

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE SOLUÇÕES MODELO SIMILARES A SUCOS - PARTE I¹

Silvia Cristina Sobottka Rolim de MOURA^{2,*}, Vitor Correia Lima FRANÇA³,

Áurea Maria Castelo Branco LEAL³

RESUMO

Propriedades termofísicas, difusividade térmica e calor específico, de soluções modelo similares a sucos, foram determinadas experimentalmente e ajustadas a modelos matemáticos (STATISTICA 6.0), em função da sua composição química. Para definição das soluções modelo foi realizado um planejamento estrela mantendo-se fixa a quantidade de ácido (1,5%) e variando-se a água (82-98,5%), o carboidrato (0-15%) e a gordura (0-1,5%). A determinação do calor específico foi realizada através do método de Hwang & Hayakawa e a difusividade térmica com base no método de Dickerson. Os resultados de cada propriedade foram analisados através de superfícies de respostas. Foram encontrados resultados significativos para as propriedades, mostrando que os modelos encontrados representam significativamente as mudanças das propriedades térmicas dos sucos, com alterações na composição e na temperatura.

Palavras-chave: difusividade térmica; calor específico; soluções modelo; sucos.

SUMMARY

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MODEL SOLUTIONS SIMILAR TO JUICE – PART I. Thermophysical properties, thermal diffusivity and specific heat of model solutions similar to juices were experimentally determined and the values obtained compared to those predicted by mathematical models (STATISTIC 6.0) and to values mentioned in the literature, according to the chemical composition. It was adopted a star planning to define the composition of the model solutions fixing the acid amount in 1.5% and varying water (82-98.5%), carbohydrate (0-15%) and fat (0-1.5%). The specific heat was determined by Hwang & Hayakawa method and the thermal diffusivity was determined by Dickerson method. The results of each property were analysed by the response surface method. The results were significative, indicating that the models represented considerably the changes of thermal properties of juices according to their composition and temperature variations.

Keywords: thermal diffusivity; specific heat; model solutions; juices.

1 - INTRODUÇÃO

O dimensionamento dos equipamentos utilizados no processamento de alimentos, principalmente os pasteurizadores e outros que requerem bombeamento do produto, exigem dados precisos das propriedades térmicas dos produtos, tais como condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico, e de como essas propriedades se comportam durante o processo, em função da temperatura.

A necessidade de se conhecer as propriedades térmicas com precisão tem levado ao estudo da influência da composição e da temperatura nestas propriedades.

POLLEY *et al.* [10], publicaram uma coleção de tabelas de propriedades térmicas em diversos alimentos, entre eles carnes, frutas, legumes, leite e cereais. São encontradas nestas tabelas algumas propriedades térmicas de sucos de maçã, cereja, uva, laranja e pêra porém, estão incompletas.

Um trabalho mais específico de determinação de propriedades termofísicas foi desenvolvido para suco clarificado de maçã, a diversas temperaturas e concentrações [3]. O trabalho apresenta resultados experimentais de determinações de densidade, viscosidade, calor espe-

cífico e condutividade térmica. Os resultados mostram a grande influência da concentração e temperatura na determinação destas propriedades e modela os dados em função destas variáveis.

Valores experimentais de difusividade térmica de sucos de maçã, cereja, uva, laranja e tomate são encontrados em GEORGE [5]. Mais uma vez são dados, na maioria, para sucos de frutas subtropicais.

Um trabalho mais recente de predição de propriedades termofísicas, aplicada a sucos clarificados, em função da concentração e da temperatura, pode ser encontrado em PEACOCK [9]. O artigo apresenta modelos matemáticos de predição da elevação do ponto de ebulição, densidade, entalpia, calor específico, solubilidade da sacarose, tensão superficial, condutividade térmica e viscosidade. O estudo mostra que existe alta correlação entre as propriedades termofísicas e a concentração e temperatura de produtos fluidos.

Outro trabalho, recentemente apresentado por TELIS-ROMERO *et al.* [13], obteve resultados significativos na determinação das propriedades termofísicas densidade, difusividade térmica, calor específico e condutividade térmica para suco de laranja não clarificado brasileiro. Para a determinação da difusividade térmica os autores utilizaram o método de DICKERSON [4] e obteve boas correlações matemáticas, com $R^2 > 0,96$ e $p < 0,001$, além de erro nas correlações matemáticas menores que os erros experimentais.

