

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

Determinação das propriedades termofísicas, reológicas e físico-químicas nas polpas de frutas durante o resfriamento mediante ar por convecção natural

Fábio Henrique Ferreira Antunes

Porto Alegre

2014

Fábio Henrique Ferreira Antunes

Determinação das propriedades termofísicas, reológicas e físico-químicas nas polpas de frutas durante o resfriamento mediante ar por convecção natural

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Alimentos do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Dr. Cacio Pelayo Zapata Noreña

**Porto Alegre
2014**

Trabalho de Conclusão de Curso

Determinação das propriedades termofísicas, reológicas e físico-químicas nas polpas de frutas durante o resfriamento mediante ar por convecção natural

Fábio Henrique Ferreira Antunes

Aprovada em: __/__/____/

Dr. Caciano Pelayo Zapata Noreña
ICTA/UFRGS

Dra. Elizangela Gonçalves De Oliveira
ICTA/UFRGS

Dra. Giovana Domeneghini Mercali
ICTA/UFRGS

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todos os momentos de dedicação, confiança e amor que demonstraram ao longo destes anos para que pudesse atingir meus objetivos.

Ao meu orientador, pelas inúmeras contribuições ao longo dos últimos dias e, incansável dedicação pelo curso e seus alunos, buscando diariamente passar suas experiências profissionais de maneira ética e competente.

Aos demais amigos e familiares que contribuíram para a elaboração deste trabalho ao compartilharem comigo alegrias e tristezas ao longo deste período, em especial para Bruna, Flávia, Mariana, Fernanda, Lucas P., Lucas C. e Gustavo

“Desconfie do destino e acredite em você. Gaste mais horas realizando que sonhando, fazendo que planejando, vivendo que esperando... Porque, embora quem quase morre esteja vivo, quem quase vive, já morreu...”

Sarah Westphal

RESUMO

O objetivo do trabalho foi determinar as propriedades termofísicas, reológicas e físico químicas de três tipos de polpa de frutas: açai, frutas vermelhas (mistura de mirtilo, framboesa, morango e amora) e pitanga durante o resfriamento com ar em convecção natural. As propriedades mensuradas foram: difusividade térmica, coeficiente convectivo de troca de calor, números de Biot e Fourier, os parâmetros de troca de calor j e f de Ball, viscosidade aparente, atividade de água e sólidos solúveis totais. Os valores da difusividade térmica foram de $1,43 \pm 0,06 \text{ m}^2/\text{s}$, $1,50 \pm 0,06 \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,60 \pm 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$ para açai, frutas vermelhas e pitanga, respectivamente. Os valores obtidos para o parâmetro f de Ball foram de $4561,8 \pm 159,2 \text{ s}$, $4519,1 \pm 118,0 \text{ s}$ e $4389,4 \pm 275,6 \text{ s}$, e para o parâmetro j os valores determinados foram $1,067 \pm 0,002$, $1,064 \pm 0,001$ e $1,062 \pm 0,002$ para açai, frutas vermelhas e pitanga, respectivamente. Os valores do número de Biot foram de $0,283 \pm 0,009$, $0,269 \pm 0,004$ e $0,260 \pm 0,011$ respectivamente para açai, frutas vermelhas e pitanga. O coeficiente convectivo de troca de térmica obtido foi de $0,899 \pm 0,011 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. A viscosidade aparente obtida foi de $417,7 \pm 13,6 \text{ cP}$, $288,0 \pm 12,0 \text{ cP}$ e $572,0 \pm 13,9 \text{ cP}$ para açai, frutas vermelhas e pitanga, respectivamente. Os valores para atividade de água obtidos foram de $0,993 \pm 0,006$, $0,995 \pm 0,001$ e $0,998 \pm 0,002$ para açai, frutas vermelhas e pitanga, respectivamente.

Palavras-chave: Difusividade térmica, polpa de frutas, coeficiente convectivo.

