{ar})]$ versus t foram calculados e usados na equação (1) para encontrar os coeficientes de transferência de calor efetivo. T_m é o valor médio obtido a partir dos valores das leituras dos cinco termopares localizados no interior do corpo de prova metálico e T_i é a temperatura inicial da placa de alumínio.

$$h_{efetivo} = \frac{-r_{Al} V C_{pAl} S_2}{A} \quad (1)$$

onde V é o volume do corpo de prova (m^3), A é a área superficial do corpo de prova (m^2), ρ_{Al} é a densidade do alumínio (kg/m^3) e C_{pAl} é o calor específico do alumínio (J/kgK).

Os valores de V , A e r_{Al} para o corpo de prova de alumínio utilizados para o cálculo do coeficiente efetivo estão apresentados na Tabela 2.

2.6 Correlações adimensionais para determinação do coeficiente de transferência de calor efetivo

O corpo de prova metálico no interior da caixa foi colocado na posição central da camada de produto no topo e no fundo do arranjo de camadas. Nestas posições, a placa de alumínio pode ser considerada como parte da parede de um duto retangular de lados "a", "b" e comprimento "c".

A dimensão "b" é avaliada pela diferença entre a altura da caixa (D_3) e a altura do leito, e é estabelecida pelo número de camadas do arranjo das embalagens do produto no interior das caixas.

Os dutos retangulares considerados compreenderam os espaços não ocupados pelo arranjo de camadas de produto entre as três caixas por onde o ar foi forçado a passar (canais preferenciais). A velocidade (v) do ar, passando através destes canais, foi aproximada pela relação entre a vazão (V) e a área disponível para o escoamento (A_E) conforme a expressão:

$$v = \frac{V}{A_E} \quad (2)$$

Estas aproximações foram usadas para a obtenção de correlações Nusselt versus Reynolds a partir dos valores dos coeficientes de transferência de calor efetivos experimentais do item 2.5 e os números Reynolds (Re_{D_H}) e Nusselt (Nu_{D_H}) foram calculados a partir do diâmetro hidráulico (D_H) pelas seguintes relações (REINICK, SCHWARTZBERG, 1985).

$$Nu = 0,116[(Re)^{2/3} - 125] Pr^{1/3}[1 + (D_H/L)^{2/3}] \quad (3)$$

para $2000 < Re < 10000$ e

$$Nu = 0,023(Re)^{0,8} Pr^{1/3} \quad (4)$$

para $Re \geq 10000$.

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 (3) ou (4) e L' é o comprimento do duto.

Para um duto retangular de lados a , b , o raio hidráulico (R_H) e o diâmetro hidráulico (D_H) de um canal são dados pelas seguintes equações (PERRY, GREEN, 1984):

$$R_H = \frac{ab}{2(a+b)} \quad (5)$$

$$D_H = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (6)$$

onde as dimensões a e b são aquelas apresentadas na Figura 3.

Considerando as dimensões das amostras apresentadas na Tabela 3, os diâmetros hidráulicos dos dutos retangulares considerados foram obtidos para experimentos com 7, 5 e 3 camadas de produtos (Tabela 3).

TABELA 2. Parâmetros geométricos e propriedades termofísicas do corpo de prova de alumínio usados para a determinação do coeficiente de transferência de calor efetivo.

Parâmetros Geométricos				
Comprimento (m)	Largura (m)	Espessura (m)	Area (m^2)	Volume (m^3)
0,1214	0,0796	0,0160	$9,66 \times 10^{-3}$	$1,545 \times 10^{-4}$
Propriedades Termofísicas do Alumínio* (293 K)				
Densidade, ρ_{Al} (kg/m^3)	Capac.Térmica, C_{pAl} (J/kgK)	Cond. Térmica, k_{Al} (W/mK)		
2701,1	904	229		

* WELTY, WICKS, WILSON (1984)

TABELA 3. Parâmetros utilizados para a obtenção do diâmetro hidráulico.

