

# DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE ALIMENTOS: MEDIDAS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Determination of Thermal Diffusivity of foods: Experimental Measurements and Numerical Simulation

TRES, M. V  
BORGES, G. R.  
CORAZZA, M. L.  
ZAKRZEWSKI, C. A.

Recebimento: 01/07/2011 – Aceite: 11/10/2011

**RESUMO:** O conhecimento do coeficiente de difusividade térmica em alimentos é de fundamental importância para a indústria, pois sem esta propriedade termofísica não seria possível calcular a transferência de calor nas substâncias. O presente trabalho teve por objetivo a montagem de um aparato experimental para determinação do coeficiente de difusão térmica de alimentos, bem como a construção de uma rotina computacional para simulação do processo de transferência de calor em coordenadas cilíndricas. Os resultados obtidos mostraram uma tendência de que quanto maior a temperatura, maior será o coeficiente de difusividade térmica. O programa em linguagem Fortran simulou com grande confiabilidade os resultados experimentais, sendo que este pode ser utilizado para outras simulações, utilizando alimentos líquidos e pastosos.

**Palavras-chave:** Difusividade térmica. Óleo de soja. Suco de laranja. Doce de uva. Simulação.

**ABSTRACT:** The knowledge of the coefficient of thermal diffusivity in foods is of fundamental importance for the industry, because without this thermo-physical property it would not be possible to calculate the heat transfer in substances. This study aimed to mount an experimental apparatus to determine the coefficient of thermal diffusion in food, as well as the construction of a computational procedure for simulating the process of heat transfer in cylindrical coordinates. The results showed a tendency that the higher the temperature the higher coefficient of thermal diffusivity. The program in Fortran language

with great reliability simulated the experimental results, and this can be used for other simulations using other liquids or soft foods.

**Keywords:** Thermal diffusivity. Soybean oil. Orange juice. Grape jam.S simulation.

## Introdução

A transferência de calor está envolvida no projeto de equipamentos de refrigeração, aquecimento e armazenamento de alimentos. Esta propriedade é essencial para a simulação durante o congelamento no interior de um alimento, bem como o aquecimento no interior do mesmo. O conhecimento deste coeficiente é de fundamental importância para a indústria, pois sem esta propriedade termofísica não seria possível calcular a transferência de calor nas substâncias.

A relação entre a habilidade de conduzir e armazenar energia de um material é conhecida como difusividade térmica (Equação 1). Materiais com alto valor de difusividade térmica respondem rapidamente a mudanças térmicas em seu ambiente, enquanto materiais de pequenos valores de  $\alpha$  respondem mais lentamente, demorando a alcançar um novo estado de equilíbrio (INCROPERA E WITT, 1996):

$$\dot{\alpha} = \frac{K}{\tilde{n} * c} \quad (1)$$

onde:

$\alpha$  - difusividade térmica ( $m^2/s$ );  $c$  - calor específico ( $J/Kg K$ );  $k$  - condutividade térmica ( $W/m K$ ) e  $\rho$  - densidade ( $Kg/m^3$ ).

A difusividade térmica é uma importante propriedade de transporte necessária na modelagem e nos cálculos de transferência de calor transiente em operações básicas de processamento de alimentos, como a secagem,

o processamento térmico, o resfriamento e o congelamento.

O emprego da Equação 1 para calcular o valor da difusividade térmica requer o conhecimento de valores determinados experimentalmente das três propriedades: a condutividade térmica, o calor específico e a densidade. Esta abordagem requer tempo considerável e instrumentação elaborada. A literatura especializada apresenta dados de propriedades térmicas de alimentos e estimativas razoáveis sobre a difusividade térmica. Outra abordagem é conduzir experimentos que permitam a medida direta desta propriedade (SINGH, 1982 apud QUEIROZ, 2001).

A difusividade térmica de um material é influenciada pelo conteúdo de água, pela temperatura, pela composição e pela porosidade. Como em muitos processos, o conteúdo de água e a temperatura de um produto podem variar, consideravelmente, o valor da difusividade térmica também pode variar. Além disso, muitos produtos alimentícios não são homogêneos e a difusividade térmica pode variar de um local para outro dentro do mesmo produto. Vários modelos empíricos úteis na predição da difusividade térmica de alimentos existem na literatura. A maioria desses modelos é específica ao produto estudado. Riedel (1969) apud Queiroz (2001) propuseram um modelo (Equação 2) que permite prever a difusividade térmica de uma grande variedade de produtos alimentícios em função da difusividade térmica da água e do conteúdo de água (base úmida) na temperatura desejada:

$$\dot{\alpha} = 0,088 * 10^{-6} + (\dot{\alpha}_a - 0,088 * 10^{-6}) * CA \quad (2)$$

onde:

$\alpha$  – difusividade térmica ( $m^2/s$ );  $\alpha_a$  – difusividade térmica da água ( $m^2/s$ ) e CA – conteúdo de água (base úmida (%)).

Martens (1980) apud Queiroz (2001) investigou a influência da água, da gordura, da proteína, do carboidrato e da temperatura na difusividade térmica de alimentos (Equação 3). Usando análises estatísticas, Martens (1980) verificou que a temperatura e o conteúdo de água são os fatores de maior influência sobre a difusividade térmica. A variação da fração sólida de gordura, da proteína e do carboidrato teve uma pequena influência sobre a difusividade térmica. Regressões múltiplas foram aplicadas em 246 valores publicados de difusividade térmica e a seguinte equação em função do conteúdo de água (base úmida) e da temperatura foi obtida:

$$\dot{\alpha} = [0,057363 * CA + 0,000288 * (T + 273)] * 10^{-6} \quad (3)$$

onde:

$\alpha$  – difusividade térmica ( $m^2/s$ ); CA – conteúdo de água (base úmida) (%) e T – temperatura ( $^{\circ}C$ ).