ABSTRACT

In the present monography the thermophysical properties were determined in three kinds of fruit pulp: acai berry, red fruits (mix of blueberry, cranberry, strawberry and blackberry) and pitanga, during natural-convection air cooling. The measured properties were: thermal diffusivity, convective coefficient of heat exchange, Biot and Fourier numbers, the parameters of exchange j e f heat Ball, apparent viscosity, water activity and total soluble solids. The values of thermal diffusivity were $11,43 \pm 0,06 \text{ m}^2/\text{s}$, $1,50 \pm 0,06 \text{ m}^2/\text{s}$ and $1,60 \pm 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$ for acai berry, red fruits and pitanga, respectively. The values obtained for the parameter f Ball were $4561,8 \pm 159,2 \text{ s}$, $4519,1 \pm 118,0 \text{ s}$ and $4389,4 \pm 275,6 \text{ s}$, and the parameter j for the determined values were $1,067 \pm 0,002$, $1,064 \pm 0,001$ e $1,062 \pm 0,002$ for acai berry, red fruits and pitanga, respectively. The values of the Biot number were $0,283 \pm 0,009$, $0,269 \pm 0,004$ e $0,260 \pm 0,011$ respectively for acai berry, red fruits and pitanga. The convective coefficient of heat transfer obtained was $0,899 \pm 0,011 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. The obtained apparent viscosity was $417,7 \pm 13,6 \text{ cP}$, $288,0 \pm 12,0 \text{ cP}$ e $572,0 \pm 13,9 \text{ cP}$ for acai berry, red fruits and pitanga, respectively. The values for water activity obtained were $0,993 \pm 0,006$, $0,995 \pm 0,001$ e $0,998 \pm 0,002$ for acai berry, red fruits and pitanga, respectively.

Keywords: Thermal diffusivity, fruit pulp, convective coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cilindro de aço inox para processo de resfriamento das polpas de frutas.	30
Figura 2 - Curva de resfriamento da polpa de Açaí.	37
Figura 3 - Curva de resfriamento da polpa de Frutas Vermelhas.	39
Figura 4 - Curva de resfriamento polpa de Pitanga.	39
Figura 5 - Curvas de resfriamento em função do número de Fourier para as três polpas.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação em função do clima para as frutas.....	17
Tabela 2 - Difusividade térmica experimental e número de Biot obtida para as polpas.	40
Tabela 5 – Viscosidade, atividade de água e Sólidos solúveis obtidos para as três polpas de fruta.....	44

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (m ²);
a	Coefficiente angular;
a_w	Atividade de água;
b	Termo independente;
B_i	Número de Biot;
C_p	Calor específico (KJ/kg.°C);
f	Termo f de Ball (inverso do coeficiente angular) (s);
F_o	Número de Fourier;
h	Coefficiente convectivo de calor (W ² /m.°C);
j	Coefficiente de intersecção da porção linear da curva de penetração de calor;
J_0	Função de Bessel de ordem zero;
J_1	Função de Bessel de primeira ordem;
k	Condutividade térmica (W/m.°C);
k_s	Condutividade térmica do sólido (W/m.°C);
L_c	Comprimento característico (m);
n	Vetor n ;
P	Pressão de vapor do alimento (Pa);
P_o	Pressão de vapor da água (Pa);
Q_n	Fluxo de condução;
r	Coordenada radial (m);
R	Raio (m);
T	Temperatura (°C);
t	Tempo (s);
$T_{(r,0)}$	Temperatura inicial na posição r (°C);
T_0	Temperatura inicial (°C);
T_∞	Temperatura do fluido de resfriamento (°C);
T_i	Temperatura em determinado tempo (°C);
T_{pic}	Temperatura pseudo inicial (°C);
T_s	Temperatura da Superfície (°C);

V	Volume (m ³);
α	Difusividade térmica (m ² /s);
ΔT	Variação da Temperatura (°C);
λ_n	Raiz n;
λ_l	Raiz;
μ	Viscosidade absoluta (cP);
ρ	Massa específica (kg/m ³);
τ_{yx}	Tensão de cisalhamento (Pa);

