

MERCOFRIO 2000 - CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL

ESTUDO TEÓRICO/EXPERIMENTAL DO RESFRIAMENTO DE LARANJA NUM SISTEMA COM AR FORÇADO

Bárbara J. Teruel M.- barbara@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Faculdade de Engenharia Mecânica. Cx. P. 6122 - 13081-970 - Campinas, SP, Brasil. Fone: 19-788-8435 / Fax: 19-289-3722

Luís A. B. Cortez- cortez@agr.unicamp.br

Paulo M. Leal- pmleal@agr.unicamp.br

UNICAMP. Faculdade de Engenharia Agrícola. Cx. P. 6120.

Antônio G. B. de Lima- gilson@dem.ufpb.com.br

Universidade Federal da Paraíba, UFPB. Departamento de Engenharia Mecânica, Cx. P. 10069, 58109-970, Campina Grande, PB, Brasil.

Resumo. Neste trabalho apresenta-se um estudo numérico/experimental para a obtenção das curvas de resfriamento de laranja (variedade Valência, espécie *Citrus sinensis* O.), em três posições diferentes ao longo do leito e acondicionadas em embalagens com 40% de área efetiva de abertura. Os frutos foram resfriados num sistema de circulação com ar forçado ($1933 \text{ m}^3/\text{h}$), à temperatura de 1°C , umidade relativa de 89% e velocidade do ar em torno de 1 m/s . Um modelo matemático bidimensional, em coordenadas esféricas prolatas, foi aplicado para prever a condução de calor transiente dentro da fruta, assumindo-se condição de contorno convectiva na superfície do corpo. As equações geradas foram resolvidas numericamente pelo método de volumes finitos e o coeficiente de transferência de calor convectivo foi obtido aplicando o método de ajuste do erro quadrado mínimo entre os dados experimentais e numéricos. A análise comparativa das curvas teóricas e experimentais mostrou uma concordância satisfatória, com valores de erro entre 5 e 7%. Notou-se que o coeficiente de transferência de calor varia com a posição dos frutos no leito, e que é função do passo do fluxo de ar dentro da embalagem. O tempo de resfriamento apresentou uma variação de aproximadamente 38% entre os diferentes pontos avaliados. A distribuição espacial de temperatura no interior dos frutos para três instantes de tempo, comprova a existência de um diferencial de temperatura entre o centro e a superfície de aproximadamente 30% em todos os casos.

Palavras-chave: Tempo de resfriamento, Ar forçado, Experimental, Modelo matemático

1. INTRODUÇÃO

Após a colheita, o pré-resfriamento deve ser o primeiro passo a ser dado para a conservação de produtos frescos, como as frutas. Um atraso entre a colheita e o pré-resfriamento provoca automaticamente uma deterioração prematura do produto e traz consigo a perda da qualidade dos mesmos (Kader, 1992).

O pré-resfriamento com ar forçado é um dos métodos mais eficientes para realizar o resfriamento rápido. Estes sistemas estão compostos por ventiladores, associados ao sistema de refrigeração numa câmara de resfriamento. Diversos são os fatores que influenciam a eficiência do resfriamento nestes sistemas, tais como: tipo de embalagem, taxa e velocidade

do ar, geometria dos frutos, altura do leito, entre outros (Arifin & Chau, 1988; Talbot & Chau, 1991, Fraser, 1991, Fraser, 1992).

A ASHRAE (1994) define que para uma temperatura do ar e comprimento característico do produto constantes, o coeficiente de transferência de calor convectivo é proporcional à taxa mássica do fluxo de ar. Um efetivo contato do fluxo de ar com a superfície do produto possibilita a obtenção de altos coeficientes de transferência de calor convectivo, com uma determinada taxa de fluxo de ar (Fraser, 1991). O coeficiente de transferência de calor convectivo (h_c), têm um papel muito importante nos processos que envolvem convecção. Uma das causas mais comuns de erro nas predições da temperatura dentro do sólido é originada pela avaliação deste coeficiente, o qual em muitos trabalhos é assumido por sugestões da literatura. As equações mais precisas encontradas na literatura apresentam uma margem de incerteza considerável. Além disso, a medição experimental da distribuição de temperaturas na superfície no interior dos corpos, de forma precisa e direta, torna-se complexa (Benavides & Avendaño, 1997), o que dificulta a determinação correta deste parâmetro convectivo.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo numérico/experimental para determinar as curvas de resfriamento de laranjas submetidas ao resfriamento com ar forçado, em diferentes posições, no interior da embalagem. O modelo matemático bidimensional, que considera o fruto como um elipsóide de revolução, permite obter a cinética de resfriamento, o coeficiente de transferência de calor convectivo (ajustado a partir dos dados experimentais) e a distribuição de temperatura em todo o fruto para distintos instantes de tempo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Procedimento experimental

