



IX Oktoberfórum – PPGEQ

19, 20 e 21 de outubro de 2010

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA POLPA DE MIRTILO COM DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS

Júlia Ribeiro Sarkis, Lígia Damasceno Ferreira Marczak, Isabel Cristina Tessaro

Laboratório de Tecnologia e Processamento de Alimentos - LATEPA

Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

R. Eng. Luis Englert, s/n°. Campus Central. CEP: 90040-040 - Porto Alegre - RS - BRASIL,

E-MAIL: julia@enq.ufrgs.br

Resumo: O objetivo deste trabalho foi determinar a massa específica, a condutividade térmica, o calor específico a pressão constante, a difusividade térmica e a condutividade elétrica da polpa de mirtilo com diferentes teores de sólidos totais e em diferentes temperaturas. Os métodos utilizados para determinação das propriedades foram o picnométrico para a massa específica, o uso de condutivímetro para a condutividade elétrica, o mistura para o calor específico e o da solução analítica da equação da difusão de calor transiente para a difusividade térmica. A condutividade térmica foi calculada com base nas demais propriedades físicas. Para a massa específica foram encontrados valores entre 0,98 e 1,05 g.ml⁻¹. A condutividade elétrica apresentou valores entre 0,79 e 3,86 mS.cm⁻¹. Foram propostos modelos para a variação da massa específica e da condutividade elétrica com a concentração e a temperatura. As médias dos resultados para o calor específico das polpas com teores totais de sólidos 16 e 14,24 % foram 3720,9 e 4050,4 J.kg⁻¹.°C⁻¹. Para a difusividade térmica, as médias dos valores obtidos foram 1,47x10⁻⁷ e 1,51x10⁻⁷ m²s⁻¹, para as polpas com teores de sólidos de 16 e 14,24 %, respectivamente. Os valores de condutividade térmica encontrados foram 0,57 e 0,64 W.m⁻¹.°C⁻¹.

Palavras-chave: mirtilo; condutividade elétrica; condutividade térmica; massa específica; calor específico; difusividade térmica.

1. Introdução

O mirtilo (*Vaccinium* spp) pertence ao grupo das pequenas frutas, do qual também fazem parte amora, morango, framboesa e fisalis. Esta espécie frutífera é originária da Europa e da América do Norte e é chamada de *blueberry* em inglês e *arándano* em espanhol.

A cultura do mirtilo ainda é recente no Brasil; em 1983 a Embrapa Clima Temperado introduziu cultivares de mirtilo do grupo *rabbiteye* no país. Devido a suas propriedades nutracêuticas, e pelas oportunidades de negócio que o fruto apresenta, tem despertado a atenção de técnicos e produtores de frutas brasileiros. Por essas razões, a pesquisa desta cultura tem se intensificado recentemente (Ayala, 1999; Madail e Santos, 2004).

As frutas processadas foram incorporadas à rotina dos indivíduos na sociedade atual e seu consumo se dá na forma de sucos, polpas, barras de cereais, entre outros. A evolução do consumo das mesmas no Brasil aponta para o caminho da comercialização de produtos com maior valor agregado. O mercado de frutas frescas tropicais já movimentou US\$ 8,6 bilhões e, considerando os produtos

industrializados, o valor é de US\$ 23 bilhões (Pereira, 2006).

Para o processamento de frutas, assim como outros alimentos, é necessário o conhecimento das propriedades físicas do produto. Estas propriedades são importantes no projeto de equipamentos, na modelagem e no controle de processos, variando com a temperatura e com a composição dos alimentos.

As propriedades físicas controlam a transferência e o armazenamento de energia térmica e as transformações ocorridas em determinado material quando aquecido. A massa específica (ρ), a condutividade térmica (k), o calor específico a pressão constante (C_p), a difusividade térmica (α) e a condutividade elétrica (σ) são as principais propriedades físicas necessárias para avaliar, projetar e modelar processos de transferência de calor, como aquecimento, secagem, desidratação, refrigeração ou congelamento.

Diversos modelos estão disponíveis na literatura (Bhumbla *et al.*, 1989; Rahman, 1995) e fornecem equações que relacionam estas propriedades com seus

constituintes majoritários (água, proteína, carboidratos, gordura) e a temperatura; no entanto, existem diferenças significativas entre os valores estimados e os obtidos experimentalmente, devido à complexa estrutura físico-química dos alimentos.

Para a determinação da massa específica de alimentos, o método picnométrico é amplamente utilizado. Esta técnica pode ser aplicada em polpas (Pereira *et al.*, 2002; Souza *et al.*, 2008; Bon *et al.*, 2010), sucos (Constenla *et al.*, 1989; Telis-Romero *et al.*, 1998; Cepeda e Villarán, 1999; Azoubel *et al.*, 2005), purês (Ramos e Ibarz, 1998), iogurte (Kim e Bhowmik, 1997) e ovos (Coimbra *et al.*, 2006), entre outros produtos.