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
2.1 Objetivos específicos	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Difusividade Térmica	18
3.2 Número de Biot	19
3.3 Número de Fourier	19
3.4 Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor	20
3.5 Relações matemáticas para a troca de calor.....	21
3.6 Determinação dos parâmetros j e f de Ball	23
3.7 Viscosidade Aparente	23
3.8 Atividade de Água.....	24
3.9 Porcentagem de sólidos solúveis (°BRIX)	25
4 ARTIGO	26
1 INTRODUÇÃO.....	28
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
2.1 Material	29
2.2 Procedimento Experimental.....	30
2.3 Determinação da Difusividade Térmica para Geometria de Cilindro Infinito.....	31
2.4 Determinação do f e j de Ball	33
2.5 Determinação do Número de Biot	33
2.6 Determinação do Coeficiente Convectivo	33
2.7 Determinação do Número de Fourier	34
2.8 Determinação Viscosidade Aparente	34
2.9 Determinação da Atividade de Água e Sólidos Solúveis	35
2.10 Análises Matemáticas e Estatísticas	35
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
3.1 Procedimento Experimental.....	36
3.2 Determinação da Difusividade Térmica	40
3.3 Determinação do Número de Biot	41

3.4 Determinação de j e f de Ball.	42
3.5 Determinação do Coeficiente Convectivo.....	43
3.6 Viscosidade, Atividade de Água e Sólidos Solúveis nas Polpas	44
4 CONCLUSÕES	46
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de alimentos os processos térmicos são essenciais durante a produção. Por esta razão, o desenvolvimento de equipamentos e a otimização da linha de produção são muito importantes. Através do conhecimento das propriedades térmicas dos alimentos é possível projetar e otimizar equipamentos em uma linha de produção de alimentos. Com isso, há a garantia de alimentos seguros, sem que haja elevada perda nutricional e/ou organoléptica no produto final. Entretanto, poucos dados são encontrados na literatura, em especial de polpas e sucos de frutas tropicais, apesar do intenso estudo na área.

As propriedades termofísicas dos alimentos têm sido amplamente estudadas, modelos de predição e novos métodos de determinação são propostos, revisões são realizadas e um grande número de produtos tem suas propriedades analisadas. No entanto, existem poucos dados relativos a propriedades termofísicas de sucos e polpas de frutas tropicais (SILVA, 1997). Trocadores de calor, bombas e demais equipamentos são utilizados na indústria de alimentos, dependendo de tais propriedades para que seu desempenho seja eficiente no processo produtivo.

O Brasil é o terceiro maior produtor de frutas do mundo, segundo a Food and Agriculture Organization (2013), com uma produção estimada, no ano de 2010, em cerca de 38,793 milhões de toneladas. Entretanto, o país está apenas em 12º lugar em volume de exportação e estima-se que 40% dessa produção seja perdida ao longo de toda a cadeia produtiva (FACHINELLO; NACHTIGAL; KERSTEN, 2006). As perdas atingem montantes expressivos nos trópicos e são especialmente relacionadas com produtos perecíveis produzidos nestas regiões. Além disso, a disponibilidade destes frutos é sazonal, ou seja, haverá consumo apenas durante o período da safra (CHITARRA; CHITARRA, 2005). Por isso o processamento destes frutos se torna necessário, garantindo a disponibilidade durante todo o ano, reduzindo as perdas devido à elevada atividade metabólica.

O setor industrial de produção de polpas de frutas congeladas vem se expandindo nos últimos anos. Consumidores que buscam informações sobre alimentação saudável e também os avanços nas tecnologias de conservação auxiliam este crescimento, segundo Satin & Santos (2009), citado por Costa et al. (2013). A polpa de fruta congelada possui grande importância como matéria-prima, uma vez que, após produzida durante a sua safra regular pode ser armazenada por longos períodos, sendo utilizada de acordo com a demanda nos mais variados

mercados consumidores, desde o consumidor final até o seu emprego na produção de geleias, sorvetes, néctares entre outros produtos industrializados (COSTA et al., 2013).