Para o resfriamento das frutas foi montado um sistema de ar forçado no interior de uma câmara de refrigeração. Os elementos que compõem o sistema estão apresentados na Fig.1 (a). No interior da câmara de resfriamento (A) foi instalado um ventilador centrífugo (2), com capacidade de $1933 \text{ m}^3/\text{h}$, o qual succiona o ar refrigerado que sai do evaporador (1). O ar resfriado à 1°C e UR=89%, é forçado a passar transversalmente entre o volume de 12 caixas de frutos colocados no túnel de resfriamento (3), o qual está fechado na parte superior e frontal com uma lona. Para a medição e monitoramento da temperatura do ar, foi utilizado um sistema de aquisição de dados por computador, o qual consta de um conversor de sinais A/D, uma placa de condicionamento de sinais, e um computador AT 486 (5). Para este fim um termopar foi colocado no interior da câmara de resfriamento.

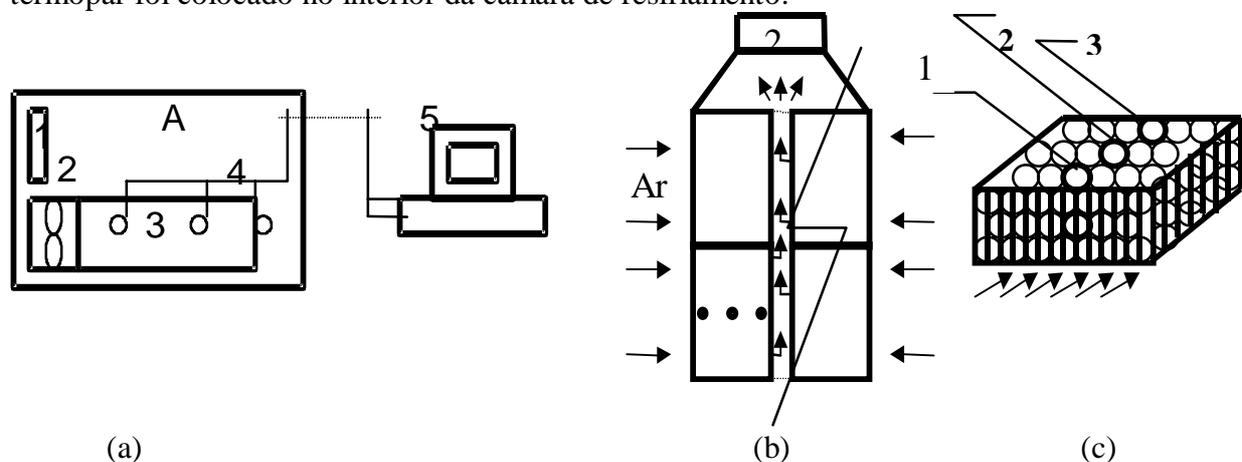


Figura 1- (a)- Componentes do sistema de resfriamento. (b)- Vista superior do túnel de resfriamento. (c)- Posição dos frutos no interior da embalagem.

Para a medição das temperaturas no centro dos frutos, foram inseridos no interior dos mesmos, termopares tipo T (# 24, de Co-Cu), os quais foram calibrados previamente ($\pm 0,1^\circ\text{C}$). Os termopares foram inseridos em três frutos por caixa, na camada coincidente com o meio (Fig. 1(b), 1 (c)). Desta forma foi avaliado o comportamento da temperatura do fruto ao longo do leito, na direção transversal. Os números 1, 2 e 3 na Fig. 1(c), representam os três pontos no interior da embalagem onde foram colocados os termopares nos frutos para o monitoramento da temperatura.

O fruto utilizado para o desenvolvimento dos experimentos foi laranja Valência (*Citrus sinensis* O.). Os diâmetros nas direções longitudinal e equatorial dos frutos foram, respectivamente: $d_1=7,62 \pm 0,123$ cm, $d_2=7,80 \pm 0,187$ cm. Os frutos, selecionados de forma mecânica por tamanho, no galpão de embalagem, foram pesados numa balança digital (marca FILIZOLA BP15, 110/220v, 60 Hz), apresentando um peso médio de $250 \pm 1,5$ g.