A condutividade elétrica é a habilidade de um material de transportar corrente elétrica; uma vez que os alimentos contêm água e constituintes iônicos, são capazes de conduzir corrente. A determinação desta propriedade é geralmente realizada com condutivímetros, que realizam medidas considerando a quantidade e a mobilidade de íons dissolvidos na amostra. Utilizando este método, Moura, Vitali e Hubinge (1999) estudaram a condutividade elétrica de sucos de abacaxi, limão e tangerina.

A condução de corrente elétrica pode também ser determinada utilizando células ôhmicas, onde o alimento é posicionado entre dois eletrodos, atuando como resistência. A passagem de corrente faz com que a energia elétrica se transforme em térmica e a temperatura do alimento aumente. Esse método pode ser utilizado para determinação da condutividade elétrica de polpas e geléias de fruta (Castro *et al.*, 2003; Souza *et al.*, 2008), sucos (Palaniappan e Sastry, 1991b; Marybeth *et al.*, 1999; İçier e Ilicali, 2004; İçier *et al.*, 2008), entre outros alimentos.

O calor específico pode ser definido como a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa em um grau de temperatura. O método mais utilizado para medir esta propriedade termofísica é o método de mistura, podendo, ainda, serem usados os métodos de comparação, adiabático e *differential scanning calorimeter* (DSC). No método de mistura, uma substância de massa e temperatura conhecida é colocada em um calorímetro de calor específico conhecido contendo água ou outro líquido de massa e temperatura conhecidas. O calor específico de sucos e polpas de frutas foi analisado por diversos autores (Constenla *et al.*, 1989; Telis-Romero *et al.*, 1998; Zainal *et al.*, 2000; Minim *et al.*, 2002; Coimbra *et al.*, 2006; Souza *et al.*, 2008; Bon *et al.*, 2010).

A difusividade térmica (α [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]) é a relação entre a capacidade de um material de conduzir calor e a sua capacidade de armazená-lo. Assim, a difusividade térmica de um composto pode ser calculada pela razão entre a sua condutividade térmica (k [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]) e a sua capacidade calorífica (ρC_p [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]), conforme a Equação 1. Esta propriedade é importante no cálculo dos tempos de processos como apertização, aquecimento, resfriamento, congelamento ou cozimento (Rahman, 1995).

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

Diferentes métodos foram descritos por Singh (1982) para a determinação da difusividade térmica. As principais metodologias para medição da difusividade são o método de mínimos quadrados, a utilização de curvas de penetração de calor, o uso cartas tempo-temperatura e de soluções analíticas.

A condutividade térmica de um material é a medida da sua habilidade de conduzir calor, dependendo, em alimentos, principalmente de sua composição. As técnicas para determinação da condutividade térmica se baseiam na solução da equação para condução de calor e podem ser divididas em técnicas em estado estacionário, pseudoestacionário e em regime transiente (Rahman, 1995). Além da solução da equação para condução de calor, a condutividade térmica pode ser determinada através do conhecimento das demais propriedades (α , ρ e C_p).

O objetivo deste trabalho foi determinar, experimentalmente, a massa específica, a condutividade elétrica, o calor específico, a difusividade térmica e a condutividade térmica da polpa de mirtilo com diferentes teores de sólidos totais em diferentes temperaturas.

2. Materiais e Métodos

2.1 Elaboração da Polpa

A polpa de mirtilo foi elaborada através da trituração dos frutos utilizando um mixer (Britânia, modelo Ultra Mixer, Brasil) e foi efetuada após o descongelamento completo dos mesmos, realizado em banho à temperatura ambiente. Foram determinadas diferentes concentrações, expressas em teor total de sólidos (TTS), para analisar o efeito deste parâmetro sobre as propriedades físicas (Tabela 1). Para elaboração destas, as polpas foram adicionadas de água destilada e deionizada e goma xantana (*Hexus Food*). A goma foi previamente misturada à água e a polpa foi adicionada a esta mistura mediante agitação, utilizando um agitador magnético (Tecnal, modelo TE-0851, Brasil) até a sua completa homogeneização. O produto pronto foi mantido sob refrigeração a 10 °C por 24 horas para completa hidratação, obtendo-se uma polpa diluída e homogênea.

Tabela 1 – Formulações das amostras utilizadas na determinação das propriedades físicas.

TTS (%)	Polpa (%)	Goma (%)	Água (%)
16,00	83,29	0,10	16,61
14,24	74,12	0,10	25,78
10,00	52,06	0,10	47,84
5,76	30,00	0,10	69,90
4,00	20,83	0,10	79,07

2.2 Determinação das propriedades físicas

Massa específica

A massa específica foi determinada através do método picnométrico sendo que as análises foram realizadas em triplicata nas temperaturas de 30, 40, 50, 60, 70 e 80 °C para os teores totais de sólidos da Tabela 1. Para tal utilizaram-se picnômetros com capacidade de 25 ml previamente calibrados com água destilada. Esta calibração, realizada em triplicata, tem como função determinar o volume real dos frascos na faixa de temperaturas da análise, utilizando a Equação 2:

$$V = \frac{m_{pc} - m_p}{\rho_w} \quad (2)$$

onde V é o volume real do picnômetro ρ_w é a massa específica da água, conhecida para todas as temperaturas analisadas, e m_{pc} e m_p são as massas do picnômetro cheio e vazio, respectivamente. Conhecendo o volume exato dos picnômetros, foi possível determinar a massa específica da amostra.

