

DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO EXTRATO DE TOMATE PARA DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS

Eng.^a Renata Paiva e Prof. Dr. Paulo Cezar Razuk

UNESP - Avenida Eng. Luiz Edmundo C. Coube 14-01 CEP: 17033-360 Bauru - SP
mntpaiva@hotmail.com/ pcracruz@feb.unesp.br

RESUMO

O objetivo do trabalho foi determinar experimentalmente a difusividade térmica através de um aparato simples e da equação proposta por Dickerson (1965). Os valores obtidos foram comparados com as equações desenvolvidas por Riedel (1969), Martens, citado por Sigh (1982) e Choi e Okos (1983) e com valores oferecidos pela literatura. Utilizou-se extrato de tomate de duas marcas disponíveis no mercado que apresentam teores diferentes de sólidos: o produto 1 com 16,8° Brix e o produto 2 com 17,6° Brix. Pode-se concluir que o método proposto por Dickerson (1965) oferece resultados confiáveis. Os valores de difusividade obtidos através da temperatura e dos teores de água e sólidos correspondem aos determinados e àqueles apresentados na literatura.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação do calor como método de conservação necessita de um rigoroso controle, visto que a temperatura e o tempo de exposição ao calor, além de eliminar os microrganismos indesejáveis que se encontram no alimento, podem alterar, também, o valor nutritivo e modificar sua natureza histológica, física e química reduzindo suas qualidades organolépticas e nutricionais tornando-o inadequado ao consumo humano.

Assim para a obtenção de alimentos adequados dois aspectos precisam ser considerados: a termobacteriologia, que engloba os conceitos de degradação térmica dos microrganismos e nutrientes e a transferência de calor, responsável pelo entendimento dos fatores que governam o aquecimento do produto durante o processo a que será submetido.

O uso das equações de transferência de calor é condicionado à disponibilidade de dados sobre as características intrínsecas dos produtos envolvidos, em particular às propriedades termofísicas, difusividade térmica, calor específico, massa específica e condutividade térmica.

Neste trabalho é determinada a difusividade do extrato de tomate, já que nos últimos dez anos vem ocorrendo uma grande evolução neste segmento. A agroindústria brasileira tem capacidade instalada para processar 17080 toneladas diárias em 26 unidades.

Pela legislação brasileira de 1978, o extrato de tomate é definido como todo produto concentrado que tenha de 18 a 23 °Brix. Este produto assumiu um papel importante no mercado dos restaurantes industriais, na preparação de molhos, por ter preço acessível.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Lewis (1993), a difusividade térmica é definida como a relação entre a condutividade térmica e o calor específico do produto multiplicado por sua massa específica. Em termos físicos, dá uma medida de como a temperatura pode variar quando um material é submetido a uma situação de aquecimento ou resfriamento. A difusividade térmica, descrita ainda como a razão entre a habilidade em transferir calor e a capacidade de armazená-lo em situações em que a transferência de calor ocorre em regime transiente, é a propriedade térmica mais utilizada e importante na

modelagem de operações básicas de processamento de alimentos, como secagem, aquecimento, resfriamento e congelamento.

Incropera (1996) menciona que materiais com alto valor de difusividade respondem rapidamente a mudanças térmicas em seu ambiente, enquanto materiais que apresentam baixo valores de difusividade respondem mais lentamente, demorando para alcançar um novo estado de equilíbrio.

A difusividade térmica de um produto é influenciada pelo conteúdo de água, pela temperatura, composição e porosidade. Como em muitos processos, o conteúdo de água e a temperatura podem variar consideravelmente, o valor da difusividade térmica também varia. Além disso, como muitos alimentos não são homogêneos, a difusividade térmica apresenta diferenças de um local para outro dentro do mesmo produto.