Nº de Camadas	Lado a (m)	Lado b (m)	Diam Hidráulico D_H (m)
7	0.585	0.013	0.0254
5	0.585	0.045	0.0836
3	0.585	0.077	0.1361

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Curvas de resfriamento

Cinco curvas tempo-temperaturas foram obtidas em cada experimento de congelamento, uma para cada um dos termopares localizados nas diferentes posições no interior do corpo de prova metálico. A Figura 4 mostra as temperaturas adimensionais obtidas a partir das leituras dos termopares no interior do corpo de prova.

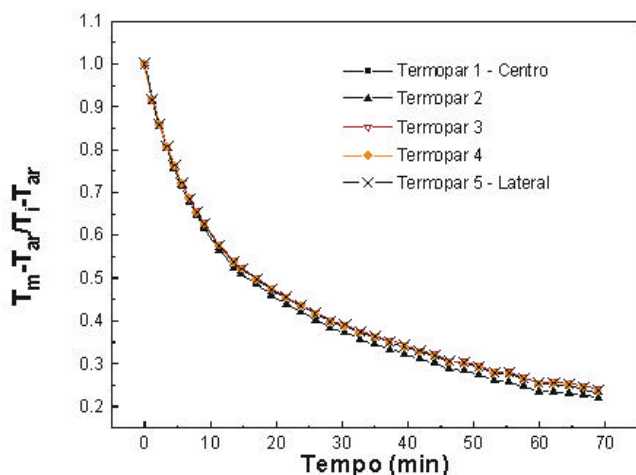


FIGURA 4. Temperaturas adimensionais obtidas das leituras dos termopares posicionados no interior do corpo de prova metálico durante o resfriamento.

O pequeno valor de Biot característico do corpo de prova representa o caso no qual a resistência interna é muito pequena e existe maior capacidade à transferência de calor por condução do que por convecção. Neste caso, a convecção é o fenômeno que restringe a transferência de calor e os gradientes de temperatura no interior do corpo de prova metálico são bastante pequenos como se pode observar na Figura 4. Observa-se um alto grau de uniformidade da placa de alumínio, pela pequena variação da temperatura para termopares localizados em diferentes posições do corpo de prova. Por conseguinte a temperatura média (T_m), pode ser substituída por um único sensor de temperatura localizado no centro do corpo de prova.

A Figura 5 mostra as curvas de resfriamento do corpo de prova quando localizado no topo do arranjo com a superfície exposta em contato direto com o fluido em movimento, e na camada inferior do arranjo com a superfície de transferência de calor voltada para o fundo da caixa. O fundo da caixa é composto de um material plástico com perfurações que reduzem a área de exposição necessária para a troca de calor e limita o contato direto da superfície do corpo de prova metálico com o ar de resfriamento.

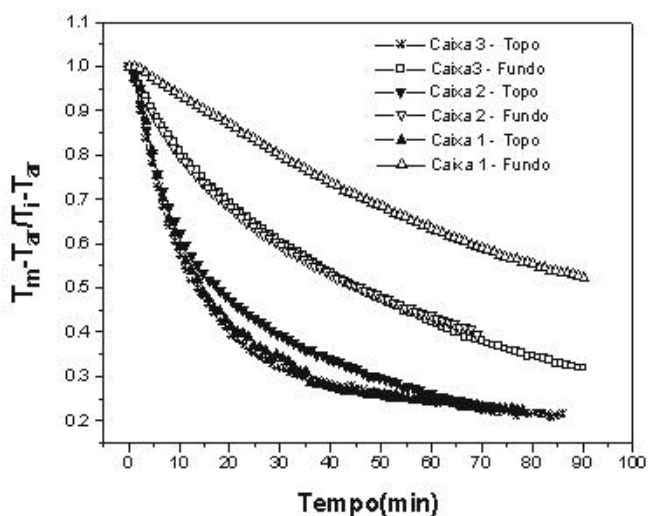


FIGURA 5. Dados experimentais para o resfriamento do corpo de prova metálico posicionado no topo e no fundo de arranjos de 5 camadas de produtos no interior das caixas 3, 2 e 1 do empilhamento.

Observa-se, na Figura 5, que as condições de contorno são assimétricas quando se faz uma análise das curvas de resfriamento em caixas individuais e este efeito é produzido pela resistência que o material do fundo da caixa oferece a transferência de calor diferenciando os perfis do fundo e do topo.

