



OBTENÇÃO NUMÉRICO/EXPERIMENTAL DAS CURVAS DE RESFRIAMENTO DE LARANJA (VARIEDADE VALÊNCIA)

Bárbara J. Teruel M.

Universidade Estadual de Campinas, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento de Sistemas Energéticos. Cx. P. 6122 - 13081-970 - Campinas, SP, Brasil.

Luís A. B. Cortez

Paulo M. Leal

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Cx. P. 6011.

Antônio G. B. de Lima

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica - 50109-970 - Campina Grande, PB, Brasil.

***Resumo.** Neste trabalho apresenta-se um estudo visando a obtenção de curvas de resfriamento e coeficientes de transporte de produtos agrícolas. O produto utilizado nos experimentos foi laranja (variedade Valência, espécie *Citrus sinensis* O.), as quais foram resfriadas num sistema de circulação de ar forçado na temperatura de 1°C, umidade relativa de 89% e velocidade do ar de aproximadamente 1 m/s. O resfriamento foi feito em dois tipos de embalagens: caixas plásticas e de papelão, com 40% e 3,5% de área efetiva de abertura, respectivamente. Foi aplicado um modelo matemático bidimensional, em coordenadas esféricas prolato, para caracterizar 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 permitindo a obtenção dos coeficientes de transferência de calor e de difusão térmica. A análise comparativa das curvas teóricas e experimentais, mostrou uma concordância satisfatória, comprovando que o modelo matemático é consistente e adequado para descrever o experimento. Constatou-se uma diferença altamente significativa no meio-tempo de resfriamento dos produtos, para as duas embalagens usadas, o que demonstra que a área de abertura das caixas é um dos fatores que influencia significativamente a eficiência do processo de resfriamento.*

***Palavras-chave:** Resfriamento, Ar forçado, Laranja, Experimental, Numérico.*

1. INTRODUÇÃO

Os produtos agrícolas frescos, entre eles as frutas e hortaliças, devem ser resfriadas, logo após a colheita, a baixas temperaturas. Este resfriamento garante que os produtos reduzam a taxa de deterioração e, por consequência a perda de qualidade, estendendo assim a vida de prateleira. Para garantir tais resultados, vários métodos de resfriamento podem ser usados,

entre os quais se destacam o resfriamento com água gelada, o resfriamento com ar forçado, e o resfriamento a vácuo.

O resfriamento com ar forçado é um método que se destaca por ser simples e econômico, quando comparado com os outros métodos citados. Em busca do melhoramento da taxa de resfriamento dos frutos, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de determinar parâmetros que caracterizam o processo de resfriamento, entre eles o tempo de resfriamento e a taxa adimensional de resfriamento ou de temperatura.

Entre os principais fatores que afetam as taxas de resfriamento dos produtos agrícolas, e em particular das frutas, estão as dimensões e geometria dos produtos, o tipo de arranjo das caixas, o tipo de embalagem e área de abertura, a taxa de ar que está passando entre os frutos, entre outros. Para garantir um resfriamento eficiente, o ar resfriado deve passar pela superfície dos frutos numa proporção e velocidade adequadas, para garantir que o processo convectivo de transferência de calor seja o mais eficiente possível. Para atingir estes objetivos, a embalagem deve possuir uma área de abertura efetiva de 5% a 10%, da área total da caixa. Por outro lado a taxa de circulação do ar que deve passar pelos produtos, deve ser de 0,001 a 0,003 m³/s de ar por cada kg de produto a ser resfriado (Fraser, 1991; Fraser & Otten, 1992).

Além da determinação do tempo de resfriamento de forma experimental, vários são os trabalhos desenvolvidos na busca de um modelo matemático adequado, que caracterize o fenômeno de transferência de convectiva de calor, durante o resfriamento. O objetivo comum desses estudos têm sido desenvolver um método simples de predição do tempo de resfriamento, requerendo uma mínima quantidade de dados e um programa computacional adequado. Nessa área podem-se citar os trabalhos de Gaffney *et al.* (1982), Hayakawa & Succar (1982), Cleland & Earle (1982), Ansari & Afaq (1985), Bazan *et al.* (1989), Guemes *et al.* (1989), Lovatt *et al.* (1993), entre outros.