A temperatura das amostras foi controlada utilizando um banho termostático e as mesmas foram pesadas em balança analítica. A massa específica dos sucos de mirtilo nas diferentes temperaturas foi calculada a partir da Equação 3:

$$\rho = \frac{m_{pc} - m_p}{V} \quad (3)$$

Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (σ) foi determinada por condutivimetria, utilizando um condutímetro (Digimed, modelo DM-3, Brasil). A sonda utilizada é indicada para utilização na faixa de 0 a 20 mS/cm e foi calibrada com solução padrão, fornecida pelo fabricante, com condutividade elétrica igual a 1412 mS/cm. Aproximadamente 3 ml de polpa foram inseridos em tubos de ensaio. Os tubos foram colocados em um banho termostático onde as amostras foram aquecidas até a temperatura desejada. As análises foram realizadas em triplicata para as mesmas temperaturas analisadas no item 2.2 e nos teores totais de sólidos da Tabela 1.

Calor específico

Para determinação do calor específico foi utilizado o método de mistura aplicado por Souza (2008), que combinou os métodos desenvolvidos por Hwang e Hayakawa (1979) e Moura *et al.* (2003). O método consiste na construção de um calorímetro utilizando uma garrafa térmica. Neste, foi inserido um termopar tipo T, previamente calibrado, no centro geométrico do calorímetro para medição da temperatura da água. O termopar foi conectado a um sistema de aquisição de dados (Novus, modelo Field Logger, Brasil) conectado a um computador e foram adquiridos valores de temperatura a

cada 5 s. O calorímetro foi validado utilizando água e os valores comparados com os de literatura apresentaram erro em torno de 1 %.

Para preparação das amostras, cerca de 100 g de polpa foram inseridas em sacos de polietileno de baixa densidade (PEBD) com 3 cm de largura, 15 cm de comprimento e massa de 0,29 g. A amostra embalada foi ambientada em uma câmara de refrigeração, a temperaturas que variaram de 4 à 10 °C, por 24 horas antes de cada análise.

Na condução do experimento, aproximadamente 300 g de água a 95 °C foram colocadas no calorímetro, previamente seco, e este foi vedado com uma rolha de silicone. O aparato devidamente fechado foi posicionado em um banho termostático com agitação mecânica por aproximadamente 30 minutos e a temperatura foi monitorada desde o início do experimento. Este tempo foi determinado com base nos métodos de Hwang e Hayakawa (1979) e Moura *et al.* (2003) para que a água entrasse em quase equilíbrio e a perda de calor para o ambiente se tornasse constante.

A amostra foi retirada da câmara de refrigeração, pesada e, rapidamente, inserida no calorímetro, que foi fechado, permanecendo sob agitação por mais 2 horas. A determinação da temperatura com a qual a amostra foi inserida no calorímetro (T_{0a}) foi determinada colocando outro saco de PEBD com iguais proporções e massa de amostra na câmara de refrigeração e medindo sua temperatura, sendo que para esta medida foi utilizado um termômetro de mercúrio com escala de 0,1 °C. As análises foram realizadas em triplicata.

O cálculo do calor específico das amostras foi realizado usando a Equação 4, baseada na Lei de Conservação de Energia e considerando a perda de calor do sistema para o ambiente:

$$C_{pa} = \frac{(C_{pw}m_w + H_k) \cdot [T_e - T_0 - (dT/dt)t_e]}{m_a [T_{0a} - T_e + (dT/dt)t_e]} \quad (4)$$

onde C_{pa} é o calor específico a pressão constante da amostra, C_{pw} é o calor específico da água, m_w a massa de água inserida no calorímetro, H_k a capacidade calorífica do calorímetro, T_e a temperatura na qual a amostra e a água entram na temperatura de quase equilíbrio, T_0 a temperatura da água no momento da inserção da amostra, t_e o tempo transcorrido entre a entrada da amostra e o quase equilíbrio, m_a a massa de amostra, T_{0a} a temperatura da amostra quando foi inserida no calorímetro e dT/dt a inclinação da reta atingida no estado de quase equilíbrio.

Para a determinação do H_k o experimento foi realizado repetidamente utilizando água destilada como amostra. Desta forma, a única incógnita remanescente da Equação 4 foi a capacidade calorífica do calorímetro.

Difusividade térmica

A determinação da difusividade térmica foi obtida através da solução analítica da equação da transferência de calor em estado transiente para um cilindro longo. O método é baseado no experimento realizado por Baïri *et al.* (2007) e o aparato experimental utilizado é explicado detalhadamente por Souza *et al.* (2008). O equipamento consiste em células cilíndricas de cobre, com diâmetro de 11 mm e comprimento de 105 mm, preenchidas com 10 g de amostra da qual quer se determinar a difusividade. No centro geométrico da parte interna da célula foi fixado um termopar tipo T, previamente calibrado, e nas extremidades foram colocadas rolhas de silicone.