Segundo Brasil (2000), polpa de fruta é a designação do produto obtido da parte comestível de uma ou mais frutas com um teor máximo e mínimo de sólidos totais, de acordo com a fruta utilizada. A polpa será considerada mista quando houver a mistura de duas ou mais polpas e, para tanto, será necessária a identificação na rotulagem com a designação “mista” e a descrição de quais polpas foram utilizadas. Esta legislação possui âmbito nacional, sendo regulamentada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

O processo de resfriamento das frutas e suas polpas deve ser o mais rápido possível pois, dessa forma, é garantida a redução da taxa de respiração e ação dos micro-organismos. Na indústria de alimentos o resfriamento rápido pode ser feito de diferentes formas: ar, ar forçado, água gelada, gelo e resfriamento a vácuo (FRASER, OTTEN, 1992; MITCHELL, 1972).

Ao encontro destas justificativas, o presente trabalho tem como objetivo a avaliação das propriedades termofísicas de polpas comerciais. Os experimentos realizados determinaram os valores da difusividade térmica, do coeficiente convectivo, da viscosidade aparente, do número de Biot, do número de Fourier, dos coeficientes f e j de Ball, dos sólidos solúveis totais e da atividade de água.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Determinar as propriedades termofísicas, reológicas e físico-químicas das polpas de frutas comerciais: açaí, pitanga e frutas vermelhas (morango, framboesa, amora e mirtilo; com a mesma proporção de cada fruta), durante o processo de resfriamento mediante ar frio por convecção natural.

2.1 Objetivos específicos

Os objetivos do presente trabalho são:

- Determinar a difusividade térmica das polpas de frutas durante o processo de resfriamento;
- Determinar o número de Biot e o número de Fourier durante o processo de resfriamento de polpas;
- Determinar o coeficiente convectivo das polpas de frutas durante o processo de resfriamento;
- Determinar os parâmetros de j e f de Ball a partir das curvas de resfriamento das polpas de frutas;
- Determinar a viscosidade aparente das polpas de frutas na temperatura de 25°C;
- Determinar a atividade de água e a concentração de sólidos solúveis totais (°BRIX) das polpas de fruta.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente, o Brasil produz 12% da produção mundial de frutas (FAO, 2013). Dentro deste percentual encontram-se diversos tipos de frutas tropicais, subtropicais e até de clima temperado, sendo esta diversidade produtiva diretamente relacionada com os diferentes climas e tipos de solo encontrados no país (FACHINELLO; NACHTIGAL; KERSTEN, 2006). A classificação de acordo com o clima: tropical, subtropical e temperado está de acordo com três fatores principais: resistência ou não às baixas temperaturas, temperatura média anual do ecossistema e número de ciclos vegetativos que ocorrem durante um ano, ou seja, número de vezes durante o ano que a planta consegue produzir frutos (CHITARRA; CHITARRA, 2005). Na Tabela 1 são descritas tais características, de acordo com a Embrapa (2007).

Tabela 1 - Classificação em função do clima para as frutas.

Classificação	Resistência ao frio	Temperatura média anual	Ciclos vegetativos anuais
Tropical	Não tolera	Entre 22 e 30°C	Pode ter mais de 1
Subtropical	Pouca resistência	Entre 15 e 22°C	Mais de 1
Temperado	Maior resistência	Entre 5 e 15°C	Apenas 1

Fonte: O autor (2014)

Os frutos também podem ser classificados de acordo com o processo respiratório que ocorre durante seu amadurecimento. Assim, os climatéricos são aqueles que durante o processo de amadurecimento possuem elevação na taxa respiratória (BRASIL, 2007). Tal processo é regulado através do etileno, hormônio exógeno, responsável pelo aumento na respiração do fruto e na estimulação das enzimas do amadurecimento. Já os não-climatéricos apresentam um declínio constante nas taxas respiratórias até atingir a fase de senescência. Tal diferença modifica a forma como são tratadas e conservadas durante o processo produtivo. Frutas climatéricas podem ser colhidas antes do seu amadurecimento completo e posteriormente podem ter o processo de amadurecimento iniciado através da aplicação de etileno, o mesmo não ocorre para as não-climatéricas. (FACHINELLO; NACHTIGAL; KERSTEN, 2006).