Os modelos matemáticos para a caracterização do processo de transferência de calor em frutas têm sido desenvolvidos para formas geométricas regulares (esferas, cilindros ou placas), sendo consideradas as propriedades térmicas constantes com a temperatura. Estas considerações simplificam o modelo de tal forma que é possível aplicar soluções analíticas. Como a maioria dos produtos agrícolas não apresenta forma exatamente regular, o uso de métodos numéricos para a resolução das equações em tais modelos fornece apenas soluções aproximadas, para as taxas de resfriamento e distribuição da temperatura no interior dos frutos. Alguns erros mais comuns são o efeito das propriedades térmicas e a incerteza dos valores, os quais influenciam diretamente na precisão dos resultados (Mohsenin, 1980). Também existe o problema dos erros introduzidos pelo método usado para desenvolver o modelo. Desta forma, erros nos dados das propriedades térmicas ou do coeficiente de transferência de calor podem ser minimizados ou aumentados, por erros introduzidos pelo método de predição.

Por outro lado, a determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c) é complicada, pela quantidade de fatores que o afetam. A literatura neste sentido oferece valores diversos, não existindo um consenso geral quanto ao valor do mesmo. Alguns autores propõem valores tão diferentes que vão desde 8 até 68 W/m²°C, para resfriamento com ar forçado, dependendo do modelo, das condições de contorno adotadas e da velocidade do ar (Mohsenin, 1980, Gaffney *et al.*, 1982 e Dincer, 1995).

Neste trabalho, procurou-se obter as curvas de resfriamento de um produto aproximadamente elipsoidal (laranja), resfriadas em caixas com 40% e 3,5% de área efetiva, com uma taxa de circulação de ar de 10,1 m³/h por kg de produto. As curvas experimentais são comparadas com as curvas teóricas obtidas com a aplicação de um modelo matemático, desenvolvido em coordenadas esféricas prolato, e os coeficientes convectivo de transferência de calor e de difusão térmica determinado por ajuste numérico aos dados experimentais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Montagem experimental

Para obter as curvas experimentais de resfriamento, um sistema de resfriamento com ar forçado foi montado no interior de uma câmara de resfriamento (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 até 1°C e UR=89%, é forçado a passar transversalmente entre o volume de 12 caixas de frutos colocados no túnel de resfriamento (4), o qual está fechado na parte superior e frontal com uma lona. O túnel e o ventilador estão unidos por um duto (3), como é mostrado na Fig. 1(a).

Para a medição das temperaturas foram inseridos no interior dos frutos, aproximadamente no centro 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 do meio da caixa (Fig. 1(b)). Para o monitoramento da temperatura foi utilizado um sistema de aquisição de dados por computador, o qual consta de um conversor de sinais A/D (6), uma placa de condicionamento de sinais (7), e um computador AT 486 (8). A temperatura do ar resfriado e insuflado pelo evaporador, foi medida e monitorada, para este fim um termopar foi colocado no interior da câmara de resfriamento (5).

