

TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO CONGELAMENTO DE POLPA DE GOIABA

MARCIU JOSÉ RENO¹, NATÁLIA BELCHIOR²; JULIANO JOSÉ FIORI³,
JAIME VILELA DE RESENDE⁴

RESUMO

O processo de transferência de calor, coeficientes de transferência convectivos, tempos de congelamento e consumo energético foram avaliados durante o congelamento em batelada de polpas de goiaba em túnel de congelamento com corrente de ar forçado. Foram congelados 600 kg de polpa, utilizando três configurações de embalagens que são comuns no processamento industrial. Correlações do número de Nusselt em função dos números de Reynolds e Prandtl e turbulência foram usadas para determinar os coeficientes de transferência de calor convectivos de acordo com a configuração dos sistemas. Os coeficientes foram aplicados nas previsões do tempo de congelamento usando modelos encontrados na literatura. Para todas as configurações as amostras congelaram mais rapidamente na periferia dos arranjos com as temperaturas mais altas localizadas na região central. Nas regiões periféricas foi possível observar a formação de canais preferenciais de escoamento do ar. As estimativas dos valores de h e conseqüente previsão do tempo de congelamento se mostraram mais eficientes para o processamento em baldes. Os tempos de congelamento foram em média de 96 horas para as polpas acondicionadas em tambores; 45,8 horas em sacos de polietileno acondicionados em caixas e de 50,9 horas em baldes. Para as mesmas condições operacionais do equipamento, os resultados mostram que com configurações usando caixas e baldes é possível processar a mesma quantidade de produto com maior qualidade (resfriamento mais rápido) e com cerca de 50% de redução no consumo de energia quando comparado ao processamento em tambores.

Palavras-chaves: Coeficientes de transferência de calor convectivos, Velocidade do ar, Correlações de Nusselt, Consumo energético.

INTRODUÇÃO

No Brasil, a maior parte da produção de alimentos é sazonal, principalmente de origem vegetal e este fato motiva e torna necessário o desenvolvimento de métodos essenciais que prolonguem seu período de armazenamento. Considerando que a maioria da produção de frutos de goiabeira concentra-se no período de janeiro a fevereiro e a importância do aproveitamento dos excedentes de produção, tem-se que o processamento da goiaba em derivados, como polpas íntegras e trituradas, merece atenção dada à utilização das mesmas como matérias-primas de indústrias secundárias ou para consumo direto (Brunini et al., 2003). Dentro deste contexto, um dos processos a ser focado é o processo de congelamento, que é um método de preservação importante na cadeia do frio. Nos alimentos congelados, a qualidade final está relacionada às condições empregadas durante o processo de congelamento e às condições de armazenamento. O conhecimento dos fatores que promovem as condições ótimas para a mudança de estado da água é essencial para o controle operacional do processo de congelamento. Os objetivos principais deste trabalho foram: Estudo dos processos de transferência de calor durante o congelamento da polpa de goiaba; Caracterizar o processo de transferência de calor pela determinação dos coeficientes de transferência de calor nas configurações; Determinar os tempos de processamentos quando os produtos estão acondicionados em

¹ Doutorando em Engenharia de Alimentos, DEA/FEA/ UNICAMP, mjreno@fea.unicamp.br

² Mestranda em Ciência dos Alimentos, DCA/UFLA, natbelchior@gmail.com

³ Doutorando em Engenharia de Alimentos, DEA/FEA/ UNICAMP, jufiori@fea.unicamp.br

⁴ Professor Adjunto, DCA/UFLA, jvresende@dca.ufla.br

embalagens com diferentes geometrias; Determinar o consumo energético do processamento de acordo com a configuração usada no processamento.

MATERIAL E MÉTODOS

O congelamento da polpa, Pedro Sato, foi feito em túnel de congelamento em batelada com corrente forçada de ar dirigida sobre o produto. A Figura 1 esquematiza o túnel de congelamento.