3.2 Determinação dos coeficientes de transferência de calor efetivos

A Figura 6 apresenta o gráfico do logaritmo neperiano da temperatura adimensional $[(T_m - T_{ar}) / (T_i - T_{ar})]$ versus tempo para a determinação dos valores dos coeficientes de transferência de calor para um arranjo de 5 camadas de produto nos níveis 1, 2 e 3 de temperatura. Estes foram feitos a partir dos dados de resfriamento durante o período em que a temperatura do ar e a condutividade térmica das amostras nas caixas se mantiveram praticamente constante.

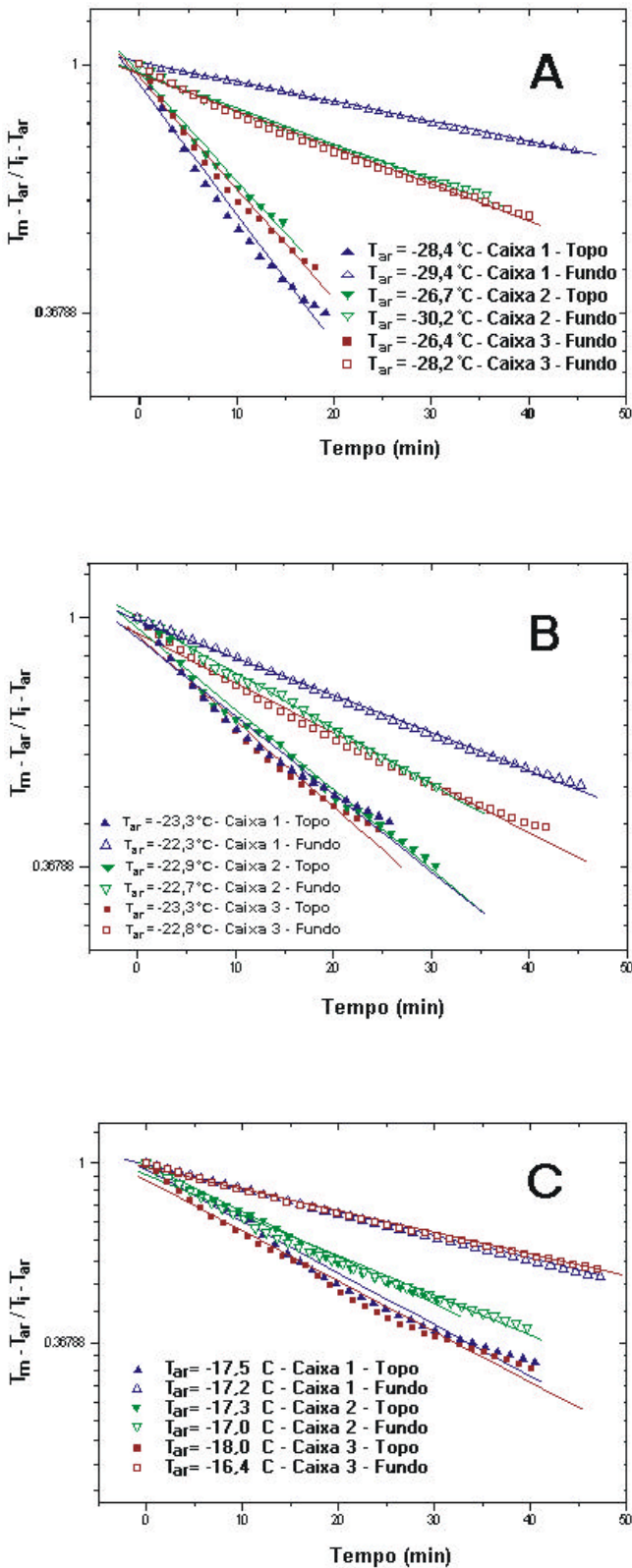


FIGURA 6. Inclinação das curvas para medidas dos coeficientes de transferência de calor para arranjos de 5 camadas no mesmo nível de temperatura (A) Nível 1, (B) Nível 2 e (C) Nível 3.

Os valores dos coeficientes de transferência de calor médios efetivos para todas as corridas experimentais, obtidos a partir do corpo de prova metálico localizado no topo e no fundo do arranjo de camadas, estão apresentados na Tabela 4.