Frutas tropicais possuem elevada taxa de respiração, por isto o processo metabólico é acelerado. Sendo assim, o amadurecimento ocorre rapidamente, resultando em uma fruta imprópria para o consumo em poucos dias, tornando o acesso a este alimento apenas local e

sazonal (CHITARRA; CHITARRA, 2005). Associado a este problema está o fato de que as frutas tropicais não podem ser conservadas em temperaturas muito baixas por sofrerem estresse pelo frio. Com isso não há redução de temperatura suficiente para impedir que reações metabólicas ou crescimento microbológico reduzam o suficiente para a manutenção da fruta *in natura* (FACHINELLO; NACHTIGAL; KERSTEN, 2006). Por estes motivos, o processo de industrialização permite que frutas tropicais e não tropicais estejam disponíveis para o consumo humano ao longo do ano e nos mais variados locais.

O conhecimento das propriedades termofísicas dos alimentos é necessário para a realização dos cálculos envolvidos no projeto de equipamentos de refrigeração e armazenamento de alimentos. Estas propriedades são importantes para determinar a variação da temperatura no alimento durante o seu processamento e também estimar carga térmica e tempo de resfriamento (RESENDE; SILVEIRA JUNIOR, 2002).

Segundo Mascheroni (2012), as perdas com fruta *in natura* são de 5 a 25% em países desenvolvidos e de 20 a 50% em países em desenvolvimento. No Brasil, país que produz 12% das frutas de todo o mundo (FAO, 2013), as perdas chegam a 40% do total produzido ao longo do ano. Estas são perdas geradas ao longo da cadeia produtiva, ou seja, desde o início da produção até o consumidor final (EMBRAPA, 2007). Com objetivo de reduzir a perda durante o processo produtivo, há uma crescente demanda para a produção de frutas congeladas ou suas polpas.

3.1 Difusividade Térmica

Segundo Incropera e Dewitt (2012), a difusividade térmica é a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação a sua capacidade de armazená-la, ou seja, elevados valores de difusividade térmica conduzem o calor pelo seu corpo com maior velocidade. Tal propriedade é afetada pela atividade de água, temperatura e composição química, pois estes desempenham um papel fundamental na determinação do calor específico, massa específica e condutividade térmica. Estas três propriedades são utilizadas na equação para obter a difusividade térmica como se pode verificar na equação abaixo:

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

Onde α é a difusividade térmica k é a condutividade térmica, ρ é a massa específica e C_p é o calor específico.

De acordo com a equação (1) esta propriedade é a razão entre a capacidade de conduzir o calor e a quantidade de energia por volume, armazenada no produto, pois as propriedades ρ e C_p quando multiplicadas representam esta característica de armazenamento (INCROPERA; DEWITT, 2012; ÇENGEL 2009). Além disso, a difusividade térmica tem grande importância quando a transferência de calor se realiza sob a forma transiente (SILVA, 1997), principalmente porque através desta propriedade é possível determinar a taxa com que ocorre a perda ou ganho de calor nos alimentos.

3.2 Número de Biot

O número de Biot é um parâmetro adimensional que representa a razão entre a resistência de condução de calor sobre a resistência de convecção (INCROPERA; DEWITT, 2012). Por esta razão, o Biot possui grande importância na resolução de problemas de condução de calor que envolva, também, efeitos convectivos na superfície (ÇENGEL, 2009). Matematicamente o número de Biot é obtido através da razão entre convecção de calor sobre a condução de calor, como podemos verificar na equação (2):

$$B_i = \frac{h.L_c}{k} = \frac{\text{Convecção na superfície do corpo}}{\text{Condução dentro do corpo}} \quad (2)$$

Onde B_i é o número de Biot, k é a condutividade térmica, L_c é o comprimento e h é o coeficiente convectivo de transferência de calor.