Depois destas medições, os frutos foram condicionados em embalagens plásticas (528x335x310 mm, usadas comumente para o transporte dos mesmos até o galpão), e respeitando o mesmo tipo de arranjo em que são condicionadas para a comercialização (arranjo alternado). As embalagens usadas apresentam uma área efetiva de 40%, permitindo um grande contato entre o fruto e o ar resfriado. As caixas foram colocadas no túnel com a maior área voltada para o passo do fluxo de ar. Para a medição da temperatura foi aplicado um delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com duas repetições.

Na área de refrigeração, um dos termos mais usados para medir a eficiência do resfriamento são os chamados meio-tempo e sete-oitavos do tempo de resfriamento, que podem ser avaliados em função da Taxa Adimensional de Temperatura ou de resfriamento (TAT) (Mohsenin, 1980):

$$TAT_{1/2} = \frac{T_c - T_a}{T_i - T_a} = 0,5 \quad \text{e} \quad TAT_{7/8} = \frac{T_c - T_a}{T_i - T_a} = 0,125 \quad (1)$$

onde T_c é a temperatura no centro do fruto, T_i é a temperatura inicial do fruto e T_a é a temperatura do ar de resfriamento ($^\circ\text{C}$).

No início dos experimentos a temperatura no interior dos frutos foi de $26 \pm 1^\circ\text{C}$ (T_i). O sistema de resfriamento foi programado para trabalhar a 1°C (T_a). Após o sistema ter atingido o regime permanente, as caixas de frutos foram colocadas no interior do túnel de resfriamento e o resfriamento das mesmas teve início.

Para as condições experimentais apresentadas o meio-tempo de resfriamento será atingido quando a temperatura no centro dos produtos, for de 13°C (T_c , ponto em que $TAT_{1/2}=0,5$). Os sete-oitavos do tempo de resfriamento será atingido quando nesse mesmo ponto a temperatura T_c for de aproximadamente 3°C (ponto em que $TAT_{7/8}=0,125$).

A velocidade do ar na entrada da caixa foi medida usando um anemômetro de fio quente (marca TRI-SENSE, escala de temperatura de -30°C a 100°C e velocidade de 0,5 a 25 m/s). A velocidade média do ar foi de aproximadamente 1 m/s.

O sistema de aquisição de dados foi programado para monitorar as leituras de temperatura com um frequência de 0,1 Hz, durante 400 min. Com os valores experimentais da temperatura em cada ponto, foi calculado o valor da TAT para cada instante de tempo. Estes valores foram usados para a validação do modelo matemático e o ajuste de hc.

2.2 Modelagem matemática

A equação da transferência de calor para um meio sólido pode ser expressada como:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (2)$$

onde ρ é a densidade (kg/m^3), C_p é o calor específico ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$), k é a condutividade térmica ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$), \dot{q} é a geração interna de energia (W/m^3) e T e t são a temperatura ($^\circ\text{C}$) e o tempo (s), respectivamente.

O modelo utilizado neste trabalho define o processo de transferência de calor em regime transiente, usando o sistema de coordenadas esféricas prolato, e incorpora os parâmetros adimensionais comumente usados na literatura. Este sistema de coordenadas é muito flexível, e permite sua aplicação em geometrias que vão desde uma esfera até um cilindro (Lima & Nebra, 1997; Teruel *et al.*, 1999).

Na Fig. 2 é mostrada a caracterização geométrica de um corpo esferoidal prolato, que são elipsóides de revolução que tem $L_2 > L_1$ (semi-eixos maior e menor do corpo).

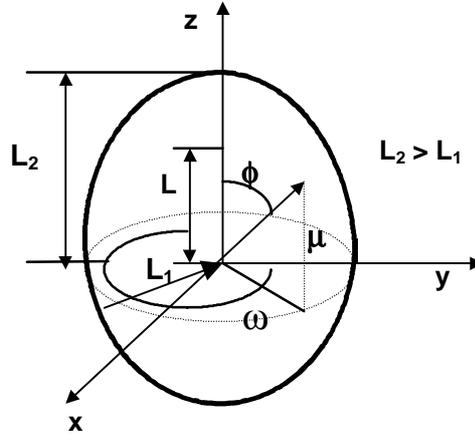


Figura 2- Caracterização de um corpo sólido com geometria esferoidal prolato.