É importante destacar o aumento da demanda dos produtos alimentícios no país, trazendo como consequência a exigência de modernização, adequação tecnológica

¹ Recebido para publicação em 10/05/2001. Aceito para publicação em 14/05/2001.

² Centro de Tecnologia de Hortifrúctícolas – FRUTHOTEC/Instituto de Tecnologia de Alimentos – ITAL, Avenida Brasil, 2880, Campinas – SP, 13073-001, Brasil, email: smoura@ital.org.br

³ Bolsistas de Iniciação Científica CNPq – PIBIC.

* A quem a correspondência deve ser enviada.

e maior qualidade para as indústrias. O cumprimento dessas exigências só acontecerá com maiores informações científicas sobre o processamento de alimentos, o que passa pelo conhecimento das propriedades físicas para os cálculos dos processos. Hoje, os inúmeros dados de tais propriedades, encontrados na literatura para produtos similares, não são adequados, na maioria das vezes, para os produtos nacionais. Propriedades termofísicas de grande parte dos produtos brasileiros nem são encontradas na literatura.

A falta de conhecimento de algumas dessas características, e de como elas se comportam diante de variações de temperatura, pode levar a um processamento inadequado do produto, gerando prejuízos que poderiam ser facilmente evitados. A indústria de sucos tropicais no Brasil sofre com a falta de dados que sirvam de base para estudos de dimensionamento de processamentos térmicos. Assim, o objetivo do presente trabalho foi determinar experimentalmente o calor específico e a difusividade térmica, de soluções modelo similares a sucos, na faixa de temperatura de 10 a 80°C, estudando a influência da composição química e da temperatura nas propriedades físicas dos produtos. Além disto, foi feita uma comparação entre os dados experimentais e valores calculados, obtidos de modelos matemáticos encontrados na literatura.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Materiais

As soluções modelo foram preparadas seguindo uma distribuição de componentes dada por um tratamento estatístico [8], tentando-se simular um suco de fruta. Foram variados os teores de água (82 a 98,5%), carboidrato (0 a 15%), lipídeos (0 a 1,77%), mantendo fixa a quantidade de ácido cítrico em 1,5%. Para a elaboração das soluções foram utilizados açúcar refinado e óleo de milho para compor as porções de carboidrato e lipídeo, respectivamente. Para estabilizar a emulsão, utilizou-se goma xantana (NutraSweet) a 0,2%. No método de determinação de difusividade térmica, utilizou-se ainda pectina cítrica BTM (BRASPECTINA) a 5,0% e CaCl₂ (MERCK) a 4,0% do total de pectina, evitando assim a convecção da solução.

2.2 - Métodos

2.2.1 - Calor específico (Cp)

A determinação do calor específico foi realizada através de uma adaptação do método de HWANG, HAYAKAWA [6]. Utilizou-se um calorímetro de mistura que consiste de uma garrafa térmica, marca INVICTA, de capacidade volumétrica de 1 litro (Figura 1). Antes de iniciarem-se os testes, fez-se a calibração do calorímetro na faixa de temperatura utilizada no experimento (10 a 80°C), com o intuito de obter-se a capacidade térmica do calorímetro. As amostras da solução modelo, com massas variando entre 50 a 100g, foram acondicionadas em

saquinhos de polietileno selados e previamente armazenadas em câmara fria a temperatura constante de 5°C por 24 horas, a fim de garantir a estabilização da temperatura.

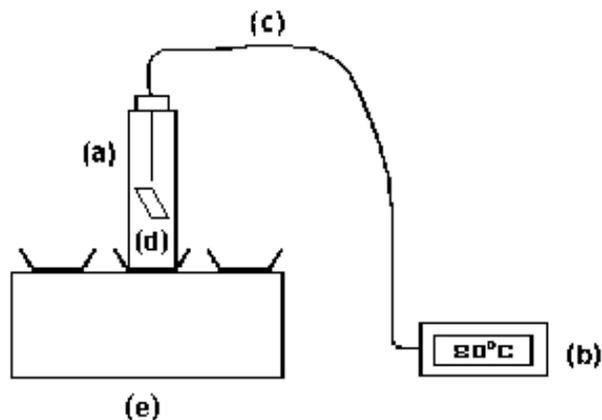


FIGURA 1. Esquema do aparato construído para medição de calor específico: (a) calorímetro (b) termômetro digital (c) cabo termopar (d) saquinho de polietileno com a amostra (e) “shaker”.