A amostra, já inserida na célula cilíndrica, foi colocada em um banho termostático de temperatura constante de modo que a temperatura externa não tivesse nenhuma variação, sendo que esta temperatura é a temperatura do início do experimento T_0 . Após o equilíbrio térmico, o cilindro foi transferido para um segundo banho termostático com temperatura aproximadamente 30 °C maior que o anterior. Neste, a amostra foi mantida até atingir a temperatura de equilíbrio T_e . A temperatura no interior da célula foi monitorada durante todo o experimento com o mesmo sistema de aquisição de dados utilizado na determinação do calor específico.

Os cálculos foram realizados utilizando a solução analítica da equação de Fourier para a condução de calor em coordenadas cilíndricas em estado transiente, apresentada na Equação 5. Aproximando este somatório pelo seu primeiro termo e considerando a resistência convectiva negligenciável a Equação 5 é reescrita conforme a Equação 6.

$$\theta(r,t) = \frac{T(r,t) - T_e}{T_0 - T_e} = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \exp(\xi_m^2 Fo) \frac{1}{\xi_m} \frac{J_1(\xi_m)}{J_0^2(\xi_m) + J_1^2(\xi_m)} J_0(\xi_m r^*) \quad (5)$$

$$\ln\left(\frac{T(r,t) - T_e}{T_0 - T_e}\right) = \ln C - \alpha \left(\frac{2,405^2}{R^2}\right) t \quad (6)$$

Nas equações acima J_0 e J_1 são funções de Bessel de ordem zero e de primeira ordem, respectivamente; ξ_m as raízes positivas da equação $\xi_m J_1(\xi_m) - Bi J_0(\xi_m) = 0$; Fo é o número de Fourier para a difusão ($Fo = \alpha \cdot t / R^2$); R é o raio do cilindro (m) e C é uma constante.

Ajustando a Equação 6, para os dados de temperatura e tempo, é possível obter uma correlação linear de $\ln(\theta)$ versus tempo. Portanto, determinando a inclinação da reta (a) obtida através dos dados computados, é viável o cálculo da difusividade a partir da Equação 7.

$$\alpha = - \frac{a}{(2,405^2 / R^2)} \quad (7)$$

A difusividade térmica foi determinada na temperatura média entre o banho inicial ($T_0 = 25$ °C) e o banho de aquecimento ($T_e = 55$ °C). O aparato

experimental foi validado através de experimentos realizados com água destilada adicionada de 0,3% de goma xantana. Para todos os experimentos foram realizadas múltiplas repetições.

Condutividade térmica

A condutividade térmica foi calculada utilizando a Equação 1, a partir dos dados de massa específica, calor específico e difusividade térmica.

2.2 Análise estatística

Os dados obtidos para massa específica e condutividade elétrica foram analisados utilizando o software *Statistica 7.1*. Foi realizada uma análise de regressão múltipla a fim de relacionar as variáveis estudadas (TTS e Temperatura), obtendo equações ajustadas aos dados experimentais para a massa específica e a condutividade elétrica. O modelo foi estabelecido para um polinômio de segunda ordem completo (Equação 8) e foram avaliados modelos reduzidos, desconsiderando as variáveis não significativas, com grau de confiança de 95%. Para todos os modelos analisados, foi calculado o valor de F e verificado o melhor ajuste:

$$\Pi = a + bCo + cCo^2 + dT + eT^2 + fCoT \quad (8)$$

onde Π é a propriedade analisada, Co é a concentração, dada pelo teor total de sólidos do produto em %, T é a temperatura em °C e as letras de a à f são os parâmetros a serem estimados pela análise. Os erros entre os valores experimentais e os preditos pelos modelos foram calculados usando a Equação 9.

$$E(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_{exp} - y_{pred}|}{y_{exp}} \quad (9)$$

onde E é o erro, n é o número de experimentos, y_{exp} é o valor experimental e y_{pred} é o valor predito pelo modelo. Para comparação das demais propriedades (C_p , α e k) com as propriedades da água nas mesmas condições, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) utilizando o programa *Excel 2007*.

3. Resultados e Discussão

3.1 Massa específica

Os valores obtidos para a massa específica da polpa de mirtilo em diferentes temperaturas e com diferentes teores de sólidos totais variaram entre 0,98 e 1,05 g.ml⁻¹. As triplicatas realizadas em cada ponto apresentaram erro inferior a 5% em todas as combinações. A equação que melhor representou a variação da massa específica foi a apresentada pela Equação 10:

$$\rho = 0,9895 + 3,8773 \times 10^{-5} Co + 7,2401 \times 10^{-4} T - 1,2424 \times 10^{-5} T^2 - 1,8232 \times 10^{-7} CoT \quad (10)$$

O erro médio entre os valores preditos pelo modelo e os observados experimentalmente foi de 0,22% e o R^2 0,981. A Figura 1 mostra a superfície de resposta desta variável; observa-se um aumento linear da massa específica com o aumento do teor total de sólidos e uma diminuição quadrática com o aumento da temperatura.