O erro padrão da estimativa do modelo apresentado por Martens (1980) apud Queiroz (2001) era de  $1,4 * 10^{-8} m^2/s$ . Os mesmos 246 valores foram ajustados no modelo de Riedel (1969) apud Queiroz (2001) e apresentaram um erro padrão da estimativa de  $1,7 * 10^{-8} m^2/s$ .

A difusividade térmica de alimentos porosos e de grãos não pode ser predita adequadamente com simples modelos aditivos baseados somente na composição química do produto alimentício, como por exemplo, o pão (MAGEE E BRANSBURG, 1995 apud QUEIROZ, 2001) e fatias de cebola secas (RAPUSAS E DRISCOLL, 1995 apud QUEIROZ, 2001). A difusividade térmica do pão aumentou significativamente com o

aumento da porosidade (ZANONI et al., 1995 apud QUEIROZ, 2001).

Singh (1982) apud Queiroz (2001) apresenta uma revisão de algumas importantes abordagens usada na determinação da difusividade térmica de alimentos. Entre os métodos experimentais, destacaram-se quatro técnicas mais utilizadas: estimação dos mínimos quadrados e uso de curvas de penetração de calor, uso de cartas de tempo-temperatura e uso de soluções analíticas.

A história da temperatura é registrada no centro de um objeto de geometria bem definida, como um cilindro infinito, uma placa ou uma esfera. Uma solução analítica apropriada de uma equação diferencial parcial (como a Equação 4 para uma placa infinita ou Equação 5 para um cilindro infinito) é programada num computador para prever a temperatura há vários tempos para alguns valores arbitrariamente selecionados da difusividade térmica. Usando técnicas iterativas, o valor da difusividade térmica pode ser alterado até que a diferença entre os valores da difusividade térmica predita e experimental se torne estatisticamente desprezível.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \dot{\alpha} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \dot{\alpha} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5)$$

Obviamente é essencial que a condição inicial e a condição de contorno usadas na solução da equação governante sejam estritamente seguidas no experimento real.

Para situações em que a amostra é exposta por um longo período de tempo, o primeiro termo da série de uma equação, como a 6, pode ser suficiente para estimar com boa precisão a difusividade térmica ou a temperatura do alimento em um tempo específico. A Equação 6 é uma combinação das Equações 4 (para placa infinita) e 5 (para cilindro infinito) pelo emprego da regra de Newman para obter os perfis da temperatura para um cilindro finito (CARSLAW E JAEGER, 1959; BALL E OLSON, 1957 apud QUEIROZ, 2001):

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \Big|_{\substack{\text{cilindro} \\ \text{finito}}} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \text{sen} i_m}{2i_m + \text{sen}(2i_m)} \cos(i_m z) \frac{2}{i_m J_1(i_n)} J_0\left(\frac{i_n r}{R}\right) \exp\left[-\left(\frac{4i_m^2}{l^2} + \frac{i_n^2}{R^2}\right) \dot{a} t\right] \quad (6)$$

onde:

T – temperatura (K); T<sub>0</sub>, T<sub>∞</sub> - temperatura inicial e ambiente (K); R – raio do cilindro (m); r – coordenada radial; z – distância entre o ponto de medida da temperatura e o centro geométrico do cilindro (m); l – comprimento do cilindro (m); μ<sub>n</sub> – raízes positivas da equação transcendental  $i_n \frac{J_1(i_n)}{J_0(i_n)} = B$ ; μ<sub>m</sub> -

raízes positivas da equação transcendental  $i_m \tan i_m = B$ ; μ<sub>n</sub> - raízes positivas da equação transcendental  $J_0(\mu_n) = 0$ ; J<sub>0</sub> e J<sub>1</sub>

– Funções de Bessel de ordem zero do primeiro tipo; α – difusividade térmica (m<sup>2</sup>/s) e t – tempo (s).

Os valores de μ<sub>m</sub>, μ<sub>n</sub>, J<sub>0</sub> e J<sub>1</sub> estão tabelados em Luikov (1966) apud Queiroz (2001).

Para um objeto cilíndrico finito, a solução expressa pela equação 6 pode ser simplificada para manter somente os termos com m=n=1; isto é, μ<sub>m</sub> = π/2, μ<sub>n</sub> = 2,4048 e J<sub>1</sub>(2,4048) = 0,5191. No centro do objeto cilíndrico, z = 0, r = 0 e J<sub>0</sub>(0) = 1,0. Então a aproximação

para longos tempos (Fo > 0,2, vide método 3) pode ser expressa como (Equação 7):

$$\frac{T_c - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \Big|_{\substack{\text{cilindro} \\ \text{finito}}} = 2,0396 \exp\left[-\left(\frac{\delta^2}{l^2} + \frac{(2,4048)^2}{R^2}\right) \dot{a} t\right] \quad (7)$$

onde:

T<sub>c</sub> – temperatura do centro da amostra (K).

Ball e Olson (1957) apud Queiroz (2001) plotaram curvas de calor obtidas, experimentalmente, em gráficos semi-log e indicaram a seguinte expressão (Equação 8):

$$t = f_h \log\left(j \frac{T_s - T_0}{T_s - T}\right) \quad (8)$$

onde:

$$j = \frac{T_\infty - T_{pi}}{T_\infty - T_0} \quad (9)$$

onde:

f<sub>h</sub> – parâmetro da taxa de aquecimento (s); j – fator de correção adimensional (Equação 9) e T<sub>pi</sub> – temperatura inicial extrapolada obtida para a curva de aquecimento linearizada (K)

Comparando as equações 7 e 8:

$$f_h = \frac{2,303}{\dot{a}} \left[ \frac{(2,4048)^2}{R^2} + \frac{\delta^2}{l^2} \right] \quad (10)$$

A equação 10 permite a determinação da difusividade térmica se, o parâmetro de

penetração de calor  $f_n$  é obtido, experimentalmente, do estudo de penetração de calor.