Introduziu-se no calorímetro 500g a 600g de água destilada com temperatura em torno de 90°C. Logo após, o calorímetro foi disposto em um “shaker” por 30 minutos, com o intuito de atingir o equilíbrio térmico entre o calorímetro e a água destilada.

Após atingido o equilíbrio térmico, introduziu-se o saquinho contendo a amostra, com o cuidado de se determinar a temperatura inicial no interior do mesmo, usando, para isso, um saquinho com dimensões e massa semelhantes ao primeiro, contendo um termopar adaptado. Através de um termopar de agulha (tipo T), calibrado e disposto na tampa de isopor da garrafa térmica, fez-se a leitura da temperatura no interior do calorímetro, com o auxílio de um termômetro digital, marca ECB, a cada 30 segundos. O sistema foi agitado continuamente em um “shaker”.

As leituras de temperaturas foram efetuadas até o equilíbrio térmico. Os dados obtidos forneceram base para a construção de um gráfico das temperaturas registradas em função do tempo. As temperaturas foram devidamente corrigidas por uma equação de calibração. A regressão linear foi determinada pela etapa linear da curva. Para os cálculos do calor específico, empregou-se a equação abaixo, que foi obtida através de balanço de energia.

$$C_p = (Hk + C_{pw} \cdot W_w) \cdot \frac{[T_{fw} - T_{ow} - \left(\frac{dT}{dt}\right)_{te}] + C_{ps} \cdot W_s \cdot [T_{fw} - T_{oc} - \left(\frac{dT}{dt}\right)_{te}]}{W_c \cdot [(T_{oc} - T_{fw}) + \left(\frac{dT}{dt}\right)_{te}]} \quad (1)$$

onde:

C_p = calor específico (cal/g°C) da amostra

Hk = capacidade térmica do calorímetro (cal/°C)

Cpw = calor específico da água destilada (cal/g °C)
 Ww = massa da água destilada (g)
 Tfw = temperatura correspondente ao início da parte reta da curva tempo x temperatura da água destilada (°C)
 Tow = temperatura inicial da água destilada (°C)
 dT/dt = inclinação da curva tempo x temperatura da água destilada (°C/min)
 te = tempo correspondente a Tfw da curva tempo x temperatura da água destilada (min)
 Cps = calor específico do saco de polietileno (cal/g°C)
 Ws = massa do saco de polietileno (g)
 Wc = massa da amostra (g)
 Toc = temperatura inicial da amostra (°C)

2.2.2 – Difusividade térmica (a)

O método usado na determinação da difusividade térmica foi baseado no método de DICKERSON [4], empregando o seguinte aparato: uma célula, formada por um tubo de latão, com 5,0cm de diâmetro; 29,8cm de altura e 0,08cm de espessura, com dois termopares acoplados, devidamente calibrados – um na superfície, para tomadas de medidas de temperatura nesta posição, outro, tipo agulha, disposto no plano central da amostra (Figura 2). Nessa determinação, faz-se necessária a eliminação de correntes convectivas no interior da célula, para tanto utilizou-se pectina BTM a 5% combinada com CaCl₂ a 4% do total de pectina na formulação da amostra, levando à gelificação do produto, sendo esta uma técnica eficiente mesmo com elevação de temperatura.

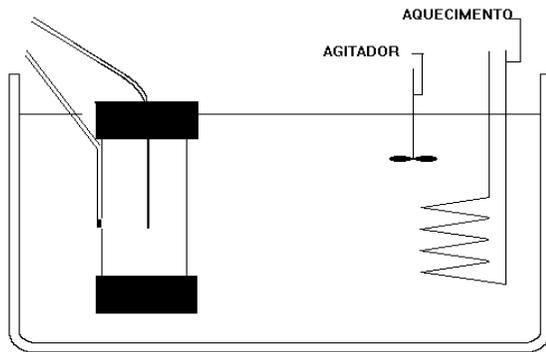


FIGURA 2. Esquema do aparato para medição de difusividade térmica.