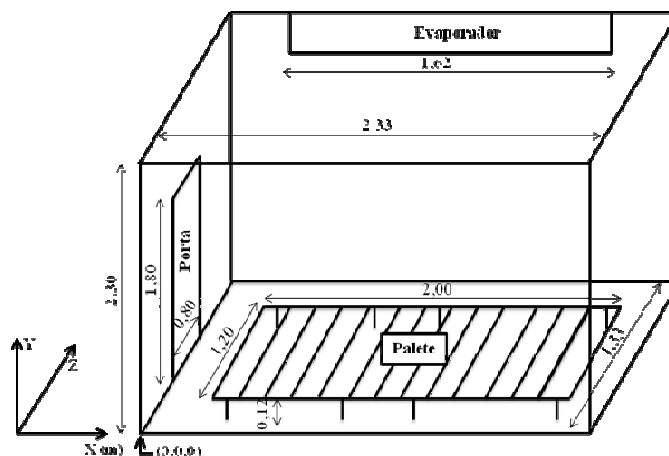


Figura 1 - Dimensões internas do túnel de congelamento utilizado.

Foram utilizados 3 tipos de embalagens para o congelamento da polpa de goiaba, tambores metálicos, baldes de PEAD e caixas plásticas de PEAD. Em cada montagem foram congelados 600 kg de polpa, distribuídos em 40 caixas contendo 15 kg de polpa de goiaba na primeira configuração, 40 baldes contendo 15 kg foram utilizados na segunda configuração e 3 tambores contendo 200 kg foram utilizados na terceira configuração. Nos tambores e caixas foram utilizados sacos de polietileno para acondicionamento da polpa.

Para se obter o histórico das temperaturas, foram instalados termopares tipo T (cobre-constantan AWG-30) e *RTDs* (Pt100) em toda a configuração experimental. Estes foram conectados a um sistema de acondicionamento de sinal (National Instruments - Modelo SCXI - Hungria). As medições de temperatura foram coletados em intervalos de 2 minutos utilizando o *software* LabVIEW 8.5.

A velocidade do ar foi determinada em diferentes pontos do túnel de congelamento utilizando um anemômetro de fio quente (TSI – modelo 9535-USA).

O consumo energético das diferentes configurações foi determinado utilizando-se um medidor de energia e transdutor de grandezas elétricas (KRON - Modelo Mult-k 120-Brasil) acoplado ao computador via conversor (KR-485/USB) e os parâmetros analisados com o *software* RedeMB5 - Versão 5.19, rede padrão RS-485, protocolo Modbus.

Os valores dos coeficientes de transferência de calor convectivos (h) do ar foram estimados através de equações. Essas equações levam em consideração as velocidades e as propriedades do ar, a turbulência nos escoamentos e a geometria do produto (embalagens).

Para a estimativa dos valores de h em torno de dutos retangulares (caixas) utilizou-se as correlações enumeradas abaixo, usando o diâmetro hidráulico como dimensão característica.

Para o cálculo do D_h (diâmetro hidráulico) foi utilizada a equação (1).

$$D_h = \frac{2ab}{(a + b)} \quad (1)$$

Onde a = largura do duto, b = altura do duto para escoamento do ar.
O número de Reynolds foi calculado através da equação (2).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

Onde ρ = densidade, v = velocidade, μ = viscosidade e $D = D_h$.

Para o cálculo do número de Nusselt foram utilizadas as equações (3) e (4) (Dittus & Boelter, 1985).

$$Nu = 0,116 [Re^{2/3} - 125] Pr^{1/3} [1 + \frac{D_h}{L_1}]^{2/3} \quad (3)$$

Para $2.000 < Re < 10.000$, onde L_1 = comprimento da placa e Pr = número de Prandtl.

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

Para $Re \geq 10.000$.

Os valores de h foram calculados através da correlação (5).

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (5)$$

Quando $L_1/Dh \leq 60$, é necessário o cálculo do coeficiente de transferência de calor convectivo equivalente (h_{eq}), que é valor utilizado para base de cálculos.

Então, os valores de h_{eq} foram calculados através da equação (6).

$$h = h_{eq} [1 + 1,4 \frac{D_h}{L_1}] \quad (6)$$

Para o cálculo dos valores de h em torno de cilindros (baldes e tambores), a estimativa do número de Nusselt foi feita utilizando as correlações (7) e (8) (Salvadori & Mascheroni, 1996) e uma correlação de Nusselt (9) que considera um fator de turbulência no escoamento.

$$Nu = 0,193 Pr^{0,33} Re^{0,618} \quad (7)$$

Para $Re < 40.000$.

$$Nu = 0,027 Pr^{0,33} Re^{0,805} \quad (8)$$

Para $Re > 40.000$.

