

# TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITOS DE PARTÍCULAS ESFÉRICAS: APLICAÇÃO AO RESFRIAMENTO DE LARANJA COM AR FORÇADO

## Trabalho 45041

**Bárbara Teruel<sup>1</sup>, Theo Guenter Kieckbusch<sup>2</sup>; Petrônio Pulino<sup>3</sup>; Luis Augusto Cortez<sup>1</sup>;  
Antonio Gilson Barbosa de Lima<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Caixa Postal 6011, CEP 13083-970, Campinas-SP, Brasil. [barbarat@agr.unicamp.br](mailto:barbarat@agr.unicamp.br); [cortez@agr.unicamp.br](mailto:cortez@agr.unicamp.br)

<sup>2</sup>Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Caixa Postal 6066, CEP 13081-970, Campinas-SP, Brasil. [theo@feq.unicamp.br](mailto:theo@feq.unicamp.br)

<sup>3</sup>Departamento de Matemática Aplicada, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Caixa Postal 6065, CEP 13083-859, Campinas-SP, Brasil. [pulino@ime.unicamp.br](mailto:pulino@ime.unicamp.br)

<sup>4</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Campina Grande (UFCG), Caixa Postal 10069, CEP 58109-970, Campina Grande-PB, Brasil. [gilson@dem.ufpb.br](mailto:gilson@dem.ufpb.br)

**Resumo.** *Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma modelagem matemática e simulação numérica do processo de resfriamento de leitos de partículas esféricas, e foi aplicada para descrever o processo de resfriamento de laranja variedade Valência. Os resultados numéricos são comparados com os experimentais, resfriando as frutas num túnel de ar forçado a 1°C e velocidade do ar de aproximadamente de 1 m/s, obtendo-se uma boa concordância. Resultados da distribuição de temperatura do ar e do produto ao longo do leito e para vários tempos do processo de resfriamento são apresentados e discutidos.*

**Palavras-chave:** simulação, experimental, temperatura, tempo de resfriamento, laranja.

## 1. INTRODUÇÃO

O resfriamento rápido de frutas e hortaliças após a colheita tem como objetivo diminuir a temperatura até níveis compatíveis com o produto, a fim de prevenir a deterioração bem como perdas de peso, preservando a sua qualidade, durante a estocagem e comercialização. Poder predizer com a maior exatidão possível a resposta dos produtos hortifrutícolas ao resfriamento, permite desenvolver projetos adequados de armazenamento. Particularmente durante um processo de resfriamento rápido, faz-se necessário conhecer o tempo em que os produtos atingem a temperatura desejada, na maioria dos casos não se possuem as condições necessárias para desenvolver levantamentos experimentais (ASHRAE, 1994).

O projeto de instalações usadas para resfriamento rápido com ar forçado segue em geral um dimensionamento quase empírico, devido fundamentalmente aos diferentes tipos de embalagens usados e as variáveis envolvidas no processo de transferência de calor em estado transiente num leito profundo de partículas. Dentre as variáveis encontram-se o coeficiente convectivo de transferência de calor, a variação com a velocidade do ar ao longo do leito dependendo do arranjo dos produtos, perfil de temperatura dos produtos ao longo do leito, dentre outros fatores (Novy & Kieckbusch, 1986; Chau, & Gaffney, 1990; Alvarez & Letang, 1994, Santiago, 2003).

A determinação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do produto é complexa devido à quantidade de fatores que o influenciam, dentre eles as características do escoamento do ar, dimensões e geometria do fruto e modo de empacotamento no leito, temperatura do produto e do meio de resfriamento, propriedades termofísicas dos produtos, dentre outros (Dincer & Genceli, 1995).

Para se conseguir soluções matemáticas exatas dos problemas de transferência de calor, devem ser utilizados métodos analíticos, porém, essas soluções são restritas a geometrias e condições de contorno simples. A maioria dos problemas físicos envolvem propriedades variáveis e geometrias e/ou condições de contorno em que a adoção de técnicas analíticas de solução é impossível. Nesses casos é necessário utilizar-se de técnicas numéricas (Hayakawa & Succar, 1982; Chau *et al.*, 1990; Tashtoush, 2000; Brosnan & Wen Sun, 2001; Delgado & Wen Sun, 2001; Teruel *et al.*, 2003).