Para a simplificação do problema de transferência de calor, foram feitas as seguintes considerações: sólido homogêneo e isotrópico; as propriedades termofísicas dos produtos são constantes e independentes da temperatura e do teor de umidade do corpo; a variação da temperatura é considerada simétrica ao redor do eixo z; a condução de calor partícula-partícula pode ser desprezada; considerando que a transferência de calor é fundamentalmente por convecção; os efeitos da respiração e da transpiração do produto sobre a transferência de calor são desprezíveis; as perdas de calor para o meio ambiente são desprezíveis, e na superfície do sólido o processo de transferência de calor é convectivo.

Com as considerações feitas, definindo as variáveis $\xi = \cosh\mu$, $\eta = \cos\phi$ e $\zeta = \cos\omega$, e considerando a existência de simetria em ω ($\partial/\partial\omega=0, \partial/\partial\zeta=0$), pode-se escrever a equação da transferência de calor em regime transiente como segue:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{1}{L^2 (\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \xi} [(\xi^2 - 1) \alpha \frac{\partial T}{\partial \xi}] \right] + \left[\frac{1}{L^2 (\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \eta} [(1 - \eta^2) \alpha \frac{\partial T}{\partial \eta}] \right] \quad (3)$$

onde α é a difusividade térmica do corpo, em m^2/s .

Para a análise do problema foram propostas as seguintes condições de contorno:

- Superfície: fluxo de calor difusivo é igual ao fluxo de calor convectivo

$$-\frac{k}{L} \sqrt{\frac{(\xi^2 - 1)}{(\xi^2 - \eta^2)}} \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\xi_f} = h_c [T(\xi = \xi_f, \eta, t) - T_a] \quad (4)$$

Os termos desta equação representam o fluxo de calor por unidade de área que atravessa a superfície do corpo.

- Condição inicial: a temperatura do corpo têm uma distribuição uniforme.

$$T(\xi, \eta, 0) = T_i = \text{cte}$$

- Condição de simetria: os gradientes angulares e radiais de posição são nulos nos planos de simetria.

$$\frac{\partial T(\xi, 1, t)}{\partial \eta} = 0; \quad \frac{\partial T(\xi, 0, t)}{\partial \eta} = 0; \quad \frac{\partial T(1, \eta, t)}{\partial \xi} = 0 \quad (5)$$

Para a adimensionalização da equação de transferência de calor, foram considerados os seguintes parâmetros adimensionais:

$$T^* = \frac{T_c - T_a}{T_i - T_a}; \quad \eta^* = \eta; \quad \xi^* = \xi; \quad t^* = \frac{\alpha t}{L^2}; \quad B_i = \frac{h_c L}{k} \quad (6)$$

Onde T^* é o valor de TAT para cada instante de tempo. A equação de difusão foi discretizada usando o método de volumes finitos e um programa computacional codificado em linguagem FORTRAN foi implementado para resolver o sistema de equações lineares, utilizando uma malha uniforme de 20x20 pontos e o método iterativo de Gauss-Seidel (Lima & Nebra, 1997; Teruel *et al.*, 1999). Os cálculos foram iniciados partindo de uma condição inicial, e a solução numérica é obtida quando os seguintes critérios de convergência foram satisfeitos, em cada ponto do domínio computacional:

$$\left| T^{*k+1} - T^{*k} \right| \leq 10^{-7} \text{ e } \frac{\sum |A_{\kappa}|}{|A_p|} \leq 1 \quad (7)$$

Nestas equações, k representa a k -ésima iteração em cada instante de tempo e A_{κ} os pontos nodais vizinhos do ponto nodal P , onde esta sendo determinada a temperatura no interior do sólido.

O ajuste do coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c), foi feito através do cálculo do erro médio quadrado entre o valor teórico e o valor experimental, da temperatura no centro da laranja. O desvio relativo entre os valores experimentais e os valores teóricos calculados (E), assim como a variância (S^2), foram definidas como:

$$E = \sum_{i=1}^n (T_{i,num}^* - T_{i,exp}^*)^2 \quad (8)$$

$$S^2 = \frac{E}{(n-1)} \quad (9)$$

A variável n representa o número de pontos experimentais. O valor ajustado de h_c será aquele para o qual o valor do erro seja o mínimo.