O aparato de medição foi então totalmente mergulhado em banho térmico de água e etilenoglicol (1:1), a 0°C. Após o equilíbrio térmico entre a célula e o banho, iniciou-se o aquecimento, com uma taxa de 0,7°C/min, este foi interrompido quando a temperatura interna da amostra atingiu aproximadamente 85°C. As medidas de temperatura foram tomadas em intervalos de 1 minuto, por meio de uma chave seletora ligada a um termômetro digital, marca ECB. Os dados obtidos serviram de base

para o tratamento gráfico dos perfis de evolução das temperaturas externa e interna, além permitirem uma monitoração da taxa de elevação de temperatura do banho térmico. A difusividade térmica pôde ser calculada pela seguinte equação:

$$a = \frac{A \cdot R^2}{4 \cdot (T_{ext} - T_{int})} \quad (2)$$

onde:

α = difusividade térmica (m²/s)

A = taxa de subida de temperatura do banho (°C/min)

R = raio da célula (m)

(Text – Tint) = diferença entre a temperatura externa e a temperatura interna da célula (°C)

O valor de A assumido para o cálculo é o valor obtido a partir da fase constante de subida da temperatura do banho. O valor da diferença de temperatura externa e interna diminui à medida que a temperatura do banho aumenta, devido ao aumento da convecção; portanto, o valor calculado para a difusividade foi obtido para cada temperatura, fazendo-se posteriormente a média dos valores na faixa estudada.

2.2.3 – Delineamento experimental e avaliação dos resultados

A análise de superfície de resposta foi feita para avaliar a influência das variáveis de composição sobre as propriedades termofísicas. Para tanto utilizou-se o Planejamento Estrela [1], o qual consiste em um método rotacional central, onde X₁ e X₂ são variáveis codificadas. A codificação das variáveis é necessária já que as variáveis de composição são dependentes umas das outras. Todos os dados foram coletados em triplicata. Para obtenção da superfície de resposta foi utilizado o programa STATISTICA 6.0.

O modelo experimental de segunda ordem abaixo, descreve as superfícies de resposta para as variáveis calor específico e difusividade térmica.

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_1^2 + B_3X_2 + B_4X_2^2 + B_5X_1X_2 \quad (3)$$

onde Y é a resposta medida experimentalmente para as variáveis mencionadas, B₀ é uma constante e B₁ a B₅ são coeficientes numéricos para as variáveis codificadas X₁ e X₂.

$$X_1 = \frac{\%óleo}{\%água + \%carboidrato}$$

$$X_2 = \frac{\%carboidrato}{\%água}$$

O método de superfície de resposta determina as condições ótimas através da combinação entre “design” experimental especial com modelagem matemática, utilizando-se para tanto equações polinomiais de segunda ordem. Neste estudo adotou-se o Planejamento Estrela com três repetições do ponto central, a fim de analisar-se as propriedades especificadas anteriormente, varian-

do-se a composição de água (82% a 98,5%), carboidrato (0 a 15%) e gordura (0 a 1,77%), mantendo-se fixa a concentração de ácido a 1,5%. Para cada propriedade física foram realizados 11 ensaios, seguindo o planejamento inicial, para a viabilização da superfície de resposta. O planejamento encontra-se na *Tabela 1*.

TABELA 1. Composição dos ensaios utilizada para determinar as propriedades físicas.

Ensaio	X ₁	X ₂	Água (%)	Carboidrato (%)	Óleo (%)	Ácido (%)	Pectina (%)	CaCl ₂ (%)
1	-1	-1	92,41	2,58	0,29	1,50	5,00	0,80
2	1	-1	88,60	2,55	1,55	1,50	5,00	0,80
3	-1	1	79,17	13,24	0,29	1,50	5,00	0,80
4	1	1	78,07	13,08	1,55	1,50	5,00	0,80
5	0	0	83,67	8,14	0,89	1,50	5,00	0,80
6	0	0	83,67	8,14	0,89	1,50	5,00	0,80
7	0	0	83,67	8,14	0,89	1,50	5,00	0,80
8	-1,4142	0	84,48	8,22	0,00	1,50	5,00	0,80
9	0	1,4142	76,71	15,10	0,89	1,50	5,00	0,80
10	1,4142	0	82,87	8,06	1,77	1,50	5,00	0,80
11	0	-1,4142	91,81	0,00	0,89	1,50	5,00	0,80

Os valores obtidos experimentalmente para as propriedades termofísicas serão comparados com os obtidos através de modelos matemáticos encontrados na literatura.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de pH, Sólidos Solúveis, Cp e de difusividade térmica, estão dispostos na *Tabela 2*.