3.3 Obtenção dos números de Nusselt experimentais e análise dos resultados e correlações experimentais

Os parâmetros envolvendo a posição do corpo de prova metálico nos arranjos das camadas de produtos no interior das caixas ($P < 0,01$), o número de camadas nos arranjos ($P < 0,05$) e a posição da caixa no empilhamento ($P < 0,01$) e algumas interações entre estes fatores exercem uma influência significativa sobre os valores dos coeficientes de transferência de calor obtidos a partir dos experimentos, como se pode observar na Tabela 5, que apresenta a análise de variância dos valores dos coeficientes de transferência de calor efetivos experimentais apresentados na Tabela 4, para os principais fatores considerados no planejamento experimental.

A Tabela 5 mostra que a temperatura do ar não exerce uma influência significativa sobre os valores obtidos para os coeficientes de transferência de calor efetivos obtidos experimentalmente. Estes resultados permitem restringir a influência da temperatura, unificar as correlações e enfatizar a dependência desta correlação da velocidade do ar e dos diferentes tipos de configurações experimentais. Portanto, os valores calculados de h_{efetivo} (Tabela 4) foram ajustados para a obtenção das equações adimensionais (7) e (8) para o corpo de prova localizado no topo e no fundo das caixas, respectivamente.

$$\text{Para o topo: } Nu = 0,0158Re^{0,8143} \quad (7)$$

$$\text{Para o fundo: } Nu = 0,0075Re^{0,8546} \quad (8)$$

As curvas mostradas na Figura 7 representam as predições obtidas por estas equações em comparação com os resultados experimentais.

3.4 Efeitos sobre a localização do corpo de prova metálico no interior das caixas

Para análise dos resultados experimentais deve-se considerar: a) as caixas individualmente, devido à grande diferença observada nas condições de contorno; b) localizações das caixas em posições superiores do empilhamento (caixas 2 e 3) que apresentam condições experimentais semelhantes ou compatíveis (velocidades e temperatura do ar); c) a caixa da base do empilhamento (caixa 1) que se encontra apoiada sobre uma placa de poliestireno expandido que, além de impedir o contato do fundo da caixa com a corrente do ar de resfriamento, atua como isolante térmico, reduzindo drasticamente os “coeficientes de transferência de calor” no fundo das caixas a valores que são típicos da convecção natural.

TABELA 4. Valores experimentais para os coeficientes de transferência de calor médios efetivos obtidos a partir das curvas de resfriamento do corpo de prova metálico.

Valores dos Coeficientes de Transferência de Calor Superficiais Médios (W/m ² °C)								
Posição	Cm	Caixa	T _{ar} (°C)	h _{efetivo}	T _{ar} (°C)	h _{efetivo}	T _{ar} (°C)	h _{efetivo}
Topo	7	3	-27,7	17,86	-24,7	16,34	-17,0	13,77
Fundo	7	3	-26,7	16,32	-24,9	15,48	-17,6	15,00
Topo	7	2	-27,2	14,60	-24,8	16,03	-17,0	15,76
Fundo	7	2	-27,4	13,78	-25,4	13,86	-16,7	9,34
Topo	7	1	-27,0	10,47	-25,6	11,06	-16,3	13,73
Fundo	7	1	-28,1	9,13	-24,6	4,15	-16,3	7,71
Topo	5	3	-30,0	28,84	-23,9	22,42	-16,5	18,27
Fundo	5	3	-31,0	9,47	-22,7	13,01	-16,8	7,71
Topo	5	2	-30,6	27,77	-23,2	20,92	-17,8	16,62
Fundo	5	2	-30,8	9,27	-22,8	14,48	-17,9	13,99
Topo	5	1	-30,5	28,01	-23,8	20,24	-15,0	18,58
Fundo	5	1	-30,4	5,05	-23,4	9,16	-16,3	8,40
Topo	3	3	-26,4	22,94	-23,8	18,82	-18,0	25,87
Fundo	3	3	-28,2	10,73	-22,8	17,53	-16,4	24,49
Topo	3	2	-26,7	22,02	-22,9	19,51	-17,8	19,61
Fundo	3	2	-30,2	13,71	-22,7	17,61	-17,0	16,65
Topo	3	1	-28,4	19,18	-23,8	17,90	-17,5	11,21
Fundo	3	1	-29,2	5,75	-22,8	8,78	-17,2	5,78

TABELA 5. Análise de variância para os resultados dos coeficientes de transferência de calor efetivos experimentais apresentados na Tabela (4).