As soluções analíticas de equações diferenciais parciais governantes que descrevem a transferência de calor por condução, como a equação 4 para coordenadas cartesianas, foram reduzidas a cartas tempo-temperatura (SCHNEIDER, 1963 apud QUEIROZ, 2001). Estas cartas contêm números adimensionais como Números de Biot (Equação 11), Fourier (Equação 12) e temperatura adimensional (eq. 13). Se a temperatura adimensional for determinada, experimentalmente, para um local particular dentro do objeto a um tempo conhecido, as cartas tempo-temperatura podem ser usadas para estimar o número de Fourier. A difusividade térmica pode ser determinada do número de Fourier.

$$Bi = \frac{L / K}{l / h} = \frac{hL}{k} \quad (11)$$

onde:

Bi – número de Biot; L – dimensão característica (m); k – condutividade térmica (W/m K); h – coeficiente convectivo de transferência de calor (W/m<sup>2</sup> K) e L é o raio para um cilindro infinito e igual à metade da espessura de uma placa plana infinita. Para objetos de geometria finita, L é igual ao volume dividido pela área superficial.

$$Fo = \frac{\alpha * t}{(Lc)^2} \quad (12)$$

onde:

Fo – número de Fourier;  $\alpha$  – difusividade térmica (m<sup>2</sup>/s); t – tempo (s) e Lc – metade da menor dimensão do objeto, ou seja, para um cilindro longo Lc é igual ao raio (m).

Se o número de Fourier for maior que 0,2, as soluções das séries como a equação 6 convergem rapidamente depois de certo

tempo. Assim, a temperatura determinada, experimentalmente num local conhecido é usada no primeiro termo da série para calcular a difusividade térmica.

Como observado por Gaffney et al. (1980) apud Queiroz (2001), os métodos 1, 3 e 4, apresentados anteriormente requerem medidas exatas de temperatura inicial do produto, da temperatura num local conhecido do produto e da temperatura do ambiente ao redor do alimento. O método 2 tem a vantagem de usar a inclinação de um grande número de pontos ao invés de um único para a determinação da difusividade térmica. Por isso, o método das curvas de penetração de calor tem sido o mais usado.

Muitos pesquisadores aplicaram soluções para curvas de aquecimento ou resfriamento de corpos de diferentes geometrias sob várias condições e determinaram a difusividade térmica. Estas soluções encontram um amplo uso na indústria de enlatados. A base do método é a relação exponencial entre a mudança da temperatura do produto e o tempo após certo período de aquecimento, frequentemente chamado de período "lag". A inclinação resultante da reta do gráfico da temperatura, em função do tempo em escala semilogarítmica é usada para determinar a difusividade térmica (REIDY E RIPPEN, 1971).

Hurwicz e Tischer (1952) apud Queiroz (2001) usaram o caso de um recipiente cilíndrico, cuja temperatura da superfície foi mantida a temperatura da autoclave durante o aquecimento, e também a temperatura constante durante o resfriamento para determinar a difusividade térmica.

Dickerson (1965) apud Queiroz (2001) descreveu um equipamento que permite a determinação da difusividade térmica de alimentos. O método foi baseado na transferência de calor transiente em que as temperaturas da amostra aumentam linearmente com

o tempo. As amostras foram inseridas num cilindro de alumínio e imergidas num banho de água sob agitação e aquecimento a uma taxa constante. O cilindro foi considerado de comprimento infinito e o fluxo de calor axial desprezível. A Equação 13 foi a resultante:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = H = \dot{\alpha} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (13)$$

com as condições de contorno:

$$\text{para } t > 0, \quad \text{em } r = R \quad T = T_R = H * t$$

$$\text{em } r = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

resultando na seguinte Equação 14:

$$\dot{\alpha} = \frac{H * R^2}{4 * (T_R - T_c)} \quad (14)$$

onde:

T – temperatura (K);  $T_c$  – temperatura no centro do cilindro (K);  $T_R$  – temperatura na parede do cilindro (K); t – tempo (s); H – taxa de aquecimento constante (K/s);  $\alpha$  – difusividade térmica ( $m^2/s$ ); r – coordenada radial e R – raio do cilindro (m)

A taxa de aquecimento é obtida pela inclinação da curva das temperaturas do lado externo e do centro geométrico do cilindro, em função do tempo e a difusividade térmica é calculada pela Equação 14.

Dickerson (1965) comparou esta solução simples com a completa dada por Carslaw e Jaeger (1959) apud Queiroz (2001) e concluiu-se que a solução simples era aceitável para valores de  $Fo > 0,55$ .

Kopelman (1966) apud Queiroz (2001) simulou condições de contorno de coeficientes de transferência de calor convectivos, aproximando-os ao infinito (valores altos do número de Biot). Razões comprimento/diâmetro entre 3 e 6 simplificaram os casos para problemas unidimensionais. O autor destacou as vantagens de não precisar determinar a quantidade de calor, nem a localização exata do termopar ou o tempo da repentina mudança de temperatura.

Tellis-Romero et al. (1998) apud Queiroz (2001) utilizaram o método de Dickerson (1965) para a determinação da difusividade térmica do suco de laranja concentrado (64,2 °BRIX e 10% de polpa). A aparelhagem experimental consistia de uma célula cilíndrica ( $2,475 * 10^{-2} m$  de raio interno e  $2,485 * 10^{-1} m$  de comprimento) feita de bronze cromado com duas tampas de nylon. Dois termopares tipo T foram fixados no centro e na superfície externa da célula. A célula com o suco foi imersa num banho termostático bem agitado, aquecido a uma taxa constante e a evolução das temperaturas na parede e no centro da célula foi monitorada. A difusividade térmica do suco de laranja foi determinada conforme o método de Dickerson. Os autores também compararam o valor da difusividade térmica experimental do suco de laranja com a difusividade térmica calculada pela Equação 1. A difusividade térmica calculada foi menor (3,1 – 13,9%) do que a experimental.