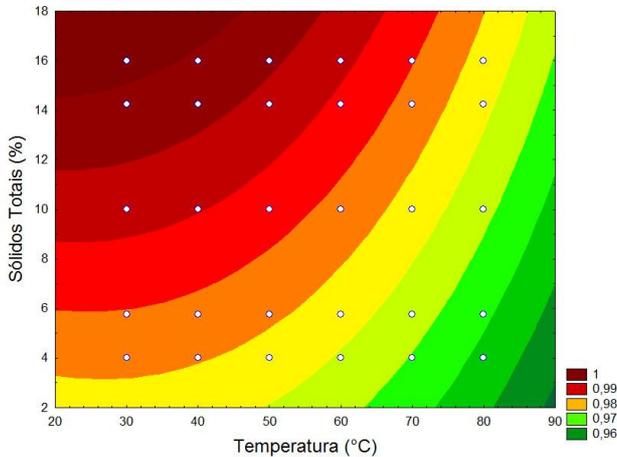


Figura 1 – Superfície de resposta para a massa específica do mirtilo em função da temperatura e do teor total de sólidos.

O comportamento encontrado está de acordo com Azoubel *et al.* (2005), que estudaram a variação das propriedades físicas do suco de caqui em função da concentração, Cepeda e Villarán (1999) que avaliaram a variação da massa específica do suco de *Malus floribunda* em relação ao °Brix do produto. O estudo que avaliou as propriedades físicas de ovos, realizado por Coimbra *et al.* (2006), encontrou uma variação linear da massa específica com ambas as propriedades estudadas, o que concorda com o estudo de Pereira *et al.* (2002) para a polpa de açaí e de Telis-Romero *et al.* (1998) para o suco de laranja. Modelos que não utilizam equações polinomiais foram propostos por Constenla *et al.* (1989) e Bon *et al.* (2010) para suco de maçã e polpa de manga, respectivamente.

Apesar de algumas correlações sugerirem uma variação linear da massa específica em função da temperatura, foi encontrada uma variação quadrática. O comportamento linear é esperado por ser o comportamento da água, que é o principal constituinte da polpa de mirtilo. A variação quadrática da massa específica pode ser explicada pela presença de bolhas de ar impregnadas na polpa, sendo que, a desaeração do produto pode fazer com que este passe a ter um comportamento linear. Esta possibilidade foi confirmada por Souza *et al.* (2008), que estudou as propriedades físicas de pequenos frutos, entre eles o mirtilo.

3.2 Condutividade elétrica

Os valores experimentais da condutividade elétrica da polpa de mirtilo variaram entre 0,79 e 3,86 mS.cm⁻¹. Seu comportamento com as variações de temperatura e de teores totais de sólidos pode ser observado na Figura 2. A superfície de resposta foi elaborada com base no modelo que melhor se ajustou aos

dados (Equação 11). O modelo apresentou coeficiente de determinação de 0,997 e o erro entre os dados experimentais e os valores preditos foi de 1,51%.

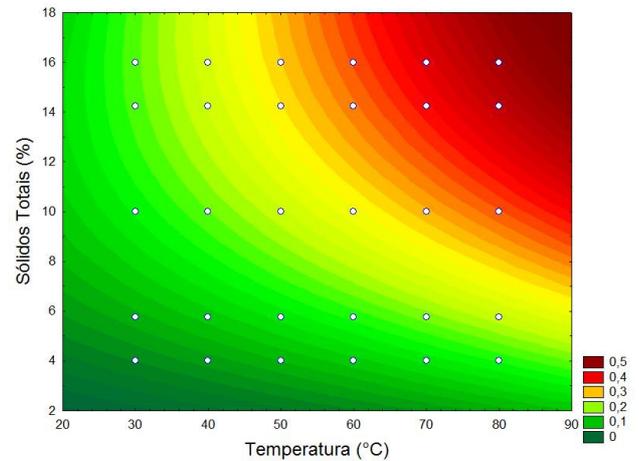


Figura 2 – Superfície de resposta para a condutividade elétrica da polpa de mirtilo em função da temperatura e do teor total de sólidos.

$$\sigma = -0,1729 + 1,4389 \times 10^{-3} Co + 7,5079 \times 10^{-3} T - 6,4398 \times 10^{-7} Co^2 + 2,1867 \times 10^{-5} CoT \quad (11)$$

Na superfície de resposta se observa um aumento linear da condutividade elétrica com a temperatura e um aumento quadrático com o teor total de sólidos. De acordo com Palaniappan e Sastry (1991a), o aumento da condutividade elétrica com a temperatura pode ser explicado por uma menor resistência ao movimento dos íons. O aumento da condutividade elétrica com o teor de sólidos está relacionado com a maior concentração de espécies iônicas, facilitando a passagem de corrente elétrica (Içier e Ilicali, 2004).