Fatores	SQ	G.L.	QM	F	F _{tab.}	Nível-p
1. Posição corpo de prova	677,415	1	677,415	72,931	7,41	0,01*
2. Posição da caixa	155,739	2	77,864	8,383	5,26	0,01*
3. Número camadas	69,578	2	34,789	3,745	3,27	0,05*
4. Temperatura do ar	6,709	2	3,355	0,361	2,46	0,1
5. (1 × 2)	20,487	2	10,243	1,103	2,46	0,1
6. (1 × 3)	104,088	2	52,044	5,603	5,26	0,01*
7. (1 × 4)	50,680	2	25,340	2,728	2,46	0,1*
8. (2 × 3)	20,271	4	5,068	0,547	2,11	0,1
9. Resíduo	334,382	36	9,288			
10. Total	1439,34	53				

* Significativo com o nível p de probabilidade.

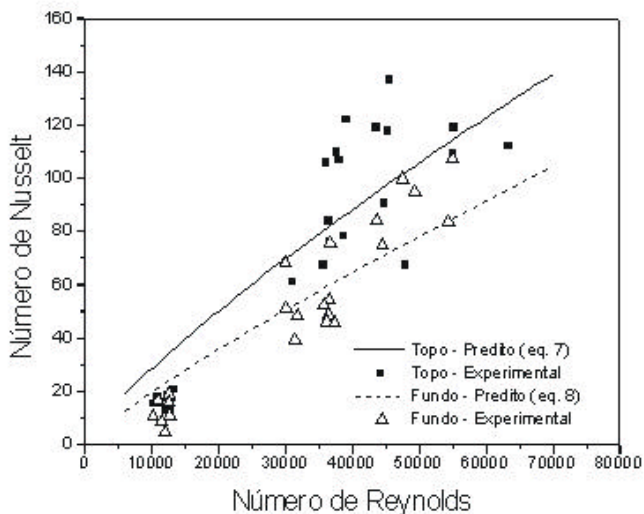


FIGURA 7. Correlações entre os números de Nusselt e Reynolds a partir das equações ajustadas ($R^2 = 0,008$ e $0,999$ - Equações 7 e 8) para experimentos com o corpo de prova localizado no topo e no fundo do arranjo de camadas no interior das caixas.

Analisando os coeficientes de transferência de calor efetivos nas posições topo e fundo de uma caixa individual também se observa uma grande diferença com os maiores valores quando o corpo de prova estava posicionado no topo do arranjo das camadas em contato direto com a corrente de ar. A Figura 8 mostra as diferenças percentuais relativas ($\Delta TF\%$) entre os valores dos coeficientes de transferência de calor efetivos obtidos a partir do corpo de prova localizado no topo e no fundo das caixas para as diferentes configurações.

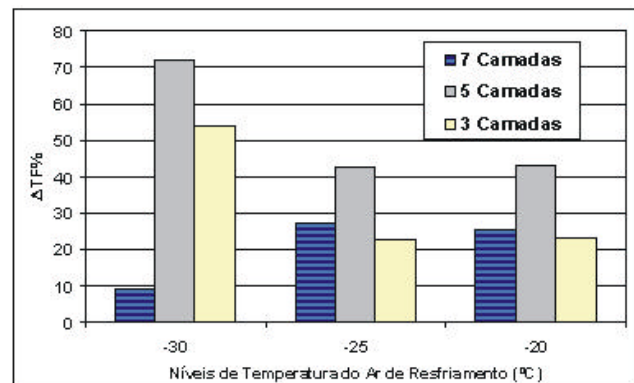


FIGURA 8. Diferença média percentual ($\Delta TF\%$) entre os coeficientes de transferência de calor efetivos obtidos a partir do corpo de prova localizado no topo e no fundo das caixas para as diferentes configurações experimentais.