3.3 Número de Fourier

O número de Fourier é uma medida do calor conduzido através de um corpo em relação ao calor armazenado no mesmo (ÇENGEL, 2009). Além disso, o número de Fourier tem grande importância na análise de transferência de calor pois, através de seu auxílio, problemas complexos relacionados a transferência de calor podem ser simplificados (adimensionalização) tornando-os mais simples. O número de Fourier é definido de acordo com a equação (3):

$$F_o = \frac{\alpha \cdot t}{L_c^2} = \frac{k \cdot L_c^2 \cdot \left(\frac{1}{L_c}\right)}{\rho \cdot C_p \cdot (L_c^3/t)} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta T} \quad (3)$$

Onde F_o é o número de Fourier, α é a difusividade térmica, t é o tempo, L_c é o comprimento, k é a condutividade térmica, ρ é a massa específica, C_p é o calor específico e ΔT variação da temperatura.

3.4 Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor

O coeficiente convectivo é definido como sendo a taxa de transferência de calor entre uma superfície sólida e o fluido que o rodeia, por unidade de área e por unidade de diferença de temperatura (ÇENGEL, 2009). O coeficiente convectivo se estabelece em função do formato do sólido e, também, das condições de resfriamento. A equação (4) é utilizada didaticamente para a obtenção dessa propriedade (INCROPERA; DEWITT, 2012; ÇENGEL, 2009).

$$h = \frac{-k_s \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}}{T_s - T_\infty} \quad (4)$$

Onde h é o coeficiente convectivo, $\partial T/\partial x|_{(x=0)}$ é o gradiente de temperatura em função de x , neste caso considerando x próximo a superfície, T_s é a temperatura na superfície, T_∞ é a temperatura do fluido e k_s é a condutividade térmica do sólido.

Esse coeficiente tem importância vital para os cálculos de carga térmica e dimensionamento de equipamentos. Entretanto, a sua determinação é bem complexa o que torna o seu estudo difícil. Tal complexidade se deve ao fato desta propriedade ser muito sensível a alterações na condição do fluxo de calor ou elementos que nela interagem (INCROPERA; DEWITT, 2012).

3.5 Relações matemáticas para a troca de calor

A segunda lei de Fourier, ou a lei de condução térmica, determina a forma como o calor é transmitido através dos corpos em estado transiente (ARPAÇI, 1966). A equação (5) representa a relação geral para a lei de condução de calor de Fourier.

$$Q_n = -k_s A \frac{\partial T}{\partial n} \quad (5)$$

Onde Q_n é o fluxo de condução de calor, $\partial T/\partial n$ é o gradiente de temperatura variando no eixo n , A é a área normal ao fluxo de calor e k_s é a condutividade térmica do sólido.

Realizando um balanço de energia para o fluxo de calor através de um corpo cilíndrico infinito, com coordenada radial r , medida a partir do centro do cilindro, de raio R , obtém-se a equação (6) para a condução do calor (PFLUG, 1965; ERDOGDU; LINKE; PRAEGER; GEYER; SHÜLTER, 2008):

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

As condições iniciais e de contorno são:

$$T_{(r,0)} = T_i \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (8)$$

$$-k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h \cdot [T_{(R,t)} - T_\infty] \quad (9)$$

Integrando a equação (6), com as condições iniciais e de contorno descritas acima, obtemos a seguinte solução do problema de transferência de calor para o cilindro infinito (PFLUG, 1965; ERDOGDU; LINKE; PRAEGER; GEYER; DHÜLTER 2008):

$$\frac{T_{(r,t)}-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{\lambda_n} \cdot \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n)+J_1^2(\lambda_n)} \cdot J_1 \left(\lambda_n \cdot \frac{r}{R} \right) \cdot \exp(-\lambda_n^2 \cdot F_o) \right] \quad (10)$$

Onde F_o ($F_o=\alpha \times t/R^2$) é o número de Fourier, R é o raio e λ_n são as raízes da Equação (11)

$$B_i = \lambda_1 \cdot \frac{J_1(\lambda_1)}{J_0(\lambda_1)} \quad (11)$$

Onde B_i é o número de Biot, J_0 e J_1 são funções de Bessel de zero e primeira ordem.