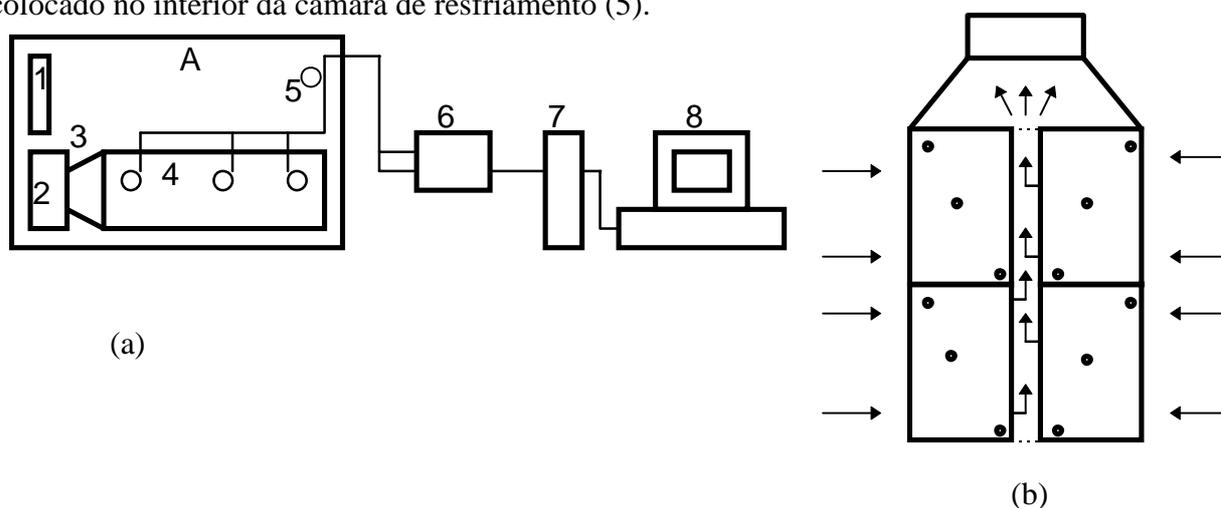


Figura 1 (a) - Representação esquemática dos elementos que compõem o sistema de resfriamento com ar forçado, (b)- Disposição das caixas de frutos no interior do túnel e pontos em que foi medida a temperatura (vista superior).

Foram utilizados dois tipos de embalagens: caixas plásticas e caixas de papelão. As caixas plásticas, usadas comumente para o transporte dos frutos até o galpão, têm aproximadamente 60% de área de abertura, estando disponível para a passagem do ar, aproximadamente, 40% de área. Estas caixas tem dimensões de: $528 \times 335 \times 310 \text{ mm}$, como visto na Fig. 2(a).

As caixas de papelão, usadas geralmente para embalar as frutas, têm dimensões de: $390 \times 290 \times 350 \text{ mm}$, como indicado na Fig. 2(b). Estas caixas possuem uma área de abertura de 7%, sendo que a área de abertura efetiva para ventilação é de aproximadamente 3,5%. As caixas, contendo os produtos foram colocadas no túnel com a cara I e II, voltada no sentido do passo do fluxo de ar resfriado.

No interior das caixas os frutos se encontravam dispostos em arranjo alternado, num total de aproximadamente 190 kg no interior do túnel. A taxa de ar circulada através dos produtos, foi de, aproximadamente, de $10,1 \text{ m}^3/\text{h}$ por kg de produto (3 l/s por kg produto, saindo da

descarga do ventilador). O fruto utilizado para o desenvolvimento do experimento foi laranja Valência (*Citrus sinensis* O.). As laranjas utilizadas tinham um diâmetro médio de $6,33 \pm 0,123$ cm e um peso de $250 \pm 1,5$ g, as quais já tinham sido selecionadas de forma mecânica por tamanho, no galpão de embalagem. Para a medição da temperatura foi aplicado um delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com duas repetições.

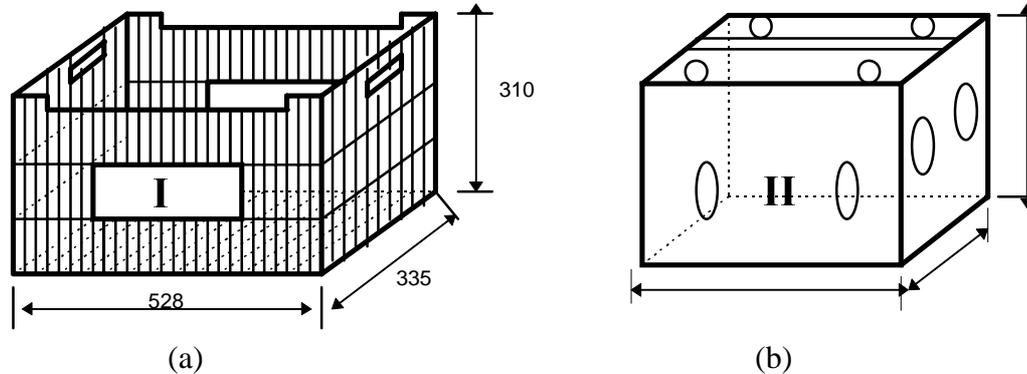


Figura 2 - Representação esquemática das dimensões das embalagens: (a)- embalagem plástica (PL), (b)- embalagem de papelão (PP).