A correlação (9) é utilizada para obtenção do número de Nusselt considerando um fator de turbulência no escoamento do ar (Kondjoyan, 2006).

$$Nu = A Re^n (1 + B Tu Re^m) \quad (9)$$

Onde A , n , B e m são valores tabelados e dependentes da razão H/D (diâmetro/altura) do cilindro e do ângulo de contato entre a superfície do recipiente e o fluxo de ar, o fator de turbulência (Tu) = $\sqrt{\bar{u}^2}/U$, sendo \bar{u}^2 = média da flutuação da velocidade, e U = velocidade média (m/s).

O tempo de congelamento nas diferentes configurações (caixas, baldes e tambores) foi determinado através de uma placa plana que opere sob as mesmas condições e um mesmo fator de forma, segundo a equação (10).

$$t_{f,rec} = \frac{t_{f,placa}}{E_{AS}} \quad (10)$$

Para o cálculo de $t_{f, placa}$ utilizou-se o método de Pham (Pham, 1986). Para o cálculo do fator de forma E_{AS} , foram utilizadas as equações (11) e (12).

$$E_{AS} = \frac{\left(1 + \frac{2}{Bi}\right) \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}\right)}{\left[\frac{2}{Bi} + \frac{2}{3\left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}\right)} + \frac{1 + \beta_1 + \beta_2}{3}\right]} \quad (11)$$

Para bloco retangular, onde β_1 = (largura/altura) e β_2 (comprimento/altura) do bloco.

$$E_{AS} = \frac{\left(1 + \frac{2}{Bi}\right) \left(1 + \frac{1}{\beta_1}\right)}{\left[\frac{2}{Bi} + \frac{1}{6\beta_1\left(2 + \frac{1}{\beta_1}\right)} + (3 + 18\beta_1 + 4\beta_1^2)\right]} \quad (12)$$

Para cilindros com altura > diâmetro, onde β_1 = (altura /diâmetro).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de nível em todas as figuras foram obtidas através de regressão por mínimos quadrados, utilizando o programa *Statística 8* (Statsoft®). Todos os cálculos foram realizados com os valores experimentais em posições definidas pelo sistema de coordenadas (X,Y e Z) que foi usado como referência. A Figura 2 mostra as isotermas durante o processamento da polpa congelada em caixas em uma pilha localizado no túnel na posição Z = 0,665 m.

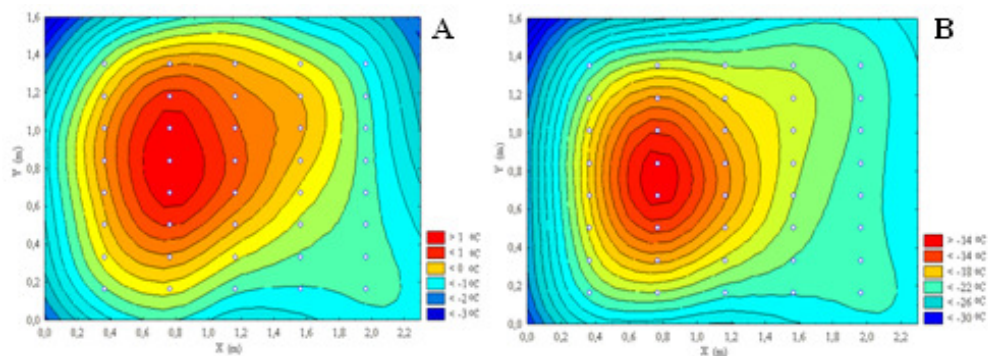


Figura 2 - Variação da temperatura da polpa de goiaba acondicionada em caixas, em função da altura (Y) e comprimento do túnel de congelamento (X), nos tempos (horas): (A) t=10, (B) t=50.

A Figura 3 mostra as isotermas durante o processamento da polpa congelada em baldes, em uma pilha localizado no túnel na posição Z = 0,505 m. A Figura 4 mostra as isotermas durante o processamento da polpa tambores, em uma pilha localizado no túnel de congelamento na posição Z = 0,665 m.

As Figuras 2, 3 e 4 mostraram que o abaixamento mais rápido de temperatura nas embalagens ocorreu em função do aumento de comprimento (X) do túnel, isso pode ser explicado pela provável infiltração de calor pela porta, devido ao gradiente de temperatura entre o meio interno (túnel) e externo (ambiente), ou a vedação da porta não foi totalmente eficiente.