O coeficiente de difusividade térmica usado para a validação do modelo matemático ($1,06 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$), foi determinado experimentalmente por Ansari & Afaq (1985), durante o resfriamento de laranja, em condições experimentais muito semelhantes às empregadas neste trabalho. O valor da condutividade térmica foi assumido como uma média entre o valor da casca e o valor do suco, tomado da literatura (ASRHAE, 1994; Mohsenin, 1980), sendo de $0,58 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Os valores de L_1 e L_2 foram calculados a partir dos dados experimentais de diâmetro, como $L_1 = d_1/2$ e $L_2 = d_2/2$. O valor de L é calculado como $L = (L_2^2 - L_1^2)^{0,5}$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 3 mostram-se as curvas de resfriamento adimensional nas três posições avaliadas ao longo do leito. Pode-se observar com clareza que existe uma diferença na taxa de temperatura entre os três pontos, situação que evidencia a existência de um diferencial de temperatura. Isto é provocado pelo fato das frutas ficarem expostas de forma diferente ao contato com o fluxo de ar resfriado.

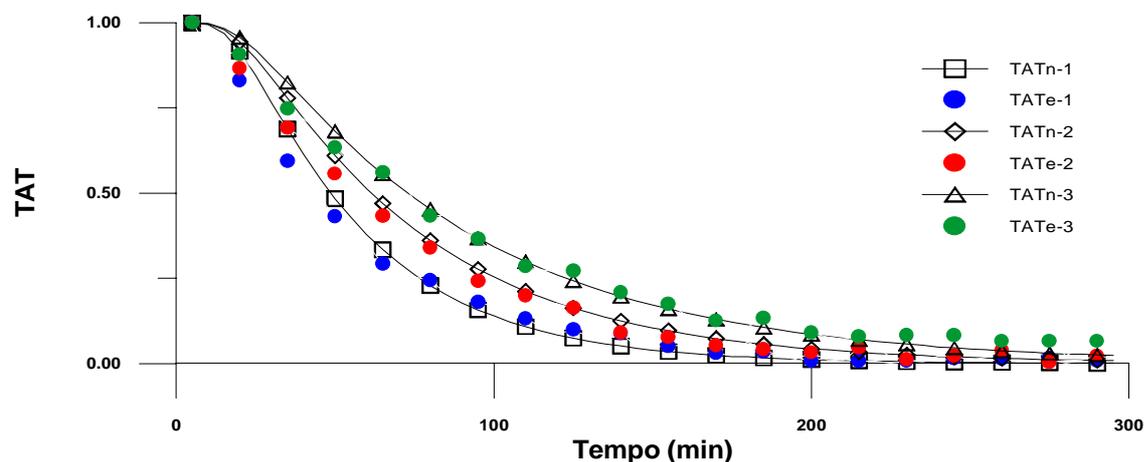


Figura 3- Comportamento da Taxa Adimensional de Temperatura no centro da laranja em função do tempo [$TAT = (T_c - T_a) / (T_i - T_a)$], nos três pontos monitorados no leito. 1- entrada; 2- meio; 3- saída. TATn- valores numéricos; TATE- valores experimentais.

O fruto da posição 1 (entrada da caixa) é o fruto que fica em contato imediato com o fluxo de ar. Já os frutos das posições 2 e 3 encontram-se no meio do leito e na saída do ar da embalagem, respectivamente. Assim, o escoamento do ar através dos frutos é diferente, provocando um diferencial de temperatura ao longo do leito na direção transversal, o que se reflete no tempo de resfriamento dos frutos (Tab. 1).

Como pode-se observar na Tab. 1, o tempo de resfriamento é diferente para cada ponto monitorado, existindo uma diferença de aproximadamente 38% entre o ponto 1 e o ponto 3, tanto para o meio-tempo, como para os sete-oitavos do tempo de resfriamento.

Tabela 1. Tempo de resfriamento nas diferentes posições dos frutos

Ponto	Meio-tempo de resfriamento, (min)	Sete-oitavos do tempo de resfriamento, (min)
-------	-----------------------------------	--

1	40	105
2	50	125
3	65	165

Observando-se a Fig.3, pode-se apreciar que existe um adequado ajuste das curvas teóricas às os pontos experimentais, e isto se reflete nos baixos valores do erro (Eq. 8), e de variância (Eq. 9) obtidos (Tab. 2).

O valor do erro por ponto foi de 0,130; 0,133 e 0,097 %, para os pontos 1, 2 e 3 respectivamente (foram analisados 60 pontos experimentais para cada curva). No ponto em que $TAT_{1/2} = 0,5$; a diferença de temperatura entre o valor experimental e numérico foi de 0,131; 0,098 e 0,054 % (posição 1, 2 e 3). Aos sete-oitavos do tempo de resfriamento ($TAT_{7/8} = 0,125$), a diferença da temperatura entre o ponto teórico e experimental, para a posição 1, 2 e 3, foi de 0,175; 1,147 e 0,092 %, respectivamente.