Com estas informações iniciais e garantindo que o número de Fourier seja maior que 0,2 durante o processo de resfriamento, uma vez que o comportamento da reta será linear, é possível utilizar somente o primeiro termo da série, pois os demais termos do somatório não influenciam estatisticamente no resultado final (ERDOGDU; LINKE; PRAEGER; GEYER; SHÜLTER; LINKE; PRAEGER; GEYER; SHÜLTER, 2014), podendo ser expressa na sua forma simplificada como:

$$\ln \left[\frac{T_{(r,t)}-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}} \right] = - \frac{\lambda_1^2 \cdot \alpha}{R^2} \cdot t + \left\{ \ln \left[\frac{2}{\lambda_1} \cdot \frac{J_1(\lambda_1)}{J_0^2(\lambda_1)+J_1^2(\lambda_1)} \cdot J_1 \left(\lambda_1 \cdot \frac{r}{R} \right) \right] \right\} \quad (12)$$

Podemos observar que a equação (12) que o termo $J_1(\lambda_1 \times (r \times R^{-1}))$, quando $r=0$ o valor de J_1 será 1, podendo ser simplificar a equação (13) para:

$$\ln \left[\frac{T_{(r,t)}-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}} \right] = - \frac{\lambda_1^2 \cdot \alpha}{R^2} \cdot t + \left\{ \ln \left[\frac{2}{\lambda_1} \cdot \frac{J_1(\lambda_1)}{J_0^2(\lambda_1)+J_1^2(\lambda_1)} \right] \right\} \quad (13)$$

A equação (13) linearizada, tem a forma da equação genérica $y= a \times x + b$, onde o coeficiente angular (a) e o termo independente (b) são respectivamente:

$$a = - \frac{\lambda_1^2 \cdot \alpha}{R^2} \quad (14)$$

$$b = \left\{ \ln \left[\frac{2}{\lambda_1} \cdot \frac{J_1(\lambda_1)}{J_0^2(\lambda_1) + J_1^2(\lambda_1)} \right] \right\} \quad (15)$$

3.6 Determinação dos parâmetros j e f de Ball

Os valores de f e j representam o inverso do coeficiente angular e o coeficiente de intersecção da porção linear da curva de penetração de calor no alimento equação (16). Segundo Pflug (1965), f representa o decréscimo de 90% da temperatura durante o processo de resfriamento. Já o parâmetro j representa o denominado fator *lag* da curva de resfriamento, que é a assíntota da curva de resfriamento, definida pela equação (17), onde o valor de T_{pic} , representa a temperatura pseudo inicial de resfriamento, que corresponde à extrapolação da porção reta do $\log((T-T_\infty)/(T_i-T_\infty))$ no tempo zero de resfriamento.

$$\log \left(\frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty} \right) = \log(j) - \frac{1}{f} \times t \quad (16)$$

$$j = \frac{T_{pic} - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (17)$$

A determinação destes parâmetros é importante, uma vez que f é inversamente proporcional a difusividade térmica e j é diretamente proporcional ao número de Biot, segundo Pflug (1965). Com isto, podemos avaliar de maneira indireta o comportamento das propriedades térmicas e validar os resultados experimentais.