Um parâmetro geralmente utilizado para medir a eficiência do processo de resfriamento é o chamado meio-tempo de resfriamento, o qual é atingido quando a diferença entre a temperatura do produto e a temperatura do meio de resfriamento seja reduzida à metade. Este parâmetro pode ser avaliado em termos da Taxa de Resfriamento (TR), a qual pode ser expressa como (Mohsenin, 1980):

$$TR = \frac{T_c - T_a}{T_i - T_a} = 0,5 \quad (1)$$

Para a realização deste trabalho foi considerada a temperatura num ponto próximo do centro dos frutos. No início do experimento a temperatura no interior dos frutos foi de $26 \pm 1^\circ\text{C}$ (T_i). Considerando que a temperatura do ar resfriado no interior da câmara foi de 1°C (T_a), então o meio-tempo de resfriamento para estas condições será atingido quando a temperatura dos produtos, aproximadamente no centro, seja de 13°C (T_c , ponto em que $TR=0,5$).

A velocidade do ar foi medida em três pontos ao longo do túnel de resfriamento (entrada, meio e saída do túnel), 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 no túnel foi de $1,3 \pm 0,03$ m/s.

2.2 Análise teórica

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

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

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 ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$), 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.

Na busca de um modelo matemático que represente adequadamente a geometria dos produtos hortifrutícolas, foi adaptado o modelo matemático desenvolvido por Lima *et al.* (1997) e Lima & Nebra (1997). O modelo formula as equações que definem o processo de difusão de massa em corpos esferoidais prolato, utilizando-se do sistema de coordenadas esferoidais prolato. Para a adequação do modelo às condições deste trabalho, este foi reescrito na forma que define o processo de transferência de calor em regime transiente, incorporando os parâmetros adimensionais comumente usados na literatura.

Na Fig. 3 é mostrada a caracterização geométrica de um corpo esferoidal prolato, que são corpos que tem $L_2 > L_1$ (semi-eixos maior e menor do corpo). O modelo é muito abrangente, podendo ser utilizado em geometrias que variam desde uma esfera até um cilindro, inclusive elipsóides de revolução (Lima & Nebra, 1997).

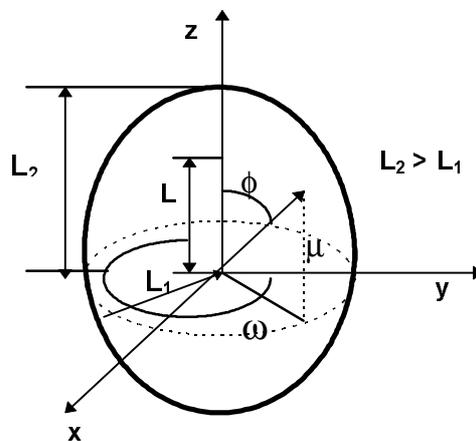


Figura 3- Caracterização de um corpo sólido com geometria esferoidal prolato.

As relações entre os sistemas de coordenadas cartesianas (x, y, z) e o sistema esferoidal prolato (μ, ϕ, ω) foram expressas por Haji-Sheikh & Sparrow (1966), onde:

$$x = L \operatorname{senh} \mu \operatorname{sen} \phi \cos \omega ; y = L \operatorname{senh} \mu \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \omega ; z = L \cosh \mu \cos \phi \quad (3)$$

sendo que:

$$L = \sqrt{L_2^2 - L_1^2} \quad (4)$$

Para a simplificação do problema de transferência de calor, no interior de corpos sólidos com geometria esferoidal, 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.