Para calcular o valor da difusividade térmica pode-se determinar experimentalmente as três propriedades que fazem parte da equação (1), a condutividade térmica (k), o calor específico (c_p) e a densidade (ρ). Ou, como citado por Singh (1982), conduzir experimentos que permitam a medida direta desta propriedade. Vários modelos empíricos úteis na predição da difusividade térmica de alimentos existem na literatura.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (1)$$

Dickerson (1965) descreveu o dispositivo da figura 1 que permite a determinação da difusividade térmica dos alimentos. As amostras são inseridas num cilindro de bronze cromado e imerso num banho de água sob agitação e aquecido a uma taxa constante. O cilindro é considerado de comprimento infinito e o fluxo de calor axial desprezível, desta forma a transferência de calor transiente é dada pela equação (2).

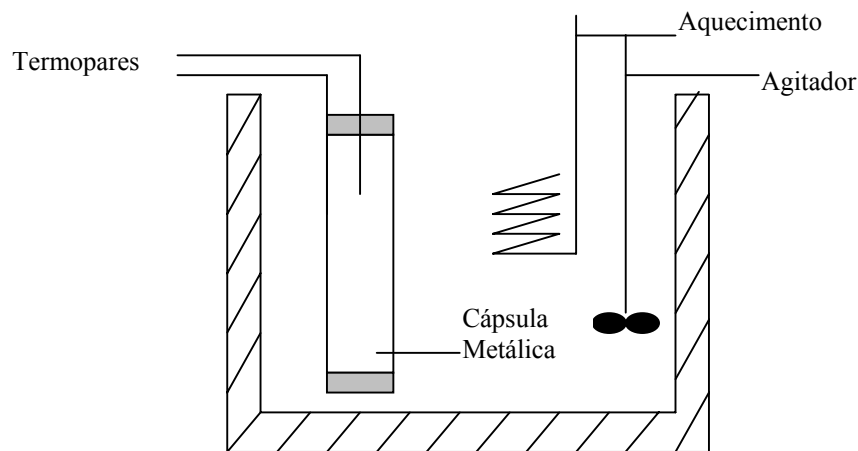


Figura 1: Esquema do aparato utilizado por Dickerson (1965).

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

$$\text{Para as condições de contorno: } r = R \quad T = T_R \quad r = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

Resulta a equação (3):

$$\alpha = \frac{A \cdot R^2}{4 \cdot (T_R - T_C)} \quad (3)$$

Onde: T_C : temperatura no centro do cilindro; T_R : temperatura na parede do cilindro;
 A : velocidade de aquecimento; α : difusividade térmica;
 r : coordenada radial; R : raio do cilindro e,
 t : tempo.

O valor da velocidade de aquecimento (A) é o coeficiente angular da reta da obtida através da regressão linear quando a temperatura é colocada em função do tempo, a partir dos dados coletados.

Dickerson (1965) comparou esta solução simples com a completa dada por Carslaw e Jaeger (1959) e concluiu que a solução é aceitável quando o número de Fourier ($F_o = \frac{\alpha t}{l^2}$) for superior a 0,55.

Riedel (1969) apud Tavman et al. (1997) desenvolveu a equação (4) que permite determinar 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:

$$\alpha = 0,088.10^{-6} + (\alpha_w - 0,088.10^{-6}).X_w \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (4)$$

Sendo: α_w : difusividade térmica da água (m^2/s) e X_w : conteúdo de água (%)

Martens (1980) apud Singh (1982) investigou a influência da água, da gordura, da proteína, do carboidrato e da temperatura na difusividade térmica de alimentos. Usando análises estatísticas, o autor verificou que a temperatura e o conteúdo de água são os fatores de maior influência. Variações nas frações sólidas de gordura, proteína e carboidrato pouco influem na difusividade. Regressões múltiplas foram aplicadas em 246 valores publicados de difusividade térmica e a equação (5) em função do conteúdo de água e da temperatura (T em °C) foi obtida:

$$\alpha = [0,057363.X_w + 0,000288.(T + 273)].10^{-6} \quad (5)$$

Choi e Okos (1983) determinaram as propriedades térmicas do suco de tomate e desenvolveram as expressões (6), (7) e (8) para a calculo da difusividade térmica, sendo X_s , o percentual de sólidos.