TABELA 2. Resultados das propriedades: Sólidos Solúveis, pH, calor específico e difusividade térmica, sendo o último a 50°C.

Ensaio	Sólidos Totais (%)	Sólidos Solúveis	pH	Cp (kcal/kg°C)	a (m ² /h) x 10 ⁴
1	9,88	5,0	2,48	0,8884	3,8041
2	9,85	4,5	2,50	0,9903	5,5253
3	20,54	15,5	2,36	0,8098	3,5812
4	20,38	15,0	2,45	0,9359	3,8621
5	15,44	9,0	2,40	0,8534	4,0681
6	15,44	9,0	2,40	0,8424	3,8718
7	15,44	9,0	2,40	0,8419	4,1411
8	15,52	10,0	2,27	0,8380	2,8737
9	22,40	17,0	2,23	0,8664	3,5268
10	15,36	9,6	2,48	0,9283	4,3510
11	7,30	2,0	2,31	0,9755	5,1325

Os dados da *Tabela 2* possibilitaram construir os gráficos de superfície de resposta para as propriedades termofísicas: calor específico (*Figura 4*), difusividade térmica (*Figura 6*), em função das variáveis X₁ e X₂, que serão apresentados mais a diante.

Através do programa STATISTICA 6.0 calculou-se os coeficientes das equações geradas pelo modelo de superfície de resposta, bem como seus limites de confiança de 95%.

3.1 – Calor específico (Cp)

De acordo com o procedimento adotado, determinou-se o calor específico para cada ensaio. Os valores de Cp para todos os ensaios, a 50°C (temperatura média), estão na *Tabela 2*.

Todas as medidas de temperatura foram devidamente corrigidas, através de curvas de calibração previamente determinadas para os termopares utilizados na determinação do calor específico.

O método empregado para a determinação do calor específico é o de HWANG, HAYAKAWA [6], e para esclarecer melhor este método, será apresentada como exemplo a determinação do Cp do ensaio 1.

Dados iniciais :

$$M_{H_2O} = 538,49g$$

$$Hk_{(\text{calorimetro A})} = 30,16 \text{ g/}^\circ\text{C}$$

$$Cp_{\text{saquinho}} = 0,5526 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

$$M_{\text{saquinho}} = 2,0g$$

$$T_{\text{amostra}} = 5,39^\circ\text{C}$$

$$T_{H_2O} = 87,32^\circ\text{C}$$

Coletando-se os dados de temperatura em cada tempo pode-se construir um gráfico de temperatura em função do tempo (*Figura 3*).

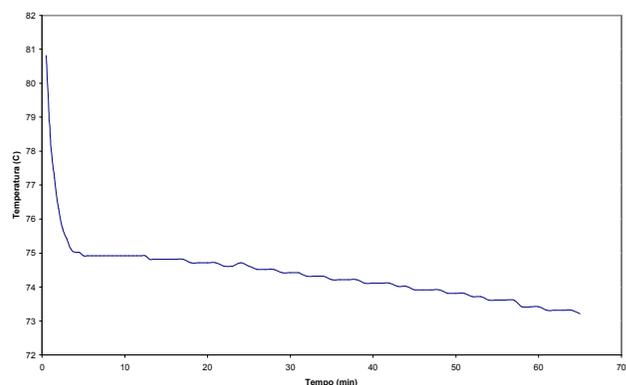


FIGURA 3. Determinação de cp - Ensaio 1 - Produto Modelo.

De acordo com a *Figura 3*, entre 15 e 60 minutos, a curva de tempo por temperatura para o ensaio 1 apresentou uma regressão linear onde $r^2 = 0,99402$ e inclinação $dT/dt = -0,03121$. Substituindo estes valores na equação (1), obtêm-se o Cp do ensaio 1, que corresponde a 0,8884 kcal/kg°C.

A análise estatística mostrou que o ajuste do modelo para determinação de calor específico foi de 76,6%, a nível de 95% de probabilidade. O fator de ajuste (p) para o calor específico foi de aproximadamente 0,03, portanto abaixo do valor nominal de 0,05 (95% de probabilidade). Isto significa que, apesar da equação ter um coeficiente de determinação ($r^2 = 0,86$) bom, não é o melhor ajuste possível.