3.5 Efeitos da temperatura do ar

A temperatura afeta as propriedades térmicas e físicas do ar que afetam os números adimensionais Re , Pr e Nu . Quando é feita a análise dos dados da Tabela 5 construída a partir de valores experimentais, pode-se afirmar que a temperatura de resfriamento do ar não influenciou significativamente os valores dos coeficientes de transferência de calor superficiais efetivos. Esta observação é a mesma relatada por MANNAPERUMA, SINGH, REID (1994b). A justificativa é que a faixa de temperatura encontrada durante o congelamento de alimentos com corrente forçada de ar é

muito estreita e o efeito da temperatura sobre o coeficiente de transferência de calor por meio das mudanças das propriedades do ar é muito pequeno.

Os valores médios ($\bar{\Delta}\%$) (equação 9) da diferença entre os valores de Nusselt calculados pelas equações baseadas no diâmetro hidráulico (REINICK, SCHWARTZBERG, 1985) e os valores experimentais para os três tipos de configurações são mostrados na Figura 9.

$$\Delta\% = \frac{Nu - Nu_{exp}}{Nu_{exp}} \quad (9)$$

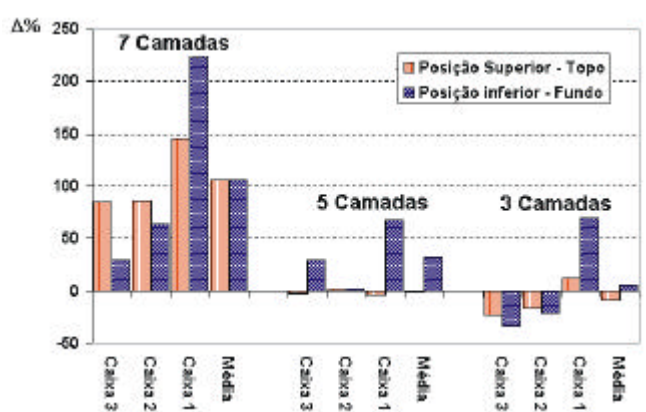


FIGURA 9. Diferença média ($\bar{\Delta}\%$) entre os valores de Nusselt calculados a partir das equações (7) e (8) e os resultados experimentais obtidos para o corpo de prova localizado no topo e no fundo sob diferentes condições de escoamento.

Na média, os valores obtidos pelas correlações baseadas no diâmetro hidráulico para estas configurações foram as que forneceram os melhores resultados, quando comparados aos obtidos com o corpo de prova principalmente para experimentos com arranjos de 5 e 3 camadas e o corpo de prova localizado no topo dos arranjos. Para estes arranjos, o uso das correlações resulta em valores com uma diferença percentual média inferior a 9,1% comparados aos resultados experimentais. Para o corpo de prova localizado no fundo de arranjos de 7 camadas esta diferença se torna mais pronunciada, acima de 100%.

4. CONCLUSÕES

Em configurações contendo diferentes arranjos de camadas de produtos, os coeficientes de transferência de calor superficiais efetivos variam acentuadamente em diferentes posições entre o topo e o fundo das caixas. A variação percentual relativa entre os valores avaliados nestas posições foi de 10 a 70% dependendo da configuração experimental, sendo a maior variação observada para arranjos com 5 camadas de produto e as menores para arranjos de 7 camadas. Estes valores foram justificados em termos da área livre para o escoamento nas diferentes configurações e do contato da corrente do ar de resfriamento com o corpo de prova usado nas medidas.

As análises experimental e teórica dos efeitos da temperatura do ar de resfriamento indicam que estes não exercem influências significativas sobre os valores dos coeficientes de transferência de calor superficiais efetivos na faixa de condições descritas pelo planejamento experimental.

As correlações desenvolvidas são baseadas no diâmetro hidráulico de dutos retangulares formados entre as caixas e são adequadas para arranjos de 3 e 5 camadas, onde os dutos retangulares formados entre as caixas do empilhamento são bem definidos. Para estas configurações, as diferenças médias percentuais estiveram em torno de 9,11%, quando os valores foram comparados com os resultados experimentais para o corpo de prova, localizado na posição superior dos arranjos de camadas e de 34% quando posicionado no fundo.