Verificou-se a diminuição do coeficiente de transferência de calor convectivo ao longo do leito, o que é devido ao decréscimo do fluxo de ar produzido pela perda de carga. Esta redução de velocidade provoca uma diminuição mais lenta da temperatura no interior dos frutos, o que é muito bem caracterizada pelo modelo. Na Tab. 2 apresentam-se os valores do erro, da variância e o valor de h_c obtido em cada ponto.

Tabela 2. Valor do h_c , do erro e da variância obtidos com a validação do modelo matemático

Ponto	h_c , (W/m ² °C)	E, (%)	S ² , (x10 ⁻³)
1	56,48	7,78	1,342
2	30,17	7,98	1,376
3	21,23	5,84	1,008

Como pode ser observado na tabela acima, o valor de h_c , apresenta um decréscimo de aproximadamente 30% ao longo do leito, sendo que para o ponto 1 (onde o tempo de resfriamento é menor) o valor de h_c é maior, ao contrário do ponto 3 (onde o tempo de resfriamento é 38% maior que no ponto 1), o valor de h_c é mais baixo.

Baird & Gaffney (1976), resfriaram laranjas a granel (à 5°C) e velocidade do ar variando de 0,05 m/s até 2,1 m/s, e obtiveram, usando um método de ajuste, valores do h_c entre 8,15 e 55 W/m²°C. Outros valores de h_c são apresentados na literatura oscilando nesta mesma ordem (Mohsenin, 1980; Dincer, 1995; Dincer & Genceli, 1995).

Assim sendo, os resultados obtidos permitem afirmar que o modelo e a metodologia usada neste trabalho, são consistentes para predizer o processo de resfriamento de laranja e para determinar o coeficiente de transferência de calor, com satisfatória precisão.

Na Fig.4 apresenta-se a distribuição da temperatura adimensional (TAT) para os frutos na posição 1 e na posição 3, em três instantes de tempo diferentes. A Fig. 4 (a) e 4 (c) correspondem ao meio-tempo e aos sete-oitavos do tempo de resfriamento, respectivamente.

Como pode-se observar, no início do resfriamento a temperatura na superfície do corpo apresenta um TAT de aproximadamente 0,70, que corresponde a uma temperatura de aproximadamente 18°C. Já na dimensão em que $Y = 3$ cm, o valor de TAT é de 0,85, ou seja, a temperatura é de aproximadamente 22°C, sendo que nas regiões mais próximas do centro a temperatura é ainda invariável e igual a temperatura inicial.

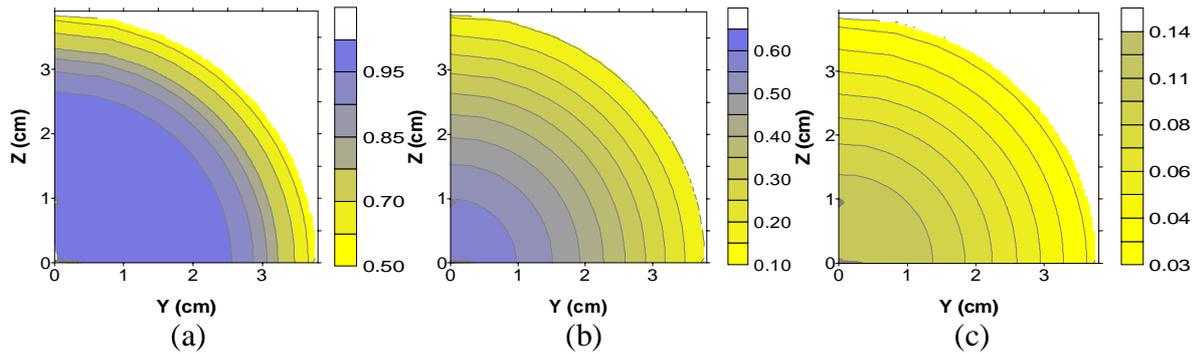


Figura 4- Distribuição espacial da TAT dentro do sólido no ponto 1 em três instantes de tempo. (a)- 5 min, (b)- $t_{1/2}= 40$ min; (c)- $t_{7/8}=105$ min.