$$\alpha = \alpha_w X_w + \alpha_s X_s \quad (6)$$

$$\alpha_w = [0,1363 + 0,0004875T - 0,000001632T^2]10^{-6} \quad (7)$$

$$\alpha_s = [0,009508 + 0,00234T + 0,000001761T^2]10^{-6} \quad (8)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a determinação da difusividade térmica do extrato de tomate foi utilizados um aparato composto por uma estufa, um cronômetro Thermometer, um Fluke 52 K/J com capacidade para duas leituras de temperaturas, 2 termopares devidamente calibrados, um cilindro de alumínio, com 30mm de diâmetro, 100mm de altura e 1,5mm de espessura e extrato de tomate de duas marcas existentes no mercado, produto 1 (16,8° Brix) e produto 2 (17,6° Brix).

A difusividade térmica das amostras dos produtos foi determinada com o auxílio de um recipiente cilíndrico de alumínio com tampas de PVC rígido com dois termopares conectados: um na superfície interna e outro no centro da amostra.

O cilindro ficou suspenso através de um arame para evitar a condução de calor a partir da base de apoio. As faces inferior e superior do recipiente foram isoladas termicamente, para se garantir uma transferência de calor unidimensional (somente radial).

Para cada produto realizaram-se três ensaios. No instante em que o termostato da estufa era ligado, iniciavam-se as leituras das temperaturas do produto no centro (T_C) e na superfície (T_R), em intervalos de 2 minutos, até o termopar no interior do cilindro indicar 90°C .

Além dos valores obtidos experimentalmente, através da equação (3), a difusividade térmica foi calculada utilizando-se as equações desenvolvidas por Riedel (1969), Martens, citado por Singh (1982) e Choi e Okos (1983).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 e a figura 3 apresentam a evolução das temperaturas da superfície e do centro da amostra com o tempo obtida no ensaio 2 com o produto 1.

Tabela 1 – Evolução das temperaturas com o tempo – ensaio 2, produto 1.

Tempo (min)	Temperatura da parede interna ($^\circ\text{C}$)	Temperatura no centro do produto ($^\circ\text{C}$)
6	26,1	23,6
8	28,5	24,7
10	31,6	26,1
12	34,8	28,1
14	38,7	30,6
16	43,1	33,5
18	47,6	37,0
20	52,2	40,8
22	57,4	45,0
24	62,7	49,6
26	68,2	54,5
28	73,8	59,7
30	79,9	64,8
32	85,6	70,2
34	91,6	75,7
36	97,4	81,7
38	102,5	87,5
40	107,9	92,6

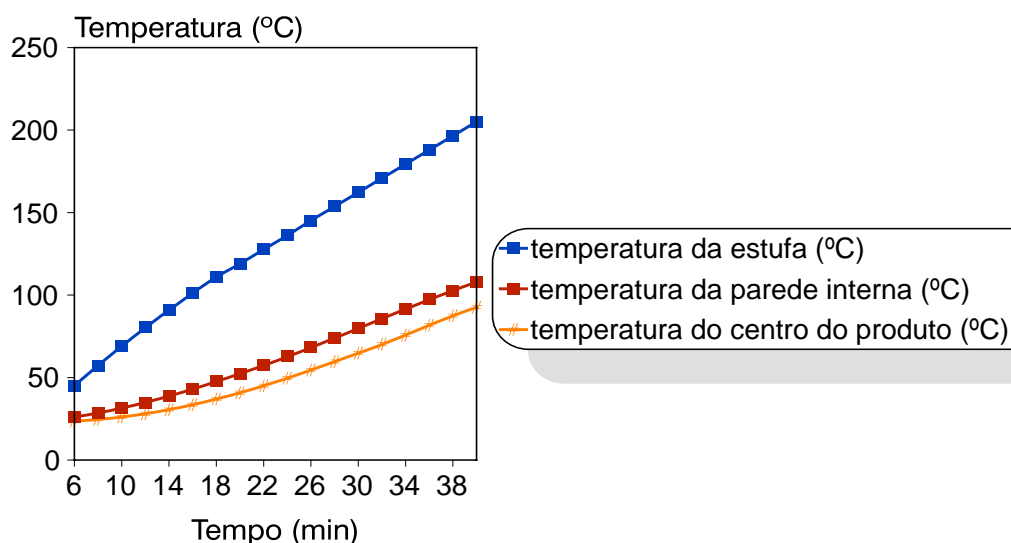


Figura 3 - Evolução das temperaturas com o tempo – ensaio 2, produto 1.