Este trabalho teve como objetivo apresentar o desenvolvimento de equações de balanço de massa e energia e sua solução numérica, para caracterizar o processo de resfriamento de leitos de partículas esféricas. Para a resolução das equações foi aplicado o Método dos Volumes Finitos, e um programa foi implementado no Mathematica®. Os dados obtidos na simulação são comparados com dados experimentais do resfriamento com ar forçado de laranja Valênciense.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

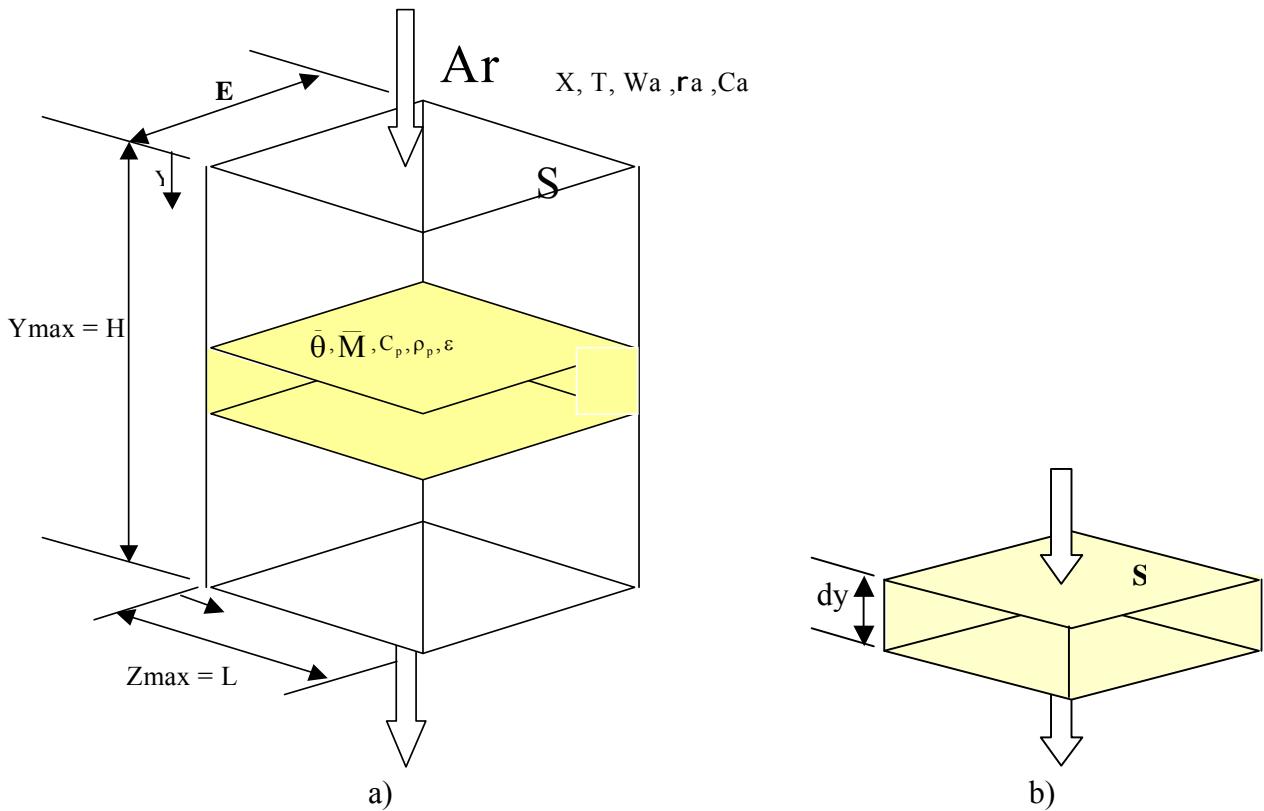
### 2.1- Caracterização do Problema

O sistema físico utilizado para o desenvolvimento do modelo matemático mostra-se na Fig. (1). O mesmo consta de um leito profundo (com porosidade  $\varepsilon$ ), constituído de partículas com temperatura inicial  $\theta_0$ , o qual é continuamente resfriado por um fluxo de ar a uma temperatura constante,  $T_0$ . O fluido se aquece na medida que atravessa o leito e consequentemente acontece um resfriamento não uniforme das partículas contidas nele. As seguintes equações são aplicadas:

#### a) Balanço de energia para o ar

$$\left| \begin{array}{l} \text{Energia que} \\ \text{entra na área } S \\ \text{na posição } y \end{array} \right| - \left| \begin{array}{l} \text{Energia que sai da} \\ \text{área } S \text{ na posição} \\ y+dy \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{Energia transferida} \\ \text{ao produto, por} \\ \text{convecção} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{Variação, com relação ao} \\ \text{tempo, da entalpia do ar} \\ \text{nos espaços vazios} \end{array} \right|$$

$$-\frac{\partial(\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a X c_v T)}{\partial y} + A^* h_c (T - \theta_s) + \frac{\partial(\rho_a c_a + \rho_a X c_v \varepsilon T)}{\partial t} \quad (1)$$



**Figura 1.**a) Sistema físico para o balanço de calor no leito. b) Fração do volume do sólido utilizado no desenvolvimento das equações na forma diferencial.