Moura *et al.* (1999) estudaram o comportamento dos sucos de tangerina, abacaxi e limão com diferentes temperaturas em diferentes concentrações. Em todos os casos, assim como para a polpa de mirtilo, o valor da condutividade elétrica aumentou com a temperatura. No entanto, a condutividade elétrica só aumentou com a concentração até um determinado valor, sendo que para os valores mais altos houve uma diminuição de σ . Os autores atribuem este comportamento ao aumento da viscosidade dos produtos que ocorre com o aumento da concentração, dificultando a mobilidade iônica e, assim, a passagem de corrente elétrica. Resultados semelhantes foram obtidos por Pelacani e Vieira (2003) para o suco de manga.

3.3 Calor específico

Os experimentos iniciais, realizados com água, para determinar a capacidade calorífica do calorímetro (H_k) resultaram em um valor de $124,51 \pm 11,60 \text{ J} \cdot \text{°C}^{-1}$. Após estes, foram realizados os experimentos para validar o equipamento, utilizando o calor específico da água. Os resultados são apresentados na Tabela 2. O erro encontrado foi inferior a 1 % validando o calorímetro construído.

Tabela 2 – Valores teóricos e experimentais para o C_p da água.

T (°C)	C_p (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)		Erro (%)
	Valor teórico	Valor experimental	
39,15	4178	4204,95	0,46
40,20	4178	4124,83	0,91
40,02	4178	4169,02	0,15

As análises para a polpa de mirtilo foram realizadas em triplicata. O calor específico foi determinado inicialmente para a polpa com teor total de sólidos de 16 % e foi encontrado um valor médio de 3720,9 J·°C⁻¹. A análise ANOVA foi realizada a fim de comparar o valor encontrado com o da água para verificar se existia diferença significativa. Foi verificado que os dois valores diferem significativamente e foi determinado o calor específico da polpa com 14,24 % de sólidos totais. Para esta diluição, o valor de C_p encontrado foi de 4050,4 J·°C⁻¹. Este valor não diferiu significativamente do valor de C_p da água, com um grau de confiança de 95%. Os dados obtidos experimentalmente se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de C_p para as polpas de mirtilo com TTS de 16 e 14,24 %.

TTS 16 %		TTS 14,24 %	
T (°C)	C_p (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	T (°C)	C_p (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)
38,45	3774,64	38,28	4119,98
38,58	3805,33	38,09	4067,21
37,83	3582,77	37,98	3963,97
Média	3720,91	Média	4050,39
Erro (%)	3,24	Erro (%)	1,96

Dentre todos os componentes dos alimentos, como água, gorduras, proteínas, carboidratos e cinza, o calor específico da água é o mais alto (Rahman, 1995). Por este motivo não foram analisados os valores de calor específico das polpas com TTS abaixo de 14,24%. As demais diluições teriam um valor de C_p ainda mais próximo ao da água.

Estudos realizados com suco de goiaba (Zainal *et al.*, 2000), ovos (Coimbra *et al.*, 2006) e leite (Minim *et al.*, 2002) demonstraram um aumento linear do calor específico com a temperatura e com o teor de água do produto. Souza *et al.* (2008) determinou o calor específico para as polpas de mirtilo, framboesa, amora e morango e encontrou valores bastante similares aos obtidos no presente estudo e, conseqüentemente, ao valor do calor específico da água. O mesmo foi reportado para sucos de cupuaçu, açaí e graviola por Moura *et al.* (1998).

3.4 Difusividade térmica

Primeiramente, foi realizada a validação do experimento através da determinação da difusividade

térmica da água. A difusividade da água foi determinada em quintuplicata, o erro entre as repetições foi de 0,07 % e o erro entre o valor médio encontrado e o valor da literatura (1,53x10⁻⁷ m²·s⁻¹) foi de 0,02 %.

As análises de difusividade da polpa de mirtilo foram realizadas em triplicata. De maneira análoga a realizada para o calor específico, também os valores de difusividade térmica foram inicialmente determinados para a polpa com 16 % de TTS. O valor de α obtido foi de 1,47x10⁻⁷ m²·s⁻¹. Os resultados obtidos em cada experimento são apresentados na Tabela 4. A partir da ANOVA verificou-se que este valor diferiu significativamente da difusividade térmica da água e foi realizado o experimento para a polpa com 14,24 % de sólidos. A difusividade térmica encontrada para esta polpa foi 1,51x10⁻⁷ m²·s⁻¹.

A análise de variância para esta polpa demonstrou que os valores de difusividade térmica da polpa e da água não possuem diferença significativa entre si com grau de confiança de 95 %. Por este motivo não foram determinadas as difusividades térmicas das demais diluições da Tabela 1.

Tabela 4 – Valores de α para as polpas de mirtilo com TTS de 16 e 14,24 %.