Observa-se também na Fig.4 (b), que aos 40 min (meio-tempo de resfriamento), o fruto já apresenta-se resfriado até aproximadamente 7°C , nas regiões mais próximas da superfície, sendo que no centro a temperatura é de aproximadamente 13°C . Na superfície a temperatura já encontra-se a uma temperatura aproximada de 2°C ($T_a=1^{\circ}\text{C}$). Já aos 105 min, o fruto encontra-se nos sete-oitavos do tempo de resfriamento, instante em que encontra-se praticamente resfriado. No centro apresenta uma temperatura em torno de 3°C , e na superfície de $1,5^{\circ}\text{C}$. Deve-se lembrar que o meio-tempo de resfriamento está relacionado com a temperatura do fruto aproximadamente no centro do mesmo.

A vantagem em se utilizar a modelagem, está no fato de que, a partir dos resultados gerados, pode-se obter a distribuição da temperatura no interior do fruto, podendo assim obter o que pode-se chamar de uma "radiografia" do processo de resfriamento em diferentes instantes de tempo. De forma experimental seria muito complicado poder obter esta distribuição.

Na Fig.5 apresenta-se o comportamento da distribuição de temperatura para os mesmos três instantes de tempo apresentados para o fruto na posição 1, mas desta vez para o fruto na posição 3.

Pode-se observar na Fig. 5 (a) (aos 5 min de iniciado o resfriamento), que a temperatura na superfície é de aproximadamente 22°C , sendo que nas regiões perto do centro a temperatura ainda mantêm-se invariável ($T_i=26^{\circ}\text{C}$). Já na Fig. 5 (b) (aos 65 min), a temperatura na superfície é de aproximadamente 5°C , sendo que o centro encontra-se na temperatura em torno de 13°C .

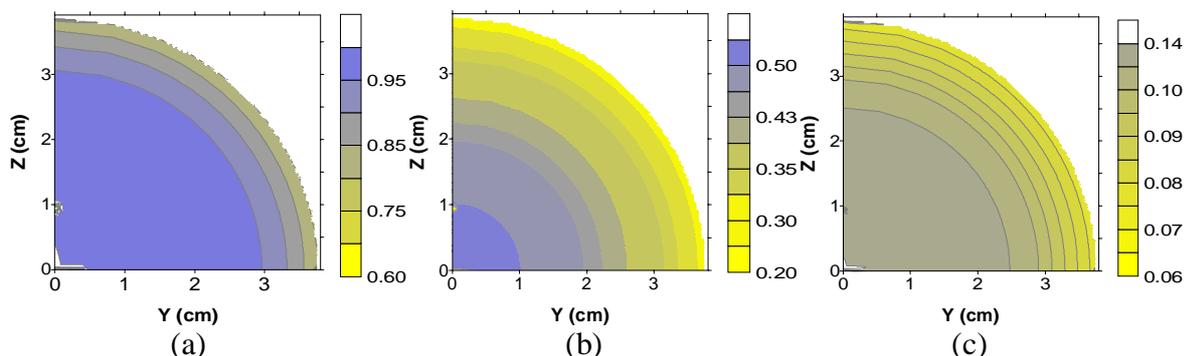


Figura 5- Distribuição espacial da TAT dentro do sólido no ponto 3. (a)- 5 min; (b)- $t_{1/2}= 65$ min; (c)- $t_{7/8}=165$ min.

Aos sete-oitavos do tempo de resfriamento ($t_{7/8}=165$ min), o fruto encontra-se com uma temperatura no centro de 3°C , e na superfície de $1,5^{\circ}\text{C}$.

Comparando as Fig. 4 (a) e 5 (a), observa-se que existe uma diferença na distribuição de temperatura. O fruto na posição 1, para o mesmo instante de tempo, apresenta gradientes de

temperatura maiores que o fruto na posição 3, isto devido ao fato de que realmente o resfriamento do fruto acontece de forma mais lenta, quando este se encontra mais afastado da entrada do ar, nas embalagens.

Estes resultados confirmam a análise das curvas de resfriamento apresentada, ou seja, o resfriamento dos frutos depende da localização destes no leito, sendo que o processo de transferência de calor é mais intenso nos frutos que tem um maior contato com o ar, a velocidades mais elevadas, refletindo-se em maiores valores do coeficiente de transferência de calor.