Para a análise do problema foram propostas as seguintes condições de contorno (Lima & Nebra, 1997):

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

$$-\frac{k}{L} \sqrt{\frac{(\xi^2 - 1)}{(\xi^2 - \eta^2)}} \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\xi_f} = h_c [T(\xi = \xi_f, \eta, t) - T_a] \quad (5)$$

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 e a superfície está em equilíbrio com o meio.

$$T(\xi, \eta, 0) = T_0 = \text{cte}$$

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

$$\frac{\partial T(\xi, 1, t)}{\partial \eta} = 0; \quad \frac{\partial T(\xi, 0, t)}{\partial \eta} = 0; \quad \frac{\partial T(1, \eta, t)}{\partial \xi} = 0 \quad (6)$$

Com as considerações feitas e 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:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{1}{L^2 (\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \xi} [(\xi^2 - 1) \alpha \frac{\partial T}{\partial \xi}] \right] + \left[\frac{1}{L^2 (\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \eta} [(1 - \eta^2) \alpha \frac{\partial T}{\partial \eta}] \right] \quad (7)$$

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

Para a discretização da equação de transferência de calor na forma adimensional, foram considerados os seguintes parâmetros adimensionais:

$$T^* = \frac{T_c - T_a}{T_i - T_a}; \quad \eta^* = \eta; \quad \xi^* = \xi; \quad t^* = \frac{\alpha t}{L^2}; \quad B_i = \frac{h_c L}{k} \quad (8)$$

Substituindo as variáveis adimensionais e suas derivadas na equação de transferência de calor em coordenadas elípticas, têm-se que:

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \frac{1}{(\xi^{*2} - \eta^{*2})} \left[\frac{\partial}{\partial \xi^*} [(\xi^{*2} - 1) \frac{\partial T^*}{\partial \xi^*}] \right] + \frac{1}{(\xi^{*2} - \eta^{*2})} \left[\frac{\partial}{\partial \eta^*} [(1 - \eta^{*2}) \frac{\partial T^*}{\partial \eta^*}] \right] \quad (9)$$

As condições de contorno são obtidas similarmente. O ajuste simultâneo do coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c) e da difusividade térmica (α), 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), estão definidas como:

$$E = \sum_{i=1}^n (T_{i,num}^* - T_{i,exp}^*)^2 \quad (10)$$

$$S^2 = \frac{E}{(n-1)} \quad (11)$$

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

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 de 20x20 pontos e o método iterativo de Gauss-Seidel (Lima & Nebra, 1997). 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:

$$\left| T^{*k+1} - T^{*k} \right| \leq 10^{-7} \text{ e } \frac{\sum |A_k|}{|A_p|} \leq 1 \quad (12)$$

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

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 4 mostra se o comportamento da taxa adimensional de resfriamento referida ao centro dos frutos. Foi assumido o valor de temperatura média entre os diferentes pontos monitorados, como mostrado na Fig. 1(b).

Uma análise das curvas mostra que, para as caixas plásticas (40% de área de abertura efetiva), foi obtido o menor tempo de resfriamento, 80 min (onde $TR_{exp}=0,5$). Para os frutos que foram resfriados nas caixas de papelão (3,5% de área de abertura efetiva), o meio-tempo de resfriamento médio foi de 250 min. Ou seja, para uma área efetiva de abertura 11 vezes maior, o tempo de resfriamento é 3 vezes menor. Isto é fisicamente realista na tendência, uma vez que maior abertura nas caixas permite que a velocidade do ar efetiva sobre as laranjas, no interior das embalagens, seja mais elevada, assim como os produtos ficam mais expostos ao contato ar-fruto, acelerando conseqüentemente a transferência de calor, o que diminui consideravelmente o tempo de resfriamento (expressado na Fig. 4 no ponto em $TR_{exp}=0,5$).

Observa-se que as curvas obtidas com a aplicação do modelo matemático apresentam uma aproximação adequada. O valor do erro (calculado com a Eq. 10), foi de 0,71 para o experimento com caixas plásticas ($E/n=0,007$). Neste mesmo experimento, o valor de E no

ponto em que $TR=0,5$ é de aproximadamente 0,13. No experimento com as caixas de papelão, o valor de E foi de 0,46 ($E/n=0,0027$), e no ponto em que a $TR=0,5$, o erro foi de 0,04. O baixo erro obtido em ambos os experimentos, quando o meio-tempo de resfriamento é atingido ($TR=0,5$), confirma a possibilidade da aplicação do modelo matemático para prever o valor desta grandeza.