### b) Balanço de energia para o produto

$$\left| \begin{array}{l} \text{Energia transferida} \\ \text{por convecção, do} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{Energia requerida} \\ \text{para resfriar o} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{Energia requerida para} \\ \text{evaporar a água do} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{Energia requerida para} \\ \text{resfriar o vapor de água} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{evaporada} \end{array} \right|$$

$$A^* h_c (T - \theta_s) = (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \quad (2)$$

### c) Balanço da massa do ar

$$\left| \begin{array}{l} \text{Quantidade de vapor} \\ \text{de água que entra na} \\ \text{área S na posição y} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{l} \text{Quantidade de vapor de} \\ \text{água que sai da área S na} \\ \text{posição y+dy} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{Variação da} \\ \text{umidade do ar nos} \\ \text{espaços vazios} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{Umidade cedida} \\ \text{pelo produto} \end{array} \right|$$

$$-\frac{\partial(\rho_a w_a x)}{\partial y} - \frac{\partial(\epsilon \rho_a x)}{\partial t} = \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3)$$

### d) Balanço de massa do produto

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_l(t) \quad (4)$$

A função  $f_l$  é definida em função do tipo de problema e material a ser estudado. Neste trabalho assume-se que não existe transferência de massa do produto para o ar e vice-versa.

Para os modelos de resfriamento do leito por ar forçado as condições de contorno foram:

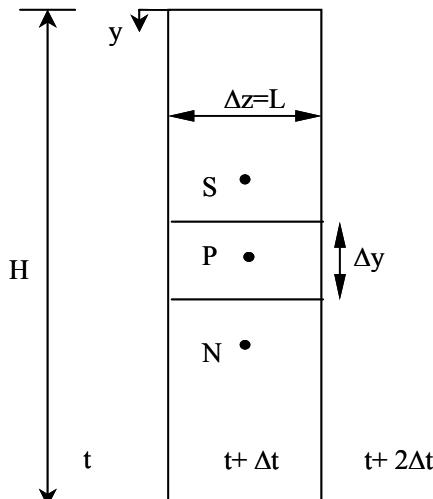
$$T(y=0, z, t) = T_0 \quad \bar{\theta}(y, z, t=0) = \bar{\theta}_o$$

$$\bar{M}(y, z, t = 0) = \bar{M}_0$$

$$x(y = 0, z, t) = x_0$$

## 2.2- Solução Numérica

Para obter-se a solução desse problema transiente, foi utilizado o Método de Volumes Finitos. Para discretizar as equações 1, 3 e 4, as mesmas foram integradas num volume de controle específico como mostra a Fig. (2). Assumiu-se no domínio de estudo as dimensões de uma caixa comercial ( $0,29 \times 0,39 \times 0,35$  m). Foi utilizado o esquema *upwind* como função de interpolação para os termos convectivos (Patankar, 1980; Maliska, 1995).



**Figura 2-** Volume de controle

### a) Balanço de energia para o ar

$$A_p T_p = A_s T_s + A_p^o T_p^o + S_c^t \quad (5)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{w_a}{\varepsilon} + \frac{A * h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a X c_v)}$$

$$A_s = \frac{w_a}{\varepsilon}$$

$$A_p^o = \frac{A * h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a X c_v)}$$

$$S_c^t = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

### b) Balanço de energia para o do produto

$$A_p \bar{\theta}_p = A_p^o \bar{\theta}_p^o + S_c^\theta \quad (6)$$

onde:

$$A_p = \frac{1}{\Delta t_m} + \frac{h_c A^*}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}}$$

$$A_p^o = \frac{1}{\Delta t_m}$$

$$S_c^{\theta} = \frac{h_c A^* \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}}$$

### c) Balanço da massa do ar

$$A_p x_p = A_s X_s + A_p^o X_p^o + S_c^x \quad (7)$$

onde:

$$A_p = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} + \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon}$$

$$A_s = \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon}$$

$$A_p^o = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

$$S_c^x = - \frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy$$

### d) Balanço de massa do produto

$$\bar{M}_p = \bar{M}_p^o \quad (8)$$

Para a resolução das equações foi implementado um programa no Mathematica<sup>®</sup>, com uma malha de 20x20 (Santiago, 2003).

## 2.3- Propiedades Termofísicas

### a) Ar

As propriedades do ar foram calculadas em função da temperatura local do ar dentro do leito.

$$c_v = 1,8830 - 0,16737 \cdot 10^{-3} (T + 273,15) + 0,84386 \cdot 10^{-6} (T + 273,15)^2 - 0,26966 \cdot 10^{-9} (T + 273,15)^3 \cdot 10^3 \text{ kJ / kgK} \quad (\text{Jumah et al., 1996; Pakowski et al., 1991})$$

$$c_w = 2,82232 + 1,18277 \cdot 10^{-2} \cdot (T + 273,15) - 3,5047 \cdot 10^{-5} (T + 273,15)^2 + 3,6010 \cdot 10^{-8} (T + 273,15)^3 \text{ kJ/kgK} \quad (\text{Jumah et al., 1996})$$

$$\rho_a = \frac{\rho_{atm} M_a}{R \cdot T_{abs}} \quad ; \quad T_{abs} = T + 273,15 \text{ K}; \quad R = 8314,34 \text{ J/ Kg} \quad (\text{Jumah et al., 1996});$$