## Objetivo

O presente trabalho teve por objetivo a montagem de um aparato experimental para determinação do coeficiente de difusão térmica de alimentos, bem como a construção de uma rotina computacional para simulação do processo de transferência de calor em coordenadas cilíndricas.

## Material e métodos

### Medidas Experimentais de Difusividade Térmica de Alimentos

O aparato experimental para medidas da difusividade térmica foi montado de acordo com o esquema apresentado por Dickerson (1965). Para montagem do aparato experimental foram utilizados: uma proveta de vidro pirex de 100 ml; um banho termostático da marca Nova Ética, modelo 521/3D com potência de 1400 W; dois termopares do tipo PT100 (um colocado no centro da proveta com auxílio de uma rolha e outro fixado à parede externa da mesma); um registrador eletrônico, modelo Field Logger da marca Novus Produtos Eletrônicos Ltda, conectado a um micro computador, que possuía um software específico (Field Logger V1.20), o qual acompanha o registrador eletrônico para a leitura dos dados enviados pelo registrador.

Foram realizadas as medidas experimentais da difusividade térmica para as seguintes substâncias: glicerina (para validação do método experimental), óleo de soja, doce de uva e suco de laranja. O procedimento para acompanhar o comportamento das substâncias foi sempre o mesmo: ligava-se o banho termostático e deixava-se estabilizar a temperatura desejada; enchia-se a proveta com cerca de 70% de seu volume com a substância a ser analisada; conectavam-se os termopares à placa e a placa ao computador; fixavam-se os termopares na proveta, tendo o cuidado para que os mesmos ficassem sempre nos seus respectivos lugares, centro e superfície externa da proveta; colocava-se a proveta dentro do banho e esperava-se estabilizar a temperatura interna com a externa; depois de verificado todos os possíveis interferentes que poderiam dar um falso resultado, elevava-se a temperatura até a desejada e iniciava-se o programa para a aquisição dos

dados. As aquisições dos dados foram realizadas em intervalos de três segundos.

O cálculo da difusividade térmica foi feito aplicando-se a equação 15 (OLIVEIRA et al., 2003);

### Simulação Numérica da Transferência de Calor em Coordenadas Cilíndricas

A determinação de  $\alpha$  pelo método de otimização consiste na resolução de um modelo matemático de transferência de calor condutivo, a partir do qual se obteve perfis transientes de temperatura, para um dado valor de  $\alpha$ . Utilizou-se esse modelo para determinar a evolução temporal da temperatura na posição central da amostra, para vários valores de  $\alpha$  arbitrados. Os resultados foram comparados com os valores experimentais obtidos, através da determinação da soma dos quadrados residuais. O valor de  $\alpha$  que minimiza essa soma é o valor assumido como sendo a difusividade térmica da amostra. O modelo condutivo unidimensional e as condições de contorno utilizadas para a resolução do modelo são dados pelas equações 1 e 2. A condição de contorno  $T = T(t)$  para  $r = R$ , é dada pelos resultados experimentais da evolução temporal da temperatura da superfície interna da amostra.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$\begin{cases} r = 0 \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \\ r = R \Rightarrow T = T(t) \end{cases} \quad (2)$$

Como a temperatura da superfície variou durante o experimento, a equação 16 foi resolvida numericamente, por diferenças fi-

nitás, método explícito, equação 3 (PRESS *et al.*, 1986 *apud* CARBONERA, 2003). O eixo r foi dividido em 20 intervalos. O incremento de tempo nas simulações foi de um segundo.

$$T_{(i,n+1)} = T_{(i,n)} + \frac{\dot{A}t}{A_r^2} \left[ T_{(i+1,n)} - 2T_{(i,n)} - T_{(i-1,n)} + \frac{1}{2i} T_{(i+1,n)} - T_{(i-1,n)} \right] \quad (3)$$

## Resultados e Discussão

Inicialmente foram realizadas medidas experimentais com a glicerina para validação do esquema experimental montado. Após terem sido feitas as aquisições dos dados, compararam-se os resultados obtidos com

os da literatura. A única substância que se encontrou dados na literatura foi a glicerina que possui um valor de  $\alpha$  igual a  $6,61 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{min}$  a  $26^\circ\text{C}$ . Para as demais substâncias utilizou-se a Equação 2 que calcula o  $\alpha$  a partir da taxa de aquecimento constante, raio do cilindro, temperatura do centro e temperatura da superfície externa (QUEIROZ, 2001).

Para esta comparação utilizou-se um programa em linguagem Fortran que a partir do coeficiente de difusividade térmica, raio do cilindro, temperatura inicial, tempo final de simulação e coeficiente angular da reta, simulou-se as curvas para temperatura da superfície e do centro do cilindro.

A seguir relacionam-se os valores de  $\alpha$

em  $\text{m}^2/\text{min}$  das diversas substâncias nas seguintes temperaturas:

**Tabela I** - Coeficiente de difusividade térmica nas temperaturas analisadas.

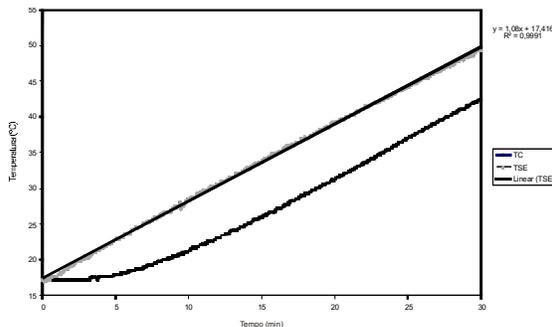
Substância	15°C	25°C	27°C	35°C	40°C	47°C	55°C
Óleo de Soja	-	$1,31 \cdot 10^{-5}$	-	-	$1,31 \cdot 10^{-5}$	-	$1,32 \cdot 10^{-5}$
<b>Suco de Laranja com 36 °Brix</b>	$1,19 \cdot 10^{-5}$	-	-	$1,30 \cdot 10^{-5}$	-	-	-
<b>Suco de Laranja com 49 °Brix</b>	$7,32 \cdot 10^{-6}$	-	-	$7,74 \cdot 10^{-6}$	-	-	-
<b>Suco de Laranja Conc. Com 63°Brix</b>	$6,65 \cdot 10^{-6}$	-	-	$6,75 \cdot 10^{-6}$	-	-	-
<b>Doce de Uva 45% de umidade</b>	-	-	$6,77 \cdot 10^{-6}$	-	-	$6,75 \cdot 10^{-6}$	-
<b>Doce de Uva 47,5% de umidade</b>	-	-	$6,48 \cdot 10^{-6}$	-	-	$7,25 \cdot 10^{-6}$	-
<b>Doce de Uva 41% de umidade</b>	-	-	$6,43 \cdot 10^{-6}$	-	-	$6,80 \cdot 10^{-6}$	-

## Glicerina

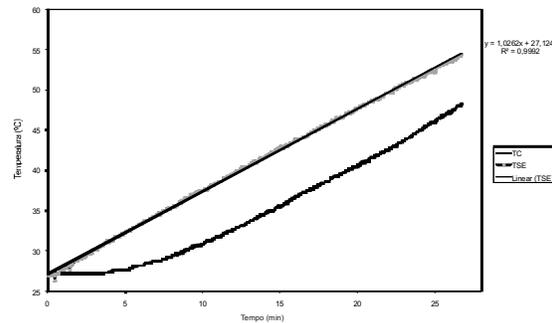
A glicerina era a substância utilizada para a validação do método utilizado, pois desta forma era possível verificar-se a confiabilidade do método experimental.

Abaixo estão apresentadas, na Figuras 1, as temperaturas do centro e da superfície externa da glicerina em relação ao tempo, com rampa de aquecimento iniciada em 17°C (a) e 27°C (b).

(a)



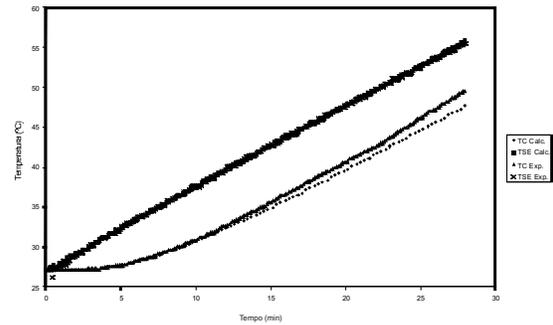
(b)



**Figura 1** - Temperatura do centro (TC) e temperatura da superfície externa (TSE) da glicerina em relação ao tempo, com rampa de aquecimento iniciada em 17°C e 27°C.

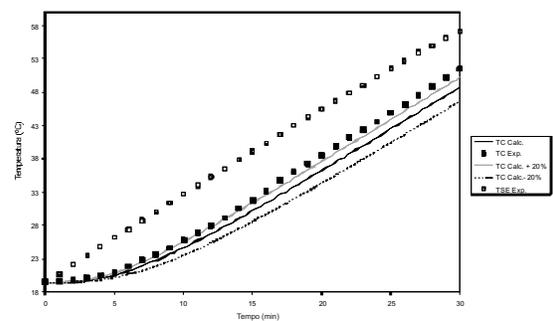
Na Figura 2 estão representadas comparações de resultados obtidos, experimentalmente, de temperaturas do centro e temperaturas da superfície externa da glicerina em relação ao tempo, com rampa de aquecimento iniciada em 27°C com os dados retirados da literatura

tura, o que mostra que o método empregado possui reprodutibilidade de resultados.



**Figura 2** - Comparação de temperatura do centro (TC) e temperatura da superfície externa (TSE) da glicerina em relação ao tempo, com rampa de aquecimento iniciada em 27°C com os dados retirados da literatura e experimentais.

Para verificar-se a sensibilidade do método utilizou-se o mesmo aparato experimental descrito anteriormente, com a exceção da proveta, a qual seu diâmetro era de 0,025m, tempo de análise era de um minuto e oscilou-se o coeficiente de difusividade térmica calculado com auxílio do programa em linguagem Fortran em 20% para mais e para menos, e com isso verificou-se que o método não é tão sensível, o que é comprovado na Figura 3.

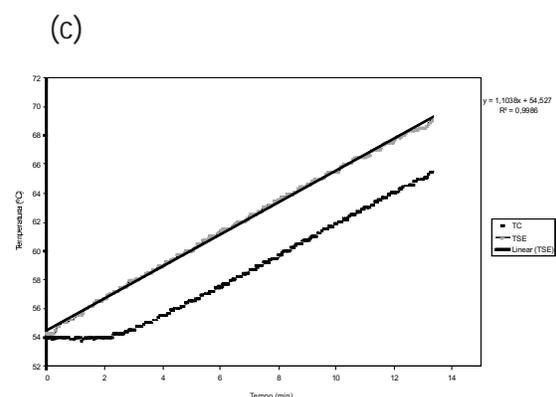
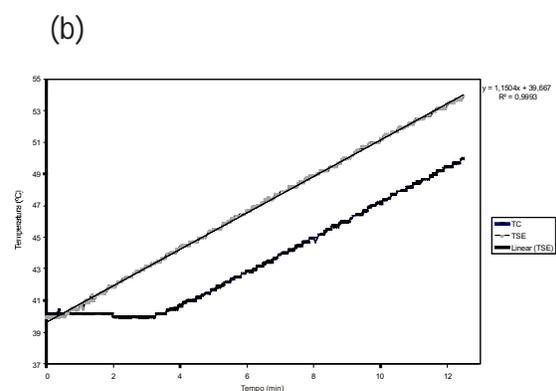
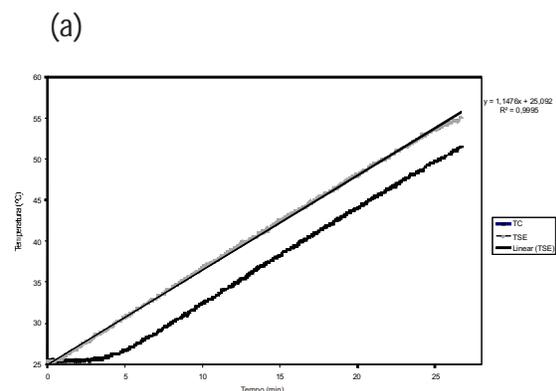