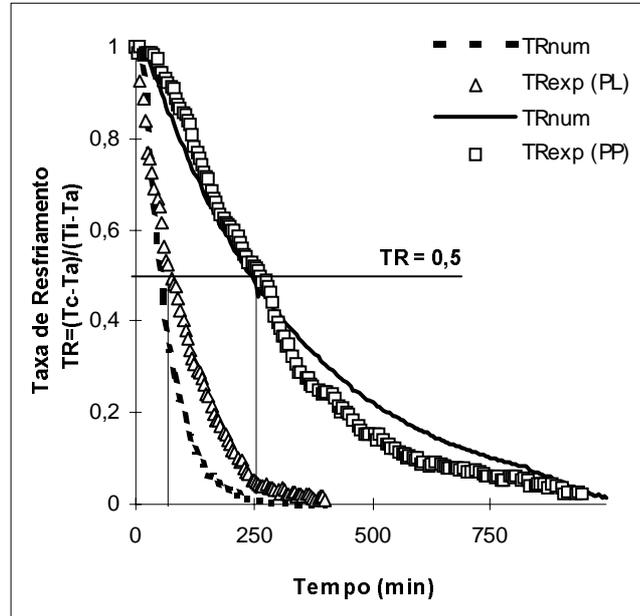


Figura 4. Taxa de Resfriamento (TR) de laranjas da variedade Valência num sistema de resfriamento com ar forçado a 1°C ; num- modelo numérico; exp- dados experimentais; PL- resfriamento em caixas plásticas (área efetiva de 40%); PP- resfriamento em caixas de papelão (área efetiva de 3,5%).

Os valores dos coeficientes de transporte difusivo e convectivo (α e h_c), obtidos a partir do ajuste do modelo aos dados experimentais, em cada experimento, estão mostrados na Tabela 1. Da análise dos resultados, pode-se dizer que quando os frutos são resfriados nas embalagens com 40% de abertura, o valor de h_c é aproximadamente 2,3 vezes maior que quando resfriados em caixas com 3,5% área de abertura. Isto é devido ao fato dos frutos ter um maior contato com o ar resfriado, o que provoca que o processo de transferência de calor seja mais acelerado. Coincidentemente, para esta condição experimental, foi obtido o menor tempo de resfriamento (para $TR = 0,5$ onde o tempo de resfriamento foi de 80 min).

Tabela 1. Valores dos coeficientes de difusão térmica e de transferência de calor convectivo

Parâmetros	Embalagens	
	Plásticas	Papelão
(m^2/s)	$1,11 \cdot 10^{-7}$	$0,65 \cdot 10^{-7}$
$h_c (\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$	12,6	5,4
E	0,71	0,46
S^2	0,2757	0,2735

Verifica-se que a diminuição do coeficiente de transferência de calor convectivo, devido ao decréscimo do fluxo de ar passando através da superfície das laranjas, o que traz consigo uma diminuição mas lenta da temperatura no interior dos frutos, é muito bem caracterizada pelo modelo. Além disso, ocorreu uma diminuição da difusividade térmica, que pode ser atribuída à sua dependência com a temperatura.

Para uma comparação mais efetiva, valores do coeficiente de difusividade térmica entre $1,13 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,06 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, foram apresentados por Ansari & Afaq (1985) e Ramos *et al.* (1993), para situações experimentais muito próximas do caso com embalagens com 40% de área efetiva. Isto possibilita a afirmação de que o modelo e a metodologia usada neste trabalho, são consistentes para caracterizar o processo de resfriamento e para determinar propriedades físicas de sólidos esféricos, com satisfatória precisão.

5. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos, algumas conclusões são evidentes:

- Existe uma relação direta entre a área de abertura das caixas e o tempo de resfriamento dos frutos, para condições do ar de resfriamento similares.
- O modelo matemático usado demonstrou ser consistente e adequado para representar o processo de transferência de calor convectivo em regime transiente de frutas com geometria elipsoidal.
- Os valores de h_c e α obtidos caracterizam adequadamente o processo de resfriamento de laranja nas duas embalagens utilizadas.

Agradecimentos

À FAPESP pelo apoio financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Ansari, F.A. & Afaq, A. 1985. New method of measuring thermal diffusivity of spherical produce. *International Journal of Refrigeration*. vol. 9, pp. 158-160.
- Ansari, F.A & Afaq, A. 1986. Precooling of cylindrical food products. *International Journal of Refrigeration*. vol. 9, pp. 161-163.
- Bazan, T.; Chau, K. V.; Baird, C. D. 1989. Heat transfer simulation of the bulk cooling of fruits. ASAE. n. 89-6559. American Society of Agricultural Engineers.
- Cleland, A.C. & Earle, R. L. 1982. A simple method for prediction of heating and cooling rates in solids of various shapes. *Revue Internationale du Froid*. vol. 5, n. 2, p. 98-106.
- Dincer, I. 1995. Transient heat transfer analysis in air cooling of individual spherical products. *Journal of Food Engineering*. vol. 26, pp. 453-467.
- 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.
- Guemes, D.R.; Pirovani, M. E & Pentima, J. H. 1989. Heat transfer characteristics during air precooling of strawberries. *Revue Internationale du Froid*. vol. 12, pp. 169-173.

- Haji-Sheikh, A. & Sparrow, E.M. 1966. Transient heat conduction in a prolate spheroidal solid. Transactions of the ASME. Journal of Heat Transfer. vol. 88, n. 3, pp. 331-333.
- Hayakawa, K.C. & Succar, J. 1982. Heat transfer and moisture loss of spherical fresh produce. Journal of Food Science. vol. 47, pp. 596-605.
- 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.
- Lima, A. G. B.; Nebra, S. A; Altemani, C. A. C. 1997. Simulation of the drying kinetics of the of the silkworm cocoon considering diffusive mechanism in elliptical coordinate. Proceedings of Inter-American Drying Conference (IADC). vol. B, pp. 317-324. Itu. SP.
- Lovatt, S. J.; Pham, Q. T.; Loeffen, M. P. F. & Cleland, A. C. 1993. 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.
- Mohsenin, N. N. 1980. Thermal properties of foods and agricultural materials. Gordon & Breach. New York. 405 p.
- Ramos, A. L.; Palmisano, E.; Dombey, A.; Pimentel, J. A.; Fayés, D.; González, D. 1993. Thermal properties of tropical fruits and vegetables. Revista Española de Ciencia y Tecnología de los Alimentos. vol. 33, n. 3, pp. 271-283.

COOLING CURVES FOR ORANGE VALENCIA BY EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MODEL.

Abstract. This paper treats about the cooling curves for orange (variety Valencia) using parameters such as the half-cooling time and the cooling rate. The product was precooling (at 1°C, RH ≈ 89%, and air speed of approximately 1 m/s) through forced-air cooling tunnel system. Two types of package were used, with different value of the opening area, (plastic boxes and of cartons, with 40% and 3,5% of opening effective area, respectively). A bidimensional mathematical model was applied, assuming prolate spheroid coordinates, to characterize the transient heat transfer process inside the fruits, assuming convective profile conditions on the outside surface, during forced air cooling. The generated equations were numerically solved by finite volumes method, to obtain the heat transfer and thermal diffusion coefficients. The comparative analysis of the theoretical and experimental curves obtained, presented a satisfactory agreement with the of the cooling curves with the numeric method, being proven that the mathematical model is consistent and adapted to describe the experiment. A highly significant difference was verified in the half-cooling time of the products, for the two packing used in the experiments, what demonstrates that the area of opening of the boxes is one of the factors that influences in a predominant way on the efficiency of the process of transfer of heat during the cooling.

Key- words: Forced-air precooling, Oranges, Experimental, Numerical.