A Tabela 1 mostra a variação do erro entre o tempo de congelamento experimental e predito para o congelamento de polpas de goiaba acondicionadas em baldes

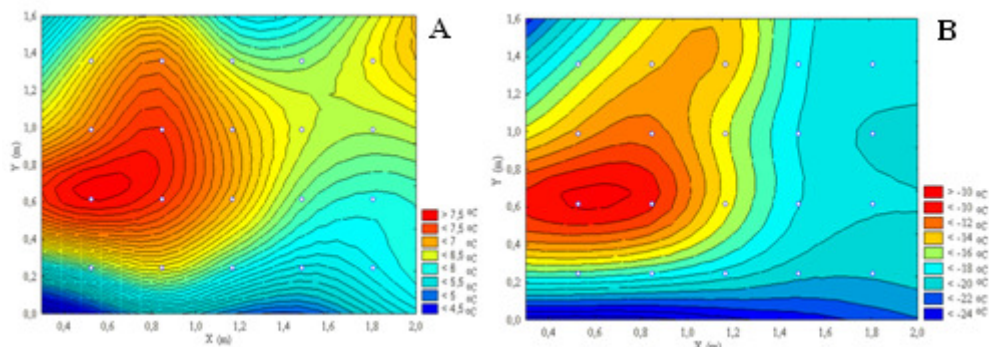


Figura 3 - Variação da temperatura da polpa de goiaba acondicionada em baldes, em função da altura (Y) e comprimento do túnel de congelamento (X), nos tempos (horas): (A) t=10, (B) t=50.

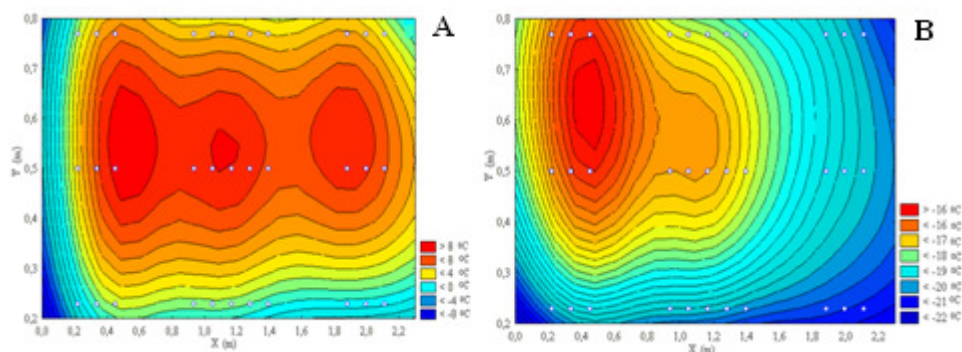


Figura 4 - Variação da temperatura da polpa de goiaba acondicionada em tambores, em função da altura (Y) e comprimento do túnel de congelamento (X), nos tempos (horas): (A) t=10, (B) t=100.

Tabela 1 - Verificação do erro entre o tempo predito e experimental de processamento com os baldes.

X	Y	Z	h	h_{turb}	t_{pred}	$t_{pred/turb}$	$t_{exp.}$	$e(\%)$	$e_{turb}(\%)$
0,53	0,25	0,51	2,93	5,67	56,07	46,53	50,43	11,18	7,74
1,17	0,25	0,51	3,30	6,42	54,30	44,54	48,63	11,65	8,41
1,81	0,25	0,51	3,41	6,62	53,82	44,05	46,60	15,48	5,47
0,53	0,62	0,51	3,56	6,91	53,19	43,38	56,30	5,53	22,94
1,17	0,62	0,51	3,85	7,47	52,05	42,16	52,70	1,23	19,99
1,81	0,62	0,51	4,15	8,04	50,97	41,00	48,20	5,75	14,93
0,53	0,99	0,51	4,23	8,24	50,70	40,63	53,70	5,59	24,33
1,17	0,99	0,51	4,80	9,35	48,89	38,71	51,07	4,26	24,20
1,81	0,99	0,51	5,38	10,08	47,27	37,58	47,80	1,10	21,37
0,53	1,36	0,51	4,00	7,78	51,50	41,51	50,73	1,52	18,17
1,17	1,36	0,51	5,03	9,79	48,23	38,11	54,27	11,13	29,78
1,81	1,36	0,51	6,00	11,74	45,73	35,36	48,87	6,42	27,65
0,53	0,25	0,83	2,32	4,48	59,68	50,31	53,00	12,61	5,07
1,17	0,25	0,83	2,73	5,28	57,14	47,69	50,27	13,66	5,13
1,81	0,25	0,83	2,98	5,78	55,81	46,22	48,30	15,55	4,31
0,53	0,62	0,83	2,52	4,89	58,38	48,92	56,87	2,65	13,97
1,17	0,62	0,83	2,87	5,56	56,38	46,84	54,43	3,58	13,94
1,81	0,62	0,83	3,23	6,26	54,61	44,94	49,97	9,29	10,06
0,53	0,99	0,83	2,75	5,33	57,03	47,51	55,10	3,50	13,77
1,17	0,99	0,83	3,05	5,91	55,46	45,86	54,70	1,40	16,15
1,81	0,99	0,83	3,09	6,00	55,27	45,62	50,23	10,03	9,18
0,53	1,36	0,83	2,57	4,98	58,07	48,60	52,43	10,76	7,29
1,17	1,36	0,83	3,07	5,95	55,37	45,76	52,93	4,60	13,55
1,81	1,36	0,83	3,04	5,89	55,51	45,91	50,53	9,86	9,13