**Figura 3** - Teste de sensibilidade do método.

## Óleo de Soja

Na figura 4 estão representadas as temperaturas do centro e da superfície externa do óleo de soja em relação ao tempo, com rampa

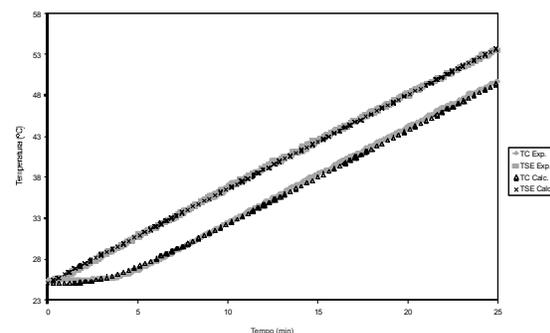
de aquecimento iniciada em 25°C (a), 40°C (b) e 55°C (c).



**Figura 4** - Temperatura do centro (TC) e temperatura da superfície externa (TSE) do óleo de soja em relação ao tempo, com rampa de aquecimento iniciada em 25°C (a), 40°C (b) e 55°C (c).

Na Figura 5 estão representadas comparações de resultados obtidos, experimentalmente, de temperaturas do centro e temperaturas da superfície externa do óleo de soja em relação ao tempo, com rampa de aquecimento

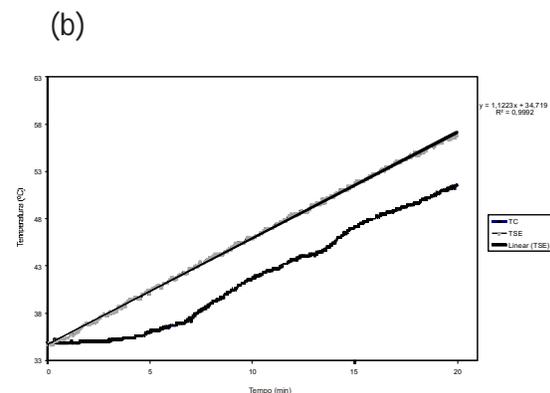
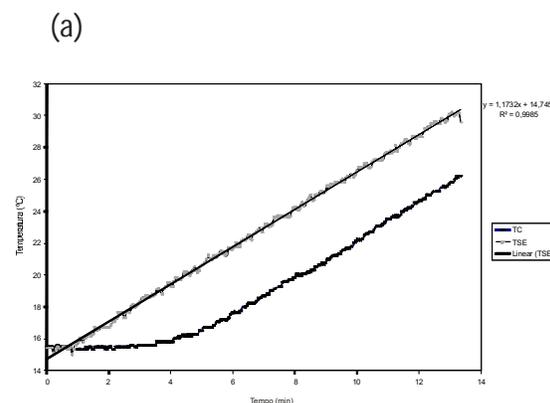
iniciada em 25°C com os dados retirados da literatura.