$$P_{atm} = 101325 \text{ Pa}$$

$$c_a = (1,00926 - 4,04033 \cdot 10^{(-5)} T + 6,17596 \cdot 10^{(-7)} T a^2 - 4,09723 \cdot 10^{(-10)} T^3 \cdot 10^3) \text{ kJ/ kg K} \quad (\text{Jumah et al., 1996})$$

$$P_{vs} = 22105649,25 \text{ Exp}^{\{[-27405,53 + 97,5413 (T + 273,15) - 0,146244 (T + 273,15)^2 + 0,12558 \cdot 10^{-3} \cdot (T + 273,15)^3 - 0,48502 \cdot 10^{-7} (T + 273,15)^4] / [4,34903 \cdot ((T + 273,15) - 0,39381 \cdot 10^{-2} \cdot (T + 273,15))]\}} \quad (\text{Rossi, 1987})$$

$$UR = 88,4\% \quad (\text{Teruel, 2000})$$

$$w_o = 1 \text{ m/s}$$

### b) Laranja

$$C_p = 3115 \text{ kJ/kg K}; \quad \varepsilon = 0,66 \quad (\text{Teruel et al., 2002})$$

$$\rho_p = 512 \text{ kg/m}^3; \quad d = 8 \text{ cm}$$

$$A^* = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} \text{ m}^2/\text{m}^3 \quad (\text{Keey, 1992})$$

### c) Valores de hc no leito

Considerou-se que o coeficiente de transferência de calor é variável ao longo do leito, usando a Eq. 2 (Incropera & De Witt, 1985). Os coeficientes a e n da equação foram obtidos com auxílio do

Statistica®. Os valores de  $hc$  em três posições diferentes (entrada do ar, médio do leito e saída do ar) dentro do leito de laranjas são:  $hc1 = 56,48 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $hc2 = 30,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $hc3 = 20,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

$$hc(y) = ay^{-n} \quad (9)$$

O método de ajuste dos valores do coeficiente convectivo de transferência de calor assim como os dados experimentais apresentados neste trabalho encontram-se apresentados e discutidos em Teruel *et al.*, 2001 e Teruel *et al.*, 2002.

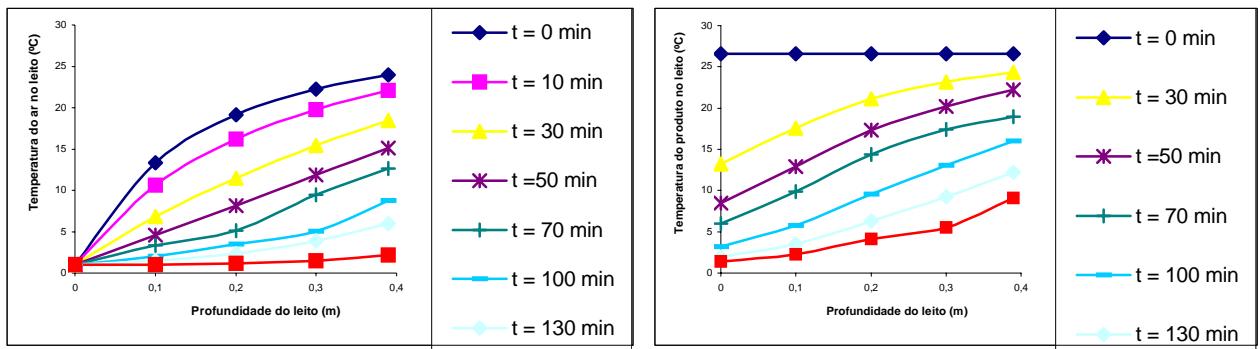
### 3- Dados de Resfriamento

Os dados experimentais usados para a validação do modelo, foram obtidos em pesquisas precedentes, quando foi resfriada laranja Valência, num túnel com ar forçado ( $Q = 0,54 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $va = 1 \text{ m/s}$ ,  $Ta = 1^\circ\text{C}$ ). Os produtos foram acondicionados em embalagens plásticas ( $0,29 \times 0,39 \times 0,35 \text{ m}$ ). A temperatura foi medida com termopares ( $T$ , Cobre-Constantan), aferidos previamente ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ), e inseridos na polpa dos frutos, os quais foram interligados a um sistema de aquisição de dados por computador, que opera com um *software* de aquisição de dados.

A temperatura média inicial das laranjas foi de  $26,57 \pm 0,19^\circ\text{C}$ , de maneira que os frutos atingiram a condição de resfriamento (tempo de sete-oitavos do resfriamento) quando a temperatura no ponto próximo do centro era de aproximadamente  $3^\circ\text{C}$ .