Na figura 4 tem-se a regressão linear da variação da temperatura no centro do produto 1, obtida no ensaio 2, com o tempo.

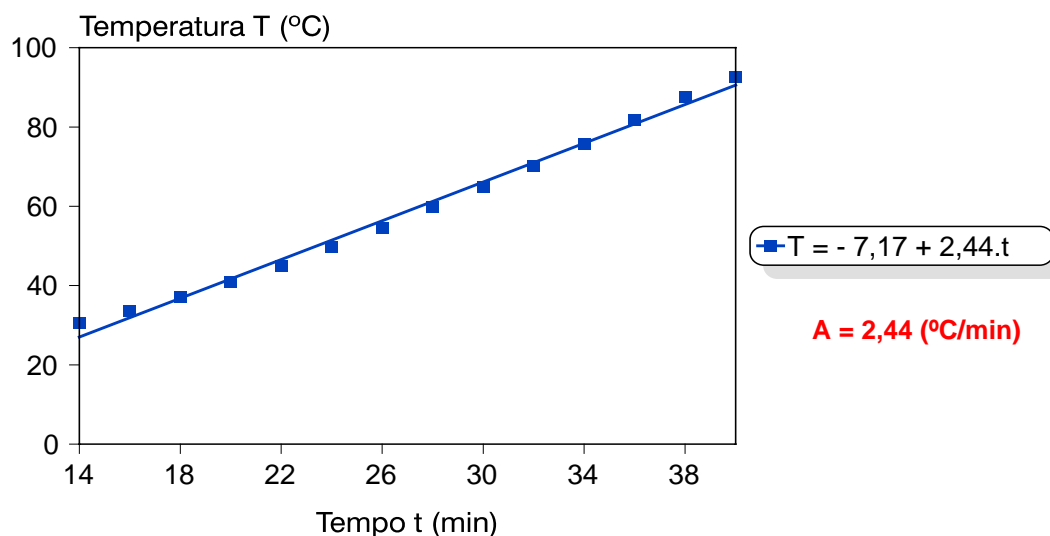


Figura 4 – Regressão linear da temperatura no centro do produto com o tempo ($R^2 = 99,3\%$).

A tabela 2 traz o comportamento da difusividade térmica com a temperatura, desprezando-se os minutos iniciais em que a taxa de aquecimento não era constante.

Tabela 2. Evolução da difusividade térmica em relação à temperatura – ensaio 2, produto 1.

Tempo (min.)	$T_R - T_c$ (°C)	Difusividade térmica ($\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)
14	8,1	2,82
16	9,6	2,38
18	10,6	2,16
20	11,4	2,01
22	12,4	1,84
24	13,1	1,75
26	13,7	1,67
28	14,1	1,62
30	15,1	1,51
32	15,4	1,49
34	15,9	1,44
36	15,7	1,46
38	18,0	1,27
40	15,3	1,50
Média		1.78

Como indica a tabela 2, a difusividade térmica do extrato de tomate se altera com a temperatura, mas, na faixa entre 25 e 100°C, o valor médio pode ser utilizado nos cálculos.

A tabela 3 mostra os valores médios obtidos para a difusividade térmica para todos os ensaios realizados. A comparação entre as médias, utilizando o teste estatístico Student's t-test ou o Teste t, não mostrou, com 95% de confiança, diferença entre os valores obtidos, portanto, os teores de sólidos dos produtos 1 e 2 não influenciaram de forma significativa a difusividade térmica.

Tabela 3: Difusividade térmica do extrato de tomate.

Produto	A (°C/min)	Valor médio da
		difusividade térmica (m ² /s)
1	2.6	1,76.10 ⁻⁷
2	2.8	1,69.10 ⁻⁷

Estes valores de difusividade térmica determinados experimentalmente encontram-se de conformidade com aqueles apresentados por autores como Bhowmik e Hayakawa (1979), que trabalharam com polpas de maçã e tomate e cujos resultados variaram de 1.10^{-7} a 2.10^{-7} m²/s.