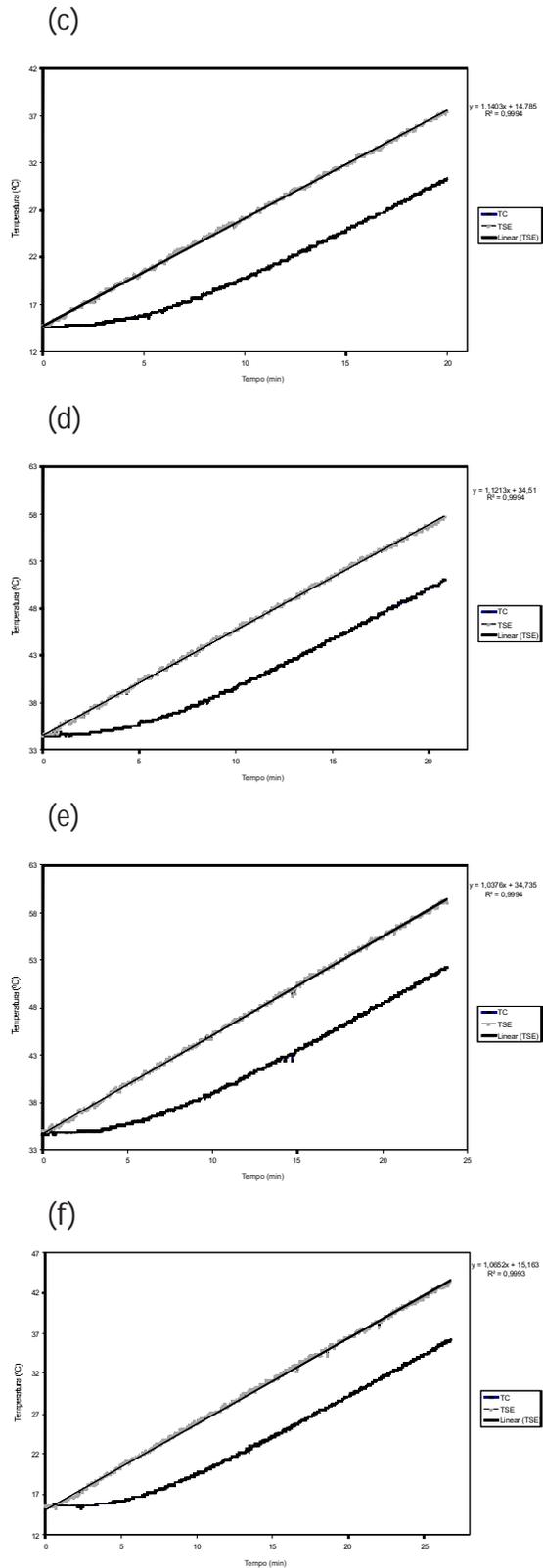


**Figura 5** - Comparação de temperatura do centro (TC) e temperatura da superfície externa (TSE) do óleo de soja em relação ao tempo, com rampa de aquecimento iniciada em 25°C, com os dados retirados da literatura e experimentais.

## Suco de Laranja

Na Figura 6 estão representadas as temperaturas do centro e da superfície externa do suco de laranja, com suas diferentes concentrações de sólidos solúveis totais em relação ao tempo.

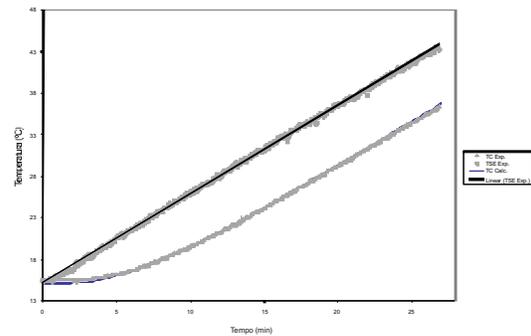




**Figura 6** - Temperatura do centro (TC) e temperatura da superfície externa (TSE) do suco de laranja com 36 °Brix, em relação ao tempo, com rampa de aquecimento iniciada

em 15°C (a) e 35°C (b); 49 °Brix 15°C (c) e 35°C (d); 63 °Brix 15°C (e) e 35°C (f).

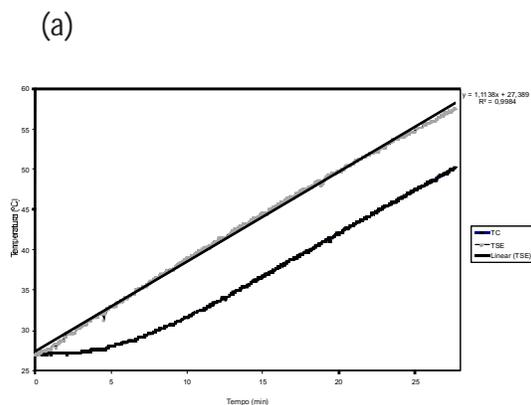
Na Figura 7 estão representadas comparações de resultados obtidos, experimentalmente, de temperaturas do centro e temperaturas da superfície externa do suco de laranja em relação ao tempo, com rampa de aquecimento iniciada em 15°C com os dados retirados da literatura.

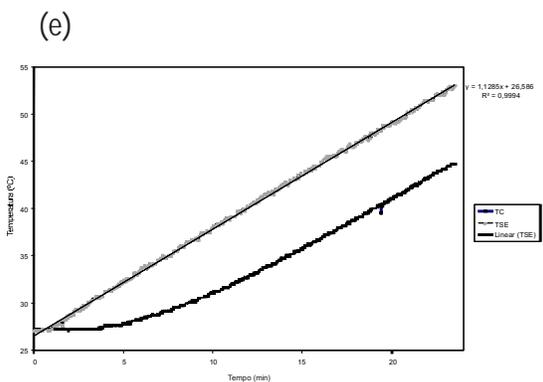
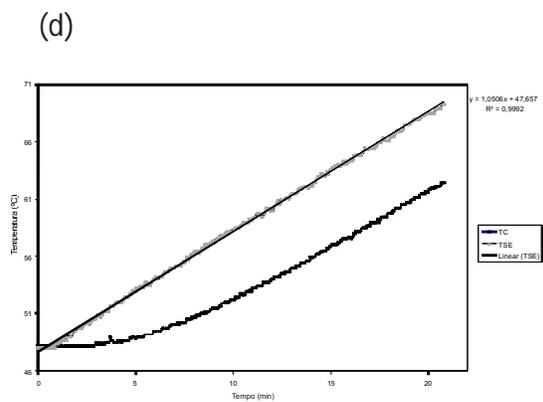
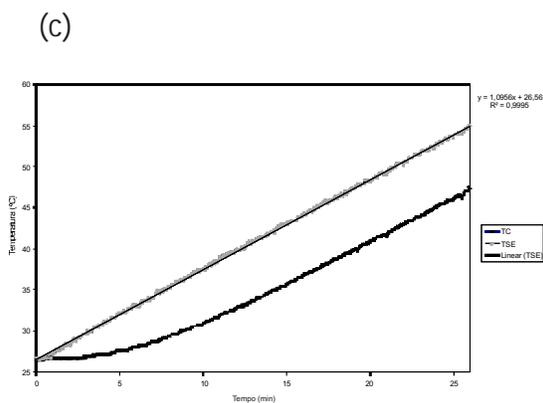
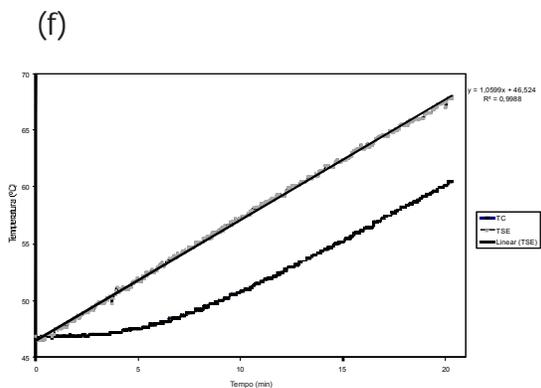
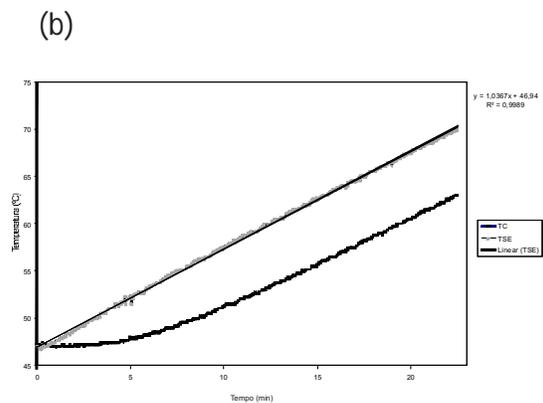