### 3- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Fig. (3) mostra-se o histórico da temperatura do ar no leito e na polpa dos frutos. Nota-se que temperatura do ar aumenta com a profundidade do leito. A medida que o ar de resfriamento entra no leito a temperatura sofre um acréscimo  $20^\circ\text{C}$ , para os primeiros 10 min de processo. Nos primeiros 50 min de resfriamento se mantém um gradiente na temperatura do ar da ordem de  $14^\circ\text{C}$  ao longo do leito, sendo que quando os frutos trocam calor com o ar resfriado este gradiente diminui gradativamente até atingir  $1^\circ\text{C}$ . Dependendo da posição do produto no leito também se estabelece um gradiente de temperatura, aos 50 min, a temperatura dos frutos próximos da entrada do ar era da ordem de  $9^\circ\text{C}$  e aqueles situados em  $y=0,38\text{m}$  a temperatura é da ordem de  $20^\circ\text{C}$ , o que dá uma diferença de 50% no tempo de resfriamento.



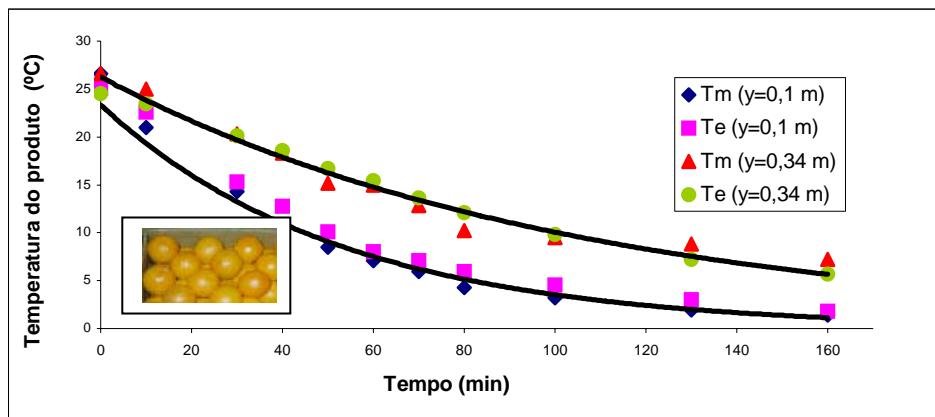
**Figura 3-** Temperatura do ar no leito de laranja Valência para diferentes instantes de tempo ( $v=1 \text{ m/s}$ ). Temperatura dos produtos posicionados em diferentes profundidades no leito durante o processo de resfriamento.

Este gradiente de temperatura que se estabelece entre os produtos dentro do leito deve-se provavelmente à variação da velocidade do ar no interior do leito, o que se reflete claramente nos valores do coeficiente convectivo de transferência de calor (Teruel *et al.*, 2002).

Na Fig. (4) mostram-se os valores de temperatura experimentais e numéricos para produtos situados em duas posições diferentes no leito ( $y=0,1\text{m}$  que corresponde ao fruto na entrada do leito e  $y=0,34\text{m}$  que corresponde ao fruto na saída do leito). Observou-se uma adequada concordância que se obteve entre os dados experimentais e os valores gerados pelo modelo, com uma variância

de  $1,93^{\circ}\text{C}$  para a posição  $y=0,1\text{m}$  e  $1,54^{\circ}\text{C}$  para a posição  $y=0,34\text{m}$ , o que representa um erro da ordem de 3,7%.

Os produtos situados em  $y=0,1\text{m}$  atingiram  $3^{\circ}\text{C}$  aos 107 min sendo que os que se encontram posicionados em  $y=0,34\text{m}$  atingiram esta mesma temperatura aos 160 min.