A predição do tempo de processamento com as correlações (7) e (8) se mostraram mais eficientes, estando dentro dos padrões de erro de engenharia. Isto provavelmente se deve ao fato de estas correlações expressarem melhor os efeitos do escoamento do ar em torno de cilindros menores, como por exemplo, os baldes, além da dificuldade de determinação da flutuação da variação de velocidade para cálculo do fator de turbulência.

A Tabela 2 mostra os valores das grandezas elétricas que foram medidas durante o processo de congelamento das polpas nas diferentes embalagens. Todas estas grandezas foram obtidas após o término do processamento, quando todos os sensores de temperatura chegaram a -18 °C.

Tabela 2 - Grandezas elétricas medidas.

Processamento	EA (kWh)	ER (kVArh)	DA (kW)	MDA (kW)
Caixas	256,344	173,580	4,618	5,582
Baldes	270,862	180,969	3,536	5,683
Tambores	485,499	585,092	1,819	4,339

EA = energia ativa, ER = energia reativa, DA = demanda ativa, MDA = máxima demanda ativa.

Através da Tabela 2 pode-se verificar que o consumo mais elevado ocorreu quando as polpas estavam armazenadas nos tambores (485,499 kWh), isto é decorrente do maior tempo demandado para o final do congelamento das amostras. O menor gasto de energia (256,344 kWh) foi verificado quando as polpas foram armazenadas em caixas, devido ao menor tempo de processamento.

CONCLUSÃO

A estimativa dos valores de h e conseqüente predição do tempo de congelamento se mostraram eficientes para o processamento das polpas de goiaba nos baldes. Para os tambores, apenas a correlação que leva em consideração a turbulência no escoamento do ar se mostrou mais satisfatória; para as caixas, a predição do tempo de congelamento produziu alguns bons resultados.

Para as mesmas condições operacionais do equipamento, os resultados mostram que é possível processar a mesma quantidade de produto com maior qualidade (resfriamento mais rápido) com configurações usando caixas e baldes e com cerca de 50% de redução no consumo de energia quando comparado ao processamento em tambores. A decisão sobre a configuração indicada deve ser feita baseada na facilidade de manuseio e custo inicial, sendo que o processamento em baldes é vantajoso sob estes aspectos.

REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO

- BRUNINI, M. A.; OLIVEIRA, A. L.; VARANDA, D. B. Avaliação da qualidade de polpa de goiaba 'paluma' armazenada a -20°C. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 394-396, dez. 2003.
- DITTUS, P. W.; BOELTER, L. M. K. International Communications in Heat and Mass Transfer, New York, v. 12, n. 1, p. 3-22, Jan./Feb. 1985.
- KONDJOYAN, A. A review on surface heat and mass transfer coefficients during air chilling and storage of food products. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 29, n. 6, p. 863-875, Sept. 2006.
- PHAM, Q. T. Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs. **Journal of Food Technology**, Oxford, v. 21, n. 6, p. 209-219, 1986.
- SALVADORI, V. O.; MASCHERONI, R. H. Freezing of strawberry pulp in large containers: experimental determination and prediction of freezing times. **Internacional Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 19, n. 2, p. 87-94, 1996.