Na tabela 4 são apresentados os valores de difusividade térmica obtidos a partir de equações da literatura, calculados considerando-se a difusividade da água igual a $1,48.10^{-7}$ m²/s, temperatura de 30°C e umidades de 84,42 e 82,79 para as amostras do produto 1 e 2, respectivamente. Comparando os valores da difusividade térmica obtidos pelas equações de Riedel (1969), Choi e Okos (1983) e Martens, citado por Singh (1982) com os dados experimentais, verifica-se que os resultados preditos pelas equações apresentam valores inferiores, exceto para a difusividade térmica calculada pela equação de Riedel(1969).

Tabela 4. Valores da difusividade térmica preditos, experimentais e erros.

Equação	Difusividade Térmica (x 10 ⁻⁷ m ² /s)					
	Produto 1			Produto 2		
	α_{predito}	α_{exp}	ϵ_p (%)	α_{predito}	α_{exp}	ϵ_p (%)
Alimentos em geral (RIEDEL, 1969)	1,79	1,76	1,70	1,8	1,69	6,51
Alimentos em geral (MARTENS, citado por SINGH, 1982)	1,48	1,76	15,91	1,46	1,69	13,61
Suco de tomate (CHOI e OKOS, 1983)	1,42	1,76	19,32	1,41	1,69	14,29

Utilizando as equações (4), (5) e (6), verifica-se que os erros, em relação a media obtida experimentalmente, variaram de 1,70 a 19,32%. O erro para o produto 1 de maior Brix, resultante da utilização da equação de Riedel (1969) foi menor do que os demais. O maior erro ocorreu, também para o produto 1, com a utilização da equação Choi e Okos (1983).

5. CONCLUSÕES

As equações apresentadas por Riedel (1969), Choi e Okos (1983) e Martens, citado por Singh (1982) apresentaram bons resultados, permitindo que, uma vez conhecida a composição do produto, possa-se estimar o valor da difusividade térmica sem necessidade de medi-la experimentalmente.

A equação proposta por Dickerson (1965) pode ser utilizada por sua simplicidade e por indicar valores compatíveis com aqueles mencionados na literatura.

Para teor de sólidos entre 16 e 18 °Brix e operações na faixa de temperatura entre 25 e 100°C, os resultados obtidos não apresentaram diferença considerada significativa. Assim, o valor médio encontrado para a difusividade térmica ($1,72.10^{-7}$ m²/s) pode ser empregado nos cálculos para o extrato de tomate.

6. REFERÊNCIAS

- BHOWMIK, S. R. and HAYAKAWA, K. I. A new method for determining the apparent thermal diffusivity of thermally conductive food. *Journal of Food Science*, Chicago, v. 44, n. 2, p. 469-474, 1979.
- CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. *Conduction of Heat in Solids*. London, Oxford University Press, (1959).
- CHOI, Y.; OKOS, M. R. The thermal properties of tomato juice concentrates. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v. 26, n. 1, p. 305-311, (1983).
- DICKERSON, R. W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. *Food Technology*, Chicago, v. 19, n. 5, p. 198-204, (1965).
- RIEDEL, L. Measurements of thermal diffusivity of foodstuffs rich in water. *Kaltetechnik-Klimatisierung*, v. 21, n.11, p. 315, (1969).
- RINALDI, M.; TRIFIRO, A.; RAINERI, S.; BOZZOLI, F.; MASSINI, R. An experimental approach for the estimation of apparent thermal diffusivity in frozen food. *Università degli Studi di Parma – Dipartimento di Ingegneria Industriale* (2005).
- SINGH, P. Thermal diffusivity in food processing. *Food Technology*, Chicago, v.36, n. 2, p. 87-91, (1982).
- TAVMAN, S.; TAVMAN, I. H.; EVCIN, S. Measurement of thermal diffusivity of granular food materials. *International Communications in heat and Mass Transfer*, v. 24, p. 945-953, (1997).