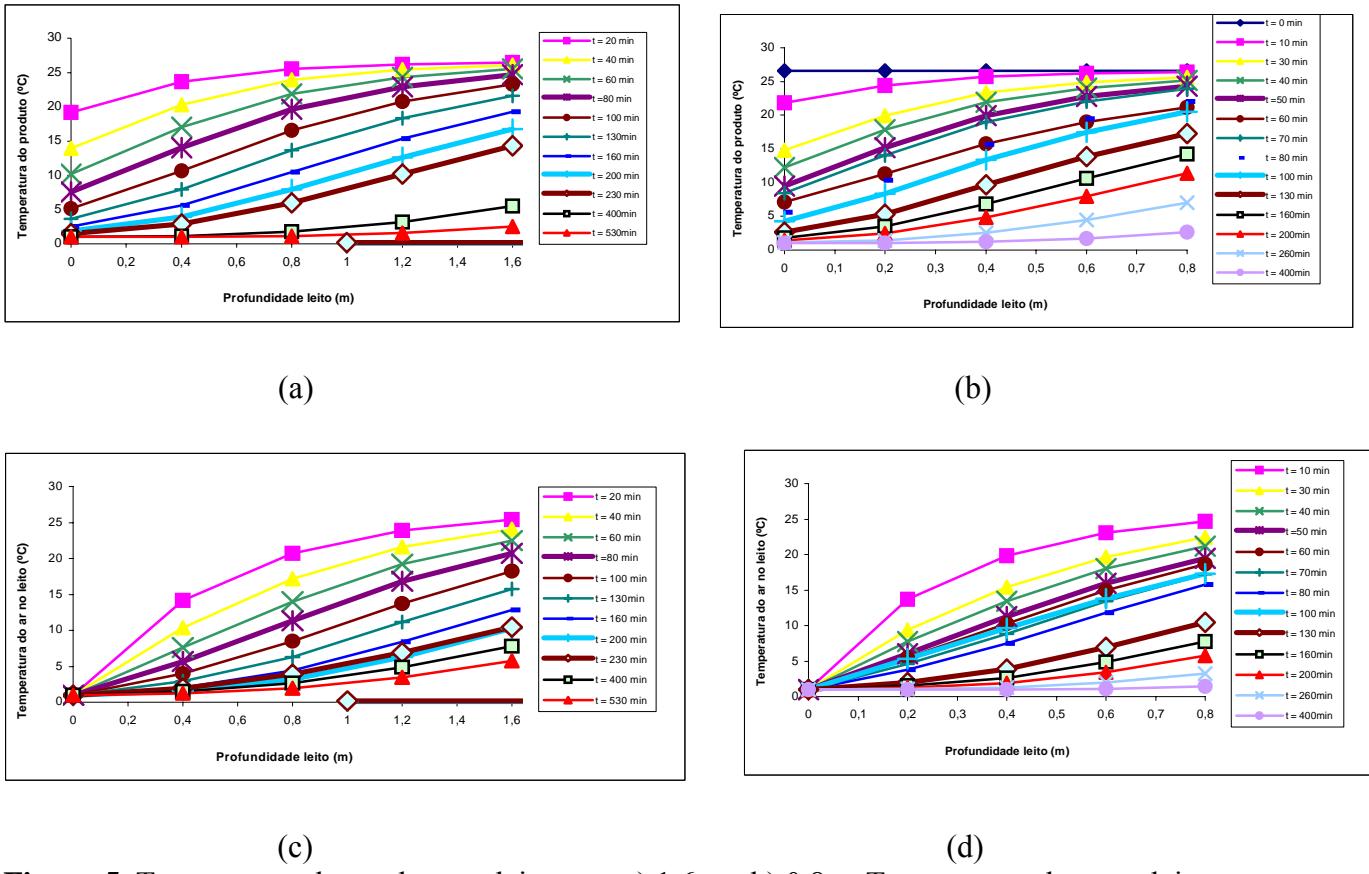
**Figura 4-** Valores de temperatura experimentais (Te) numéricos (Tm) durante o resfriamento de um leito de laranja Valênci para diferentes profundidades do leito.

Como os resultados numéricos mostraram uma adequada concordância com os dados experimentais para um leito de  $y=0,39\text{m}$ , então forma feitas simulações para um leito de diferentes profundidades, 0,8 m e 1,6 m (Figura 5).

Observou-se que no leito com  $y=0,8\text{m}$ , os produtos situados na posição  $y=0,01\text{ m}$  resfriaram-se num tempo 65% menor (130 min) com relação aos produtos situados em  $y=0,78\text{m}$  (200 min), apresentando uma diferença em termos de temperatura da ordem de  $7,74^{\circ}\text{C}$ , em média (Figura 5).

Sendo que, quando o leito possui uma profundidade 0,39 m os frutos posicionados próximos da dimensão  $y=0,39\text{m}$  atingem o tempo de sete-oitavos ( $T=3^{\circ}\text{C}$ ) de resfriamento em aproximadamente 160 min, não entanto quando o leito possui uma profundidade de 0,8m o tempo de sete-oitavos do resfriamento ( $T=3^{\circ}\text{C}$ ) é atingido em aproximadamente 350 min, um tempo 2,3 vezes maior, o que representa uma diferença de 46%.

Observou-se que na medida que o leito é mais profundo, os produtos situados em posições que correspondem com a saída do ar ( $y=0,78\text{m}$  e  $y=1,58\text{m}$ ), resfria-se de forma mais lenta. A título de exemplo, aos 50 min depois de iniciado o resfriamento os frutos em  $y=0,34\text{ m}$  tinham uma temperatura de aproximadamente  $19^{\circ}\text{C}$ , sendo que para o fruto em  $y=0,78\text{m}$  a temperatura era de  $22^{\circ}\text{C}$  e em  $y=1,58\text{m}$  o produto apenas tinha-se resfriado, mostrando ainda uma temperatura próxima da inicial, da ordem de  $25^{\circ}\text{C}$ . Este gradiente que se estabelece dentro do leito, com relação à temperatura dos produtos, está diretamente relacionado com a temperatura do ar de resfriamento, a qual também exibe gradientes de ordem razoável. No leito com 0,8m aos 50 min depois de iniciado o resfriamento o gradiente de temperatura entre o ponto  $y=0,1\text{m}$  e  $y=0,78\text{m}$  é de  $17^{\circ}\text{C}$ , sendo que para o leito com 1,6m em  $y=0,58$  o gradiente de temperatura é de  $20^{\circ}\text{C}$ , o que representa uma diferença de 15%.