TTS 16 %		TTS 14,24 %	
T (°C)	α (m ² ·s ⁻¹)	T (°C)	α (m ² ·s ⁻¹)
40,07	1,50 E-07	39,99	1,49 E-07
39,96	1,43 E-07	40,39	1,49 E-07
40,04	1,49 E-07	40,36	1,53 E-07
39,90	1,45 E-07	39,74	1,54 E-07
40,24	1,50 E-07	39,87	1,51 E-07
Média	1,47 E-7	Média	1,51 E-07
Erro (%)	2,24	Erro (%)	1,82

Azoubel *et al.* (2005) avaliaram a propriedade para o suco de caju com diferentes concentrações e observaram que a difusividade térmica aumentou linearmente com a diminuição da concentração, se aproximando do valor da água. Os valores encontrados neste estudo variaram entre 1,29 e 1,48x10⁻⁷ m²·s⁻¹. Os valores encontrados para o mirtilo foram similares aos determinados por Souza *et al.* (2008), que analisou este e outros frutos. Também estão na mesma faixa dos experimentos de Hayes (1984) para polpa de mamão e Moura *et al.* (1998) para cupuaçu, açaí e graviola.

3.5 Condutividade térmica

Os valores de condutividade térmica encontrados foram 0,57 W·m⁻¹·°C⁻¹ e 0,64 W·m⁻¹·°C⁻¹ para as polpas com teores totais de sólidos de 16 e 14,24 %, respectivamente. Estes valores estão próximos aos relatados previamente para o mirtilo e outros pequenos

frutos (Souza *et al.*, 2008) e para sucos de frutas tropicais (Moura *et al.*, 1998).

O mesmo comportamento encontrado para a difusividade térmica e o calor específico foi reportado por Azoubel *et al.* (2005); o valor da condutividade aumentou com aumento do teor de água, se aproximando ao valor da condutividade da água pura. Esta mesma variação foi observada para ovos (Coimbra *et al.*, 2006), suco de goiaba (Zainal *et al.*, 2000), leite (Minim *et al.*, 2002) e suco de laranja (Telis-Romero *et al.*, 1998).

4. Conclusão

O presente trabalho apresentou os resultados de massa específica, condutividade elétrica, calor específico, difusividade térmica e condutividade térmica para polpa de mirtilo com diferentes teores de sólidos totais e em diferentes temperaturas.

A massa específica e a condutividade elétrica da polpa de mirtilo variaram entre 0,98 e 1,05 g.ml⁻¹ e 0,79 e 3,86 mS.cm⁻¹, respectivamente, em temperaturas variando entre 30 e 80 °C e teores totais de sólidos variando entre 4 e 16 %. A massa específica aumentou linearmente com o teor total de sólidos e diminuiu de forma quadrática com a temperatura. O modelo elaborado a partir da regressão múltipla para descrever este comportamento foi satisfatório, com coeficiente de determinação 0,981 e erro médio de 0,22 %. A condutividade elétrica aumentou de forma quadrática com o teor total de sólidos e linearmente com a temperatura, o modelo elaborado também foi satisfatório com R² 0,997 e erro médio entre os valores preditos e experimentais de 1,51 %.

Para as polpas com teor total de sólidos de 16 % os valores de calor específico, difusividade térmica e condutividade térmica foram 3720,9 J.kg⁻¹.°C⁻¹, 1,47x10⁻⁷ m²s⁻¹, 0,57 W.m⁻¹.°C⁻¹, respectivamente e, para a polpa com 14,24 % de sólidos, os valores encontrados foram 4050,4 J.kg⁻¹.°C⁻¹, 1,51x10⁻⁷ m²s⁻¹ e 0,64 W.m⁻¹.°C⁻¹. Os valores encontrados se aproximaram dos valores da água para as mesmas propriedades físicas com a diminuição do teor de sólidos e, conseqüentemente, com o aumento da quantidade de água no produto. As demais diluições não foram avaliadas porque os valores de calor específico e difusividade térmica da polpa com TTS 14 % não apresentaram diferença significativa dos valores encontrados na literatura para água.

5. Referências

AYALA, F. D. L. J. *Amora-framboesa-groselha-kiwi-mirtilo e sua comercialização*. Porto Alegre: Cinco Continentes. 1999. 57 p.

AZOUBEL, P. M., CIPRIANI, D. C., EL-AOUAR, Â. A., ANTONIO, G. C. e MURR, F. E. X. Effect of concentration on the physical properties of cashew juice. *Journal of Food Engineering*, v.66, n.4, p.413-417. 2005.

BAÏRI, A., LARAQI, N. e DE MARÍA, J. M. G. Determination of thermal diffusivity of foods using 1d fourier cylindrical solution. *Journal of Food Engineering*, v.78, n.2, p.669-675. 2007.

BHUMBLA, V. K., SINGH, A. K. e SINGH, Y. Prediction of thermal conductivity of fruit juices by a thermal resistance model. *Journal of Food Science*, v.54, n.4, p.1007-1012. 1989.

BON, J., VÁQUIRO, H., BENEDITO, J. e TELIS-ROMERO, J. Thermophysical properties of mango pulp (mangifera indica l. Cv. Tommy Atkins). *Journal of Food Engineering*, v.97, n.4, p.563-568. 2010.

CASTRO, I., TEIXEIRA, J. A., SALENGKE, S., SASTRY, S. K. e VICENTE, A. A. The influence of field strength, sugar and solid content on electrical conductivity of strawberry products. *Journal of Food Process Engineering*, v.26, n.1, p.17-29. 2003.