Arranjos de 7 camadas apresentaram uma grande diferença (acima de 100%) entre os valores experimentais e preditos. Esta configuração é uma situação extrema, com quantidade excessiva de produto oferecendo grande resistência à passagem de ar pelo produto e dificultando a definição das condições do escoamento do ar de resfriamento. Esta configuração não é recomendada e não se aplica na prática do congelamento em túneis comerciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCE, J.A., SWEAT, V.E. Survey of published heat transfer coefficients encountered in food refrigeration processes. **ASHRAE Transactions**, **82**(6):235-260, 1980.
- CHAVARRIA, V.M., HELDMAN, D.R. Measurement of convective heat transfer coefficients during food freezing processes. **Journal of Food Science**. **49**:810-814, 1984.
- CLELAND, A.C. **Food refrigeration process**. Analysis, design and simulation. Elsevier Applied Science: London e New York. 1990. 284p.
- CLELAND, D.J., CLELAND, A.C., JONES, R.S. Collection of accurate experimental data testing the performance of simple methods for food freezing time prediction. **Journal of Food Process Engineering**, **17**:93-119, 1994.
- KONDJOYAN, A., DAUDIN, J.D., BIMBENET, J.J. Heat and mass transfer coefficients at the surface of elliptical cylinders placed in a turbulent air flow. **Journal of Food Engineering**, **20**:339-367, 1993.
- KONDJOYAN, A., DAUDIN, J.D. Heat and mass transfer at the surface of a pork hindquarter. **Journal of Food Engineering**, **32**:225-240, 1997.
- LeBLANC, D.I., KOK, R., TIMBERS, G.E. Freezing of a parallelepiped food product. Part 1. Experimental determination. **International Journal of Refrigeration**, **13**:371-378, 1990a.
- LeBLANC, D.I., KOK, R., TIMBERS, G.E. Freezing of a parallelepiped food product. Part 2. Comparison of experimental and calculated results. **International Journal of Refrigeration**, **13**:371-392, 1990b.
- LIND, I. Surface heat transfer in thawing by forced air convection. **Journal of Food Engineering**, **7**:19-39, 1988.

MANNAPERUMA, J.D., SINGH, R.P., REID, D.S. Effective surface heat transfer coefficients encountered in air blast freezing of whole chicken and chicken parts, individually and in packages. **International Journal of Refrigeration**, **17**(4):263-272, 1994a.

MANNAPERUMA, J.D., SINGH, R.P., REID, D.S. Effective surface heat transfer coefficients encountered in air blast freezing of single plastic wrapped whole turkey. **International Journal of Refrigeration**, **17**(4):273-280, 1994b.

NICOLAÏ, B.M., De BAERDEMAEKER, J. Sensitivity analyses with respect to the surface heat transfer coefficient as applied to the thermal process calculations. **Journal of Food Engineering**, **28**:21-33, 1996.

PERRY, H.P., GREEN, D. Perry's Chemical Engineer's Handbook. 6th edition, McGraw-Hill, Inc., 1984.

PHAM, Q.T., WILLIX, J. Heat transfer coefficients in the air blast freezing of rows of cartons. **In: Proceedings of 17th Int. Congress of Refrigeration**, p.350-357, 1987.

REINICK, A.R., SCHWARTZBERG, H.G. Coefficients for air-to-solid heat transfer for uniformly spaced arrays of rectangular foods. **Food Engineering and Process Applications. In: Proceedings of Fourth International Congress on Engineering and Food**, v.1, p.273-283, 1985. Alberta, Canada.

RESENDE, J.V. **Análise do processo de transferência de calor para o congelamento de polpas de frutas em caixas comerciais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 2001, 321p.

SALVADORI, V.O., MASCHERONI, R.H., De MICHAELIS, A. Freezing of strawberry pulp in large containers: Experimental determination and prediction of freezing times. **International Journal of Refrigeration**, **19**(2):87-94, 1996.

WELTY, J.R., WICKS, C.E., WILSON, R.E. **Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer**. 3th Edition, John Wiley & Sons: New York, 1984.803p.