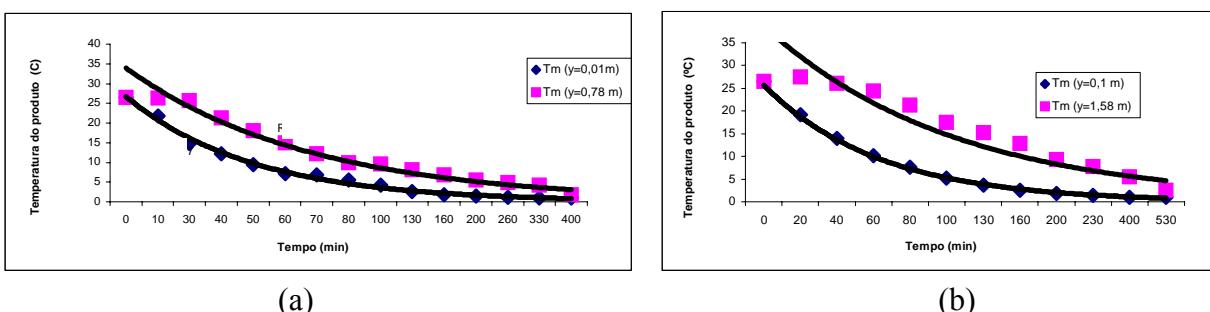


**Figura 5.** Temperatura do produto no leito com a) 1,6m e b) 0,8m. Temperatura do ar no leito com c) 1,6m e d) 0,8m.

O tempo necessário para que o produto que estava numa profundidade de aproximadamente 1,8m, com relação à entrada do ar, atingir 3°C, foi de aproximadamente 530 min, um tempo 1,5 vezes maior (43,35%) que o tempo necessário quando o leito tinha um profundidade de 0,8 m (300 min), e 3,3 vezes (69,81%) com relação ao leito de 0,39 m (160 min).

A diferença de temperatura entre os produtos que se encontram na entrada do leito (caixa) e aqueles que estão posicionados próximos da saída do ar na caixa é de 10,01°C, sendo que para o leito com uma profundidade de 0,39m, a diferença de temperaturas é de 4,75°C.

A Fig. (6) ilustra a diferença de temperatura no leito com profundidade de 0,8 m e de 1,6 m, notando-se que na medida que a profundidade do leito aumenta, o diferencial de temperatura entre os diferentes pontos do leito (entrada e saída do ar), aumenta também em até 40%.



**Figura 6.** a)Temperatura dos produtos em  $y=0,1\text{m}$  e  $y=0,78\text{m}$ . b) Temperatura dos produtos em  $y=0,1\text{m}$  e  $y=1,6\text{m}$ .

Os resultados da simulação obtidos neste trabalho indicam que o modelo de leito apresentado (considerando balanço de calor, para os produtos e o ar, porosidade do leito e coeficiente

convectivo de transferência de calor variável no leito) mostra-se adequado para predizer as respostas da temperatura durante o resfriamento de frutas dentro de um leito confinado. Este modelo poderia ser usado para simular processos de resfriamento de partículas com diferentes geometrias, assim como para simular processos de aquecimento de produtos diversos.

Com o equacionamento apresentado neste trabalho está sendo implementado um software de ordem prática que permitirá a obtenção de dados relacionados com a temperatura dos produtos e temperatura do ar no leito. Particularmente no setor de horticultura a aplicação do modelo apresentado permitiria predizer com adequada precisão à temperatura dos produtos, assim como do ar de resfriamento, para diferentes profundidades de leito, o que significa diferentes dimensões de embalagens, de profundidade de empilhamento assim como para velocidades de ar variáveis. Estes dados são muito úteis nos projetos de túneis de resfriamento rápido com ar forçado assim como em projetos de embalagens para frutas e hortaliças *in natura*.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio financeiro à pesquisa.

### Nomenclatura

$A^*$ - área superficial do sólido por unidade de volume do leito	[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
$A_p, A_s, A_p^0, A_w$ - coeficientes	[ $\cdot$ ]
$c$ - calor específico	[J/kg / K]
$c_a$ - calor específico do ar seco à pressão constante	[J/ kg/K]
$c_v$ - calor específico do vapor d'água, à pressão constante	[J/kg/K]
$c_w$ - calor específico da água	[J/kg/K]
$dM/dt, \partial M/\partial t$ - taxa de difusão	[1/s]
$exp$ - exponencial	[ $\cdot$ ]
$h_c$ - coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/m <sup>2</sup> /K]
$i, j$ - posição do ponto nodal na malha	[ $\cdot$ ]
$\bar{M}$ - teor de umidade médio	[kg/kg]
$N, S, E, W, P$ - pontos nodais	[ $\cdot$ ]
$t$ - tempo	[s]
$T$ - temperatura	[°C]
$UR$ - umidade relativa	[%]
$w_o$ - velocidade do ar	[m/s]
$V$ - volume	[m <sup>3</sup> ]
$X$ - razão de umidade do ar (adimensional)	[kg/kg]
$y, z$ - coordenadas cartesianas	[m]
$\varepsilon$ - porosidade do leito (decimal)	[ $\cdot$ ]
$\theta$ - temperatura do produto	[° C]
$\rho$ - densidade (massa específica)	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Superscritos:**  $\bullet$  - anterior