É válido ressaltar que em todos os instantes de tempo analisados nas duas posições apresentadas, existiu um diferencial de temperatura entre a superfície e o centro dos frutos em torno de 30%, demonstrando que na superfície dos frutos atinge-se a condição de equilíbrio com o meio de resfriamento mais rapidamente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio financeiro desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE., 1994, Systems and Applications. Methods of precooling of fruits, vegetables and flowers. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta. cap. 10, pp. 1-10.
- Ansari, F.A. & Afaq, A., 1985, New method of measuring thermal diffusivity of spherical produce. International Journal of Refrigeration. vol. 9, pp. 158-160.
- Arifin, B. B.; & Chau, K. V., 1988, Cooling of strawberries in cartons with new vent hole designs. ASHRAE Transactions. vol. 94, n. 1. pp. 1415-1426.
- Baird, C. D. & Gaffney, J. J., 1976, An procedure for calculating heat transfer in bulk loads of fruits or vegetables. ASHRAE Transactions. vol. 82, n. 2, pp. 525.
- Benavides, M. N. & Avendaño, G. O., 1997, Curvas de congelación y descongelación de fresas y frambuesas calculadas com el método de diferencias finitas. Anales IV Congreso Iberoamericano de Aire Acondicionado y Refrigeración. Outubro 9-11, Santiago de Chile, vol. 1, pp. 154-159.
- Dincer, I., 1995, Transient heat transfer analysis in air cooling of individual spherical products. Journal of Food Engineering. vol. 26, pp. 453-467.
- Dincer, I. & Genceli, F., 1995, Determination of surface heat transfer coefficients from measured temperature data for spherical and cylindrical bodies during cooling. Heat and Mass Transfer. vol. 30, pp. 215-220.
- Fraser, H.W., 1991, Forced-air rapid Cooling of fresh Ontario fruits and vegetables. Ministry of Agriculture and Food. Toronto. Ontário. AGDEX 202-736. 4 p.
- Fraser, H. & Otten, L., 1992, Predicting $7/8$ cooling times for peaches by comparing heat transfer modelling and field measurement methods. ASAE. n. 92-6016: 14 p. American Society of Agricultural Engineers.
- Gaffney, J.J.; Baird, C.C. & Chau, K. V., 1982, Methods for calculating heat and mass transfer in fruits and vegetables individually and bulk. Research Agricultural Engineer. n. 3.
- Kader, A. A., 1992, Postharvest technology of horticultural crops. 2. ed. Division of Agriculture and Natural Resources. University of California. USA. n. 3311. 295 p.
- Lima, A. G. B. & Nebra, S. A., 1997, Influência de parâmetros geométricos na cinética de secagem de elipsóides sólidos. XXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XXV ENEMP). São Carlos. SP. vol. 1, pp. 195-202.
- Mohsenin, N. N., 1980, Thermal properties of foods and agricultural materials. Gordon & Breach. New York. 405 p.
- Talbot, M. T. & Chau, K. V., 1991, Precooling strawberries. Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida. Circular 942. 8 p.

Teruel M. B. J, Cortez, L. A. B., Leal, P. M. & Lima, A G. B., 1999, Obtenção numérico/experimental das curvas de resfriamento de laranja (variedade Valência). In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM'99. Águas de Lindóia.

Abstract

TEORICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF ORANGE COOLING IN A FORCED AIR COOLING SYSTEM

***Summary.** This work present an experimental and numerical study for obtained of orange cooling curves (Valência variety, Citrus sinensis O. species), in three different positions along the bed and conditioned in packing with 40% of effective area of opening. The fruits were cooled in a system forced air cooling (1933 m³/h), at 1°C of temperature, relative humidity 89% and air velocity around 1 m/s. A bidimensional mathematical model, in prolate esferoidal coordinated, it was applied to predict the conduction of heat transient inside of the fruit, being assumed condition of convective contour in the surface of the body. The generated equations were numerical resolved applied the method of finite volumes and the heat transfer convective coefficient was obtained applying the method of adjustment of the minimum square error between experimental and numerical data. The comparative analysis of the theoretical and experimental curves showed a satisfactory agreement, with error values between 5 and 7%. It was noted that the of heat transfer convective coefficient varies with the position of the fruits in the bed, and that is inside function of the step of the flow of air of the packing. The cooling time presented a variation of approximately 38% among the different appraised points. The space distribution of temperature inside the fruits for three instants of time, checks the existence of a temperature differential between the center and the surface of approximately 30% in all the cases.*

***Keywords:** Cooling time, Forced air, Experimental, Mathematical model*