O modelo de segunda ordem encontrado para calor específico (Cp) foi:

$$Cp = (0,8557 \pm 0,0132) + (0,0341 \pm 0,0081) * X_1 + (0,0087 \pm 0,0062) * X_1^2 - (0,0407 \pm 0,0128) * X_2 + (0,0269 \pm 0,0058) * X_2^2 \quad (4)$$

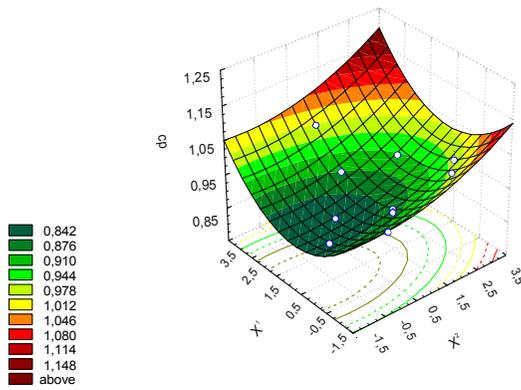


FIGURA 4. Cp em função de X₁ e X₂.

Os valores encontrados experimentalmente foram comparados aos modelos propostos por CHARM [2] e SIEBEL [12] e apresentados na Tabela 3.

Modelo I: CHARM [2]

$$C_p = 0,5.X_f + 0,3.X_s + 1,0.X_w \quad (\text{kcal/kg.}^\circ\text{C}) \quad (5)$$

Onde: X_f = fração de massa de gordura
 X_s = fração de massa de sólidos
 X_w = fração de massa de água

Modelo II: SIEBEL [12]

$$C_p = (0,837 + 3,349 \cdot X_w)/4,184 \quad (\text{kcal/kg.}^\circ\text{C}) \quad (6)$$

Onde: X_w = umidade da amostra (na forma decimal)

TABELA 3. Erro experimental para calor específico, segundo Modelos I e II

Ensaio	kcal/kg.°C			%	
	C _p exp	C _p modelo I	C _p modelo II	Erro _{modelo I}	Erro _{modelo II}
1	0,8884	0,9552	0,9397	7,52	5,77
2	0,9903	0,9233	0,9092	6,77	8,19
3	0,8098	0,8548	0,8337	5,56	2,95
4	0,9359	0,8496	0,8249	9,22	11,86
5	0,8534	0,8875	0,8698	3,99	1,92
6	0,8424	0,8875	0,8698	5,35	3,25
7	0,8419	0,8875	0,8698	5,42	3,31
8	0,8380	0,9325	0,8762	11,28	4,56
9	0,8664	0,8387	0,8141	3,20	6,04
10	0,9283	0,8836	0,8634	4,81	6,99
11	0,9755	0,9444	0,9349	3,19	4,16

^a Erro = 100 x (valor teórico - valor experimental) / valor experimental

Os valores experimentais de calor específico são similares aos preditos pelas equações dos modelos I e II, onde o erro máximo é de 11,28% (Modelo I) e 11,86% (Modelo II).

3.2 – Difusividade térmica (a)

O método adotado para determinação de difusividade térmica foi o de DICKERSON [4].

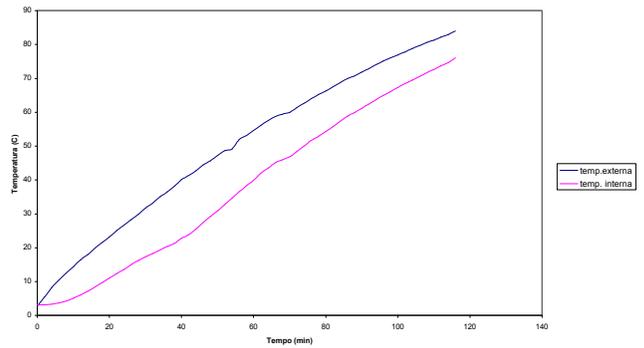


FIGURA 5. Evolução da temperatura com o tempo

Os valores de difusividade geral podem ser calculados através das equação (2). Para a difusividade geral, usa-se **A** geral, que equivale ao coeficiente angular do gráfico da Figura 5.

A Tabela 2 apresenta apenas os valores de difusividade térmica para os ensaios, à 50°C. Segue-se como exemplo os cálculos para determinação de α para o ensaio 1:

De acordo com a Figura 5, entre 40 e 116 minutos, a curva de difusividade geral por tempo para o ensaio 1 apresentou uma regressão linear onde r²= 0,9963 e inclinação dT/dt = 0,6974°C/min. O **A** geral vale portanto aproximadamente 0,7°C/min. Utilizando-se a equação (2), calcula-se a α 50°C deste ensaio, que corresponde a α = 1,0567. 10⁻⁷ m²/s.