CEPEDA, E. e VILLARÁN, M. C. Density and viscosity of malus floribunda juice as a function of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, v.41, n.2, p.103-107. 1999.

COIMBRA, J. S. R., GABAS, A. L., MINIM, L. A., GARCIA ROJAS, E. E., TELIS, V. R. N. e TELIS-ROMERO, J. Density, heat capacity and thermal conductivity of liquid egg products. *Journal of Food Engineering*, v.74, n.2, p.186-190. 2006.

CONSTENLA, D. T., LOZANO, J. E. 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.

HAYES, C. F. Thermal diffusivity of papaya fruit (*carica papaya* l., var. Solo). *Journal of Food Science*, v.49, n.4, p.1219-1219. 1984.

HWANG, M. P. e HAYAKAMA, K. A specific heat calorimeter for foods. *Journal of Food Science*, v.44, n.2, p.435-438 e 448. 1979.

IÇIER, F. e ILICALI, C. Electrical conductivity of apple and sourcherry juice concentrates during ohmic heating. *Journal of Food Process Engineering*, v.27, n.3, p.159-180. 2004.

IÇIER, F., YILDIZ, H. e BAYSAL, T. Polyphenoloxidase deactivation kinetics during ohmic heating of grape juice. *Journal of Food Engineering*, v.85, n.3, p.410-417. 2008.

KIM, S. S. e BHOWMIK, S. R. Thermophysical properties of plain yogurt as functions of moisture content. *Journal of Food Engineering*, v.32, n.1, p.109-124. 1997.

MADAIL, J. C. M. e SANTOS, A. M. D. Aspectos econômicos. In: M. D. C. B. Raseira e L. E. C. Antunes (Ed.). *A cultura do mirtilo*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. Aspectos econômicos, p.67

- MARYBETH, L., BRIAN F, H., LINDA L, B., SUE E, N. e SUDHIR K, S. Ascorbic acid degradation kinetics during conventional and ohmic heating. *Journal of Food Processing and Preservation*, v.23, n.5, p.421-443. 1999.
- MINIM, L. A., COIMBRA, J. S. R. e MINIM, V. P. R. I. Influence of temperature and water and fat contents on the thermophysical properties of milk. *Journal of Chemical & Engineering Data*, v.47, p.1488-1491. 2002.
- MOURA, S. C. S. R., FRANÇA, V. C. L. e LEAL, A. M. C. B. Propriedades termofísicas de soluções modelo similares a sucos - parte i. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.23, n.1, p.62-68. 2003.
- MOURA, S. C. S. R. D., GERMER, S. P. M., JARDIM, D. C. P. e SADAHIRAS, M. S. Thermophysical properties of tropical fruit juices. *Brazilian journal of food technology*, v.1, n.1-2, p.70-76. 1998.
- MOURA, S. C. S. R. D., VITALI, A. A. e HUBINGER, M. D. A study of water activity and electrical conductivity in fruit juices: Influence of temperature and concentration. *Brazilian journal of food technology*, v.2, n.1-2, p.31-38. 1999.
- PALANIAPPAN, S. e SASTRY, S. K. Electrical conductivities of selected solid foods during ohmic heating. *Journal of Food Process Engineering*, v.14, n.3, p.221-236. 1991a.
- PALANIAPPAN, S. e SASTRY, S. K. Electrical conductivity of selected juices: Influences of temperature, solids content, applied voltage, and particle size. *Journal of Food Process Engineering*, v.14, n.4, p.247-260. 1991b.
- PELACANI, V. P. e VIEIRA, J. A. G. Condutividade elétrica do suco de manga. *Alimentos e Nutrição Araraquara*, v.14, n.1, p.43-45. 2003.
- PEREIRA, B. Processamento agrega valor. *Frutas e Derivados*, n.3, 2006.
- PEREIRA, E. A., QUEIROZ, A. J. M. e FIGUEIRÊDO, R. M. F. Massa específica de polpa de açaí em função do teor de sólidos totais e da temperatura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, p.526-530. 2002.
- RAHMAN, S. *Food properties handbook* New York: CRC Press. 1995. 500 p.
- RAMOS, A. M. e IBARZ, A. Density of juice and fruit puree as a function of soluble solids content and temperature *Journal of Food Engineering*, v.35, p.57-63. 1998.
- SINGH, R. P. Thermal diffusivity in food processing. *Food Technology*, v.36, p.87-91. 1982.
- SOUZA, D., MARCZAK, L. D. F. e TESSARO, I. C. *Estudo das propriedades físicas de polpas e néctares de pequenos frutos*. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. 171 p.
- TELIS-ROMERO, J., TELIS, V. R. N., GABAS, A. L. e YAMASHITA, F. Thermophysical properties of brazilian orange juice as affected by temperature and water content. *Journal of Food Engineering*, v.38, n.1, p.27-40. 1998.
- ZAINAL, B. S., RAHMAN, A. R., ARIFF, A. B., SAARI, B. N. e ASBI, B. A. Effects of temperature on the physical properties of pink guava juice at two different concentrations. *Journal of Food Engineering*, v.43, n.1, p.55-59. 2000.