**Figura 7** - Comparação de temperatura do centro (TC) e temperatura da superfície externa (TSE) do suco de laranja concentrado com 63 °Brix em relação ao tempo com rampa de aquecimento iniciada em 15°C, com os dados retirados da literatura e experimentais.

## Doce de Uva

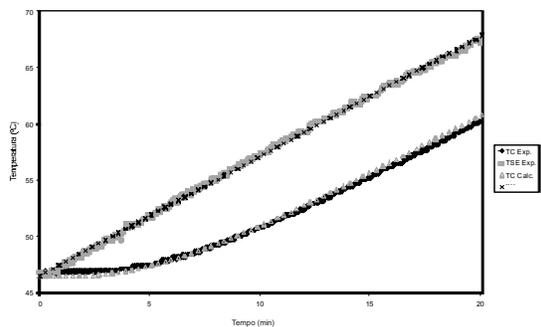
Na Figura 8 estão representadas as temperaturas do centro e da superfície externa do doce de uva com suas diferentes concentrações de matéria seca em relação ao tempo.





**Figura 8** - Temperatura do centro (TC) e temperatura da superfície externa (TSE) do doce de uva em relação ao tempo para diluição 1, com rampa de aquecimento iniciada em 27°C (a) e 47°C (b); diluição 2, 27°C (c) e 47°C (d) e concentrado, 27°C (e) e 47°C (f).

Na Figura 9 estão representadas comparações de resultados obtidos, experimentalmente, de temperaturas do centro e temperaturas da superfície externa do doce de uva em relação ao tempo com rampa de aquecimento iniciada em 47°C com os dados retirados da literatura.



**Figura 9** - Comparação de temperatura do centro (TC) e temperatura da superfície externa (TSE) do doce de uva concentrado em relação ao tempo, com rampa de aquecimento iniciada em 47°C, com os dados retirados da literatura e experimentais.

Obs.: Diluição 1 = 44,97% de umidade  
 Diluição 2 = 47,44% de umidade  
 Concentrado = 40,88% de umidade

Silva (2011) estimou a difusividade e a condutividade térmica de uma amostra de geleia de acerola. Resultados de difusividade térmica entre 7,25 e 8,86 m<sup>2</sup>/min foram obtidos neste estudo. Tais resultados são semelhantes aos obtidos neste trabalho, corroborando a confiabilidade dos mesmos.

## Conclusões

O método utilizado mostrou-se confiável após vários testes, podendo ser empregado para calcular o coeficiente de difusividade térmica para qualquer substância líquida ou

pastosa. Os resultados obtidos mostraram uma tendência de que quanto maior a temperatura maior será o coeficiente de difusividade térmica. O programa em linguagem Fortran simulou, com grande confiabilidade, os resultados experimentais, sendo que este pode ser utilizado para outras simulações com alimentos líquidos ou pastosos.

## AUTORES

Marcus Vinícius Tres - URI - Campus de Erechim. Professor do Curso de Engenharia de Alimentos. Mestre em Engenharia de Alimentos pela URI – Campus de Erechim. Departamento de Engenharia de Alimentos, URI – Campus de Erechim. E-mail: marcustres@yahoo.com.br

Gustavo Rodrigues Borges - Universidade Tiradentes. Discente do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos. Mestre em Engenharia de Processos pela Universidade Tiradentes, Instituto de Tecnologia e Pesquisa – ITP. E-mail: gursborges@yahoo.com.br

Marcos Lúcio Corazza - Universidade Federal do Paraná. Professor Adjunto. Doutor em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico (DTQ/ST/UFPR). E-mail: corazza@ufpr.br

Claudio Augusto Zakrzewski - URI – Campus de Erechim. Professor do Curso de Engenharia de Alimentos. Mestre em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. E-mail: caz@uri.com.br

## REFERÊNCIAS

CARBONERA, L.; CARCIOFI, B. M.; HUBER, E.; LAURINDO, J. B. **Determinação Experimental da Difusividade Térmica de uma Massa de Tomate Comercial**. Brazilian Journal of Food Technology, v.6, n.2, p. 285-290, jul./dez., 2003.

DICKERSON, R. W. **An apparatus for measurement of thermal diffusivity of foods**. Food Technology, v.22, p.37-52, 1965.

INCROPERA, F. P.; WITT D. P. **Introduction to Heat Transfer**. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1996.

OLIVEIRA, G. S.; LOPES FILHO, J. F.; THOMÉO, J. C. **Difusividade Térmica do Presunto Cozido e seus Constituintes Sólidos Principais**. Brazilian Journal of Food Technology, v.6, n.2, p.137-142, jul./dez., 2003.

QUEIROZ, G. M. **Determinação de Propriedades Termofísicas do Pão Tipo Francês Durante o Processamento de Assamento.** São Paulo, Universidade de São Paulo, 2001.

SILVA, M. A. C. **Aplicação do Método Flash para a Estimação da Difusividade Térmica da Geleia de Acerola.** 2011. 120 f. Tese (Doutorado) UFPB/CT, João Pessoa, 2011.