A análise estatística mostrou que o ajuste do modelo para determinação de difusividade térmica foi de 85,8%, a nível de 95% de probabilidade. O fator de ajuste para difusividade térmica foi de aproximadamente 0,18, portanto bem acima do valor nominal de 0,05 (95% de probabilidade), indicando que o modelo de segunda ordem aplicado para difusividade térmica é apropriado para avaliar a variação desta propriedade térmica com a variação de X₁ e X₂. O coeficiente de determinação (r²) do modelo foi de 0,89.

O modelo de segunda ordem encontrado para difusividade térmica (DIF) foi:

$$DIF = (3,903 \pm 0,210) \cdot 10^{-4} + (1,061 \pm 0,694) \cdot 10^{-5} \cdot X_2 - (3,60 \pm 2,99) \cdot 10^{-5} \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (7)$$

De acordo com a Figura 6, o valor da difusividade térmica tem uma relação estritamente negativa com a variável X₂, o que significa dizer que quanto maior o valor de X₁ (e conseqüentemente maior o valor de % de carboidrato), menor será o valor da difusividade térmica.

Os valores encontrados experimentalmente foram comparados aos modelos propostos por RIEDEL [11] e MARTENS [7] e apresentados na Tabela 4.

Modelo I: RIEDEL [11]

$$\alpha = 0,088 \cdot 10^{-6} + (\alpha_w - 0,088 \cdot 10^{-6}) \cdot X_w \cdot 3600 \quad (\text{m}^2/\text{h}) \quad (8)$$

Onde: α_w = difusividade da água ($3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$)

Xw = umidade da amostra (na forma decimal)

Modelo II: MARTENS [7]

$$\alpha = [0,057363 \cdot Xw + 0,000288(T + 273)] \cdot 10^6 \cdot 3600 \text{ (m}^2/\text{h)} \quad (9)$$

Onde: Xw = umidade da amostra (na forma decimal)

T = temperatura da amostra (°C)

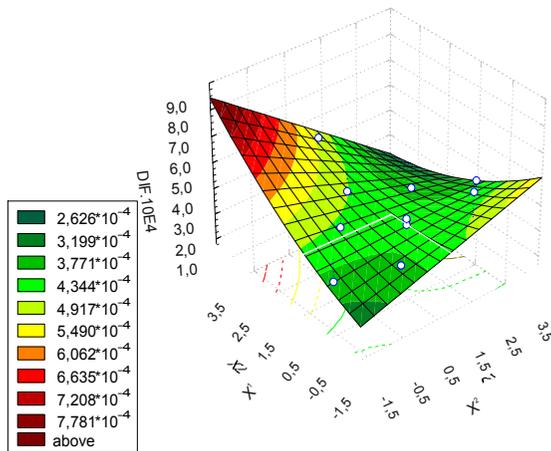


FIGURA 6. Difusividade térmica em função de X_1 e X_2 .

TABELA 4. Erro experimental para difusividade térmica, segundo Modelos I e II

Ensaio	m ² /h (x 10 ⁴)			%	
	α_{exp}	$\alpha_{modelo I}$	$\alpha_{modelo II}$	Erro _{modelo I}	Erro _{modelo II}
1	3,80	5,49	5,32	44,42	39,95
2	5,53	5,46	5,30	1,11	4,11
3	3,58	5,23	5,10	46,17	42,51
4	3,86	5,21	5,08	34,84	31,56
5	4,07	5,34	5,20	31,36	27,74
6	3,87	5,34	5,20	38,02	34,21
7	4,14	5,34	5,20	29,05	25,49
8	2,87	5,36	5,21	86,64	81,41
9	3,53	5,17	5,05	46,72	43,27
10	4,35	5,32	5,18	22,37	19,05
11	5,13	5,54	5,36	7,98	4,52

Erro = 100 x (valor teórico - valor experimental) / valor experimental

Os valores preditos pelas equações de REIDEL [11] e de MARTENS [7] fornecem valores com um erro que chega a 86,64% (Modelo I) e 81,41% (Modelo II) porém, como os valores são muito pequenos, em geral uma pequena variação provoca um erro grande. Conforme a Tabela 4 os valores preditos pelas equações dos modelos I e II pouco variaram, mesmo havendo uma grande variação da composição entre os ensaios. Os valores preditos não se ajustaram bem aos valores experimentais, visto que os modelos encontrados em literatura não consideram de maneira adequada o efeito de cada componente e da interação entre eles.