**Subscritos:**  $a$  - ar;  $abs$  - absoluta;  $c$  - calor;  $e, w, n, s$  - faces dos pontos nodais;  $f$  - final; superficie;  $o$  - inicial;  $P$  - ponto nodal  $P$ ;  $p$  - produto;  $t$  - tempo;  $v$  - vapor;  $w$  - água;

**Abreviações:**  $e$  - Experimental;  $n$  - numérico;

## 5- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, G.; Letang, G. 1994, "Transfers de chaleur et de matière au sein d'un échangeur de type palette". Revue du Froid. v. 47. p. 47-49.
- ASHRAE. Systems and Applications. 1994, "Methods of precooling of fruits, vegetables and flowers". American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta. Cap. 10, p. 1-10.
- Brosnan, T.; Wen Sun, D. 2001, "Precooling techniques and applications for horticultural products- a review". International Journal of Refrigeration. v. 24, p. 154-170.
- Chau, K. V. & Gaffney, J. J. 2001, "A finite difference model for the heat and mass transfer in products with internal heat generation and transpiration". Journal of Food and Science. p. 484-487. USA. 1990.

- Delgado, A. E.; Wen Sun, D. "Heat and mass transfer models for predicting freezing process – a review". *Journal of Food Engineering*. v. 47, p. 157-174.
- 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*. v. 30, p. 215- 220.
- Hayakawa, K.; Succar, J. 1982, "Heat transfer and moisture loss of spherical fresh produce". *Journal of Food Science*. v. 47. p. 596- 605.
- Incropera, F. & De Witt, D. P. 1985, "Fundamentos da Transferência de Calor e Massa". Editora Wiley and Sons. Cap. 6. 454 p.
- Jumah, R. Y.; Mujumdar, A S.; Raghavan, G. S. V. 1996, "A mathematical model for constant and intermittent batch drying of grains in a novel rotating jet spouted bed". *Drying Technology*, v.14, n.3-4, p.765-802.
- Keey, R.B. 1992, "Drying of loose and particulate materials". New York: Hemisphere Publishing Corporation,, 502 p.
- Maliska, C. R. 1995, "Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional". Rio de Janeiro: LTC. 424 p.
- Novy, M.; Kieckbusch, T. 1986, "Equações para o cálculo do tempo de resfriamento de leitos de frutas esféricas". *Revista Ciência e Tecnologia dos Alimentos*. v. 6. n.1. p. 1-16.
- Pakowski, Z., Bartczak, Z. Strumillo, C., Stenstrom, S. 1991, "Evaluation of equations approximating thermodynamics and transport properties of water, sting and air for using in CAD of drying process" *Drying Technologies*. v. 9. no. 3. p. 753-773.
- Patankar, S. V. 1980, "Numerical heat transfer and fluid flow". New York: Hemisphere Publishing Corporation. 197 p.
- Rossi, S. J. 1987, Psicrometria. João Pessoa: FUNAPE, 60p.
- Santiago, D. C. Resfriamento De Leito De Frutas: Modelagem E Simulação. Relatório Técnico. PIBIC/UFPB/CNPq. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciencias e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2003, 60p.
- Tashtoush, B. 2000, "Natural losses from vegetable and fruit products in cold storage". *Food Control*. v.11, p. 465-470.
- Teruel, B.; Kieckbusch, T.; Pulino, P.; Cortez, L.; Lima, A. G. 2003, "Numerical Simulation of Fruits Cooling Using Finite-Element Method". In: 3rd International Conference on Computational Heat and Mass Transfer. Banff: University of Calgary. v. 1, p. 298-308.
- Teruel, B.; Cortez, L.; Lima, A. 2002, "Heat transfer during fruit cooling using forced-air and water". *Brazilian Journal of Food Technology*, Campinas, Brasil, v.5. p. 131-138.
- Teruel, B.; Cortez, L.; Leal, P.; Lima, A. 2001, "Estudo teórico do resfriamento com ar forçado de frutas de geometrias diferentes". *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, SP, v. 21, n. 2, p. 228-235.

**HEAT TRANSFER IN THE SPHERICAL PARTICLES BED: ORANGE COOLING WITH FORCED-AIR COOLING.** *This work presents a mathematical model and the corresponding numerical procedures scheme, to describe the cooling process in bed of solid particles under conditions found in vegetables cooling systems. The bed dimensions are according to the commercially available packages. The mass and energy balances equations of the interacting phases (solids and fluid) were solved using finite-volume method. The numerical results were compared with experimental data obtained with a load of oranges cooled in a forced air tunnel at the temperature 1°C and air velocity 1.0 m/s. The temperature distributions of the air and products inside the bed and during the cooling process are presented and discussed.*

**Key-words:** experimental, temperature, cooling time, simulation, orange.