4 – CONCLUSÕES

As equações obtidas, apresentaram bons resultados, permitindo que, uma vez conhecida a composição do suco, desde que os componentes variem dentro da faixa estudada, pode-se a princípio simular as propriedades termofísicas sem a necessidade de medi-las experimentalmente. Estas equações de modo geral visam prever as propriedades termofísicas de sucos tropicais, otimizando processos industriais, tais como dimensionamento dos equipamentos utilizados no processamento de alimentos.

Demonstraram comportamento semelhante as propriedades de difusividade e calor específico, o que era esperado. Muito pouco foi possível comentar sobre a variável X_1 (que representa % de gordura em relação à água e ao carboidrato), pois esta, por estar em pouca quantidade, não representou tanta variação sobre as variáveis de resposta, provocando falta de ajuste de no calor específico, representado pelo fator de ajuste. Entretanto, para a variável calor específico o ajuste pode ser considerado bom, ao se analisar o gráfico de resíduos.

Os modelos encontrados na literatura em geral prezam bem os dados experimentais.

5 – REFERÊNCIAS

- [1] BARROS, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. 1995. **Planejamento e otimização de experimentos**. Metodologia de superfície de resposta., 2. ed, Campinas: UNICAMP, 299p.
- [2] CHARM, S.E. 1971. The fundamentals of food engineering, 2.ed. Westport: AVI, 1971. 629p. Apud: TEIXEIRA NETO, R.O. 1979. Curso de alimentos congelados, v. 1, Campinas: ITAL, 300p. Thermal Diffusivity in Food Processing, **Food Technology**, v. 36, n. 2, p. 87-91, 1982.
- [3] CONSTENLA, D.T.; LOZANO, J.E.; CRAPISTE, G.H. Thermophysical Properties of Clarified Apple Juice as a Function of Concentration and Temperature, **Journal of Food Science**, v. 54, n. 3, p. 663-668, 1989.
- [4] DICKERSON, R.W. An apparatus for measurements of Thermal Diffusivity of Foods, **Food Technology**, v. 19, n. 5, p. 198-204, 1965.
- [5] GEORGE, R.M. A Literature Survey of Thermal Diffusivity of Food Products, Campden Food & Drink Research Association, **Technical Bulletin**, v. 73, n. 2, p. 1-23, 1990.
- [6] HWANG, M.P.; HAYAKAWA, K. A specific heat calorimeter for foods, **Journal of Food Science**, v. 44, n. 2, p. 435-448, 1979.
- [7] MARTENS, T. Mathematical model of heat processing in flat containers. Ph. D. thesis. Katholieke University, Leuven, Belgium, 1980. Apud: SINGH, R.P. Thermal Diffusivity in Food Processing, **Food Technology**, v. 36, n. 2, p. 87-91, 1982.
- [8] MIN, D. B.; THOMAS, E. L. Application of response surface analysis in the formulation of whipped topping, **Journal of Food Science**, v. 45, p. 346-348, 1980
- [9] PEACOCK, S. Predicting physical properties of factory juices and syrups, **International Sugar Journal**, v. 97, n. 1162, p. 571-577, 1995.

- [10] POLLEY, S.L.; SNYDER, O.P.; KOTNOUR, P. A compilation of Thermal Properties of Foods, **Food Technology**, v. 34, n. 11, p.76-94, 1980.
- [11] REIDEL, L. Measurements of thermal diffusivity of foodstuffs rich in water. *Kaltetechnik-Klima-tisierung*, v. 21, n 11, p. 315, 1969. Apud: SINGH, R.P. Thermal Diffusivity in Food Processing, **Food Technology**, v. 36, n. 2, p. 87-91, 1982.
- [12] SIEBEL, J.E. Specific heat of various products. **Ice Refrig.**, v. 2, p. 256-257, 1982.
- [13] TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V.R.N.; GABAS, A.L.; YAMASHITA, F. Thermophysical Properties of Brazilian Orange Juice as Affected by temperature and Water Content, **Journal of Food Engineering**, v. 38, p.27-40, 1998.

6 – AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão das bolsas de Iniciação Científica - PIBIC.