3.7 Viscosidade Aparente

A viscosidade é uma medida do atrito interno do fluido ou sua resistência à deformação (FOX, 2006). Existem diversos tipos de fluidos, o mais comum é conhecido como fluido Newtoniano, substâncias tais como água, ar e gasolina apresentam esta característica. Na equação (18) é representada a equação que descreve a lei de Newton da viscosidade para escoamentos unidimensionais.

$$\tau_{yx} = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (18)$$

Onde τ_{yx} é a tensão de cisalhamento, μ é a viscosidade absoluta e du/dy é taxa de deformação (taxa de cisalhamento).

Segundo Lago; Bernstein; Brandelli; Noreña (2011), o conhecimento da viscosidade, na área de alimentos, auxilia na elaboração de projetos, avaliação de processos, controle de qualidade, teste de vida de prateleira, entre outros. Além disso, devido à complexidade da estrutura há muita variação na viscosidade entre os alimentos (TABILO-MUNIZAGA e BARBOSA-CÁNOVAS, 2005)

3.8 Atividade de Água

O termo atividade de água representa a intensidade da ligação entre a água e outros componentes não-aquosos e, conseqüentemente, a água disponível para o crescimento de micro-organismos, reações químicas e bioquímicas (ORDÓNEZ et. al. 2005).

Quando há a mistura entre a água e um soluto, as moléculas de água se distribuem ao longo da superfície do soluto e inter-relacionam-se com ele (MOURA et al., 1998). Estas novas interações moleculares fazem com que diminua o ponto de congelamento, aumente o ponto de ebulição e reduza a pressão de vapor, segundo a lei de Raoult, indicando que esta redução é igual à fração molar do solvente. A atividade de água é a razão entre a pressão de vapor da água em uma solução ou em um alimento em relação à pressão de vapor da água pura a mesma temperatura, equação (19) (LAGO; BERNSTEIN; BRANDELLI; NOREÑA, 2011).

$$a_w = \frac{P}{P_o} \quad (19)$$

A importância no controle da atividade de água nos alimentos de alta umidade ($0,90 > a_w$) e umidade intermediária ($0,65 < a_w < 0,90$) tem estimulado diversos autores a estudar esta propriedade. Frutas in natura possuem atividade de água superior a 0,98, por isso, na temperatura ambiente, o crescimento de micro-organismo e reações químicas e bioquímicas tem processo muito acelerado nestes alimentos (ORDÓNEZ et. al. 2005).

3.9 Porcentagem de sólidos solúveis (°BRIX)

Constituídos, principalmente por açúcares (exceto a celulose e seus derivados) e sais dissolvidos, os sólidos solúveis normalmente são expressos em °Brix. Segundo Tucker (1993), cada cultivar apresenta diferentes concentrações de sólidos solúveis, entretanto é um consenso que a medida em que estes amadurecem a concentração aumenta (ANDREUCETTI, 2005). Nas frutas e seus derivados os sólidos solúveis são importantes compostos responsáveis pelo sabor e conseqüentemente pela aceitação por parte dos consumidores (EMBRAPA, 2007).

A medida de índice de refração pode ser usada para determinar a concentração de sólidos solúveis totais de uma solução. A variação da concentração altera o ângulo de desvio da luz, medindo a intensidade do desvio podemos determinar a concentração dos sólidos solúveis em razão da medida da água pura (ANDREUCETTI, 2005).

4 ARTIGO

Determinação das propriedades termofísicas, reológicas e físico-químicas nas polpas de frutas comerciais

(Artigo a ser submetido para publicação em revista a ser definida).

RESUMO

Neste trabalho, foram determinadas as propriedades termofísicas, reológica e físico-químicas de três tipos de polpa de frutas: açaí, frutas vermelhas (mistura de mirtilo, framboesa, morango e amora) e pitanga durante o resfriamento com ar em convecção natural. As propriedades mensuradas foram: difusividade térmica, coeficiente convectivo de troca de calor, números de Biot e Fourier, os parâmetros de troca de calor j e f de Ball, viscosidade aparente, atividade de água e sólidos solúveis totais. Os valores da difusividade térmica foram de $1,43 \pm 0,06 \text{ m}^2/\text{s}$, $1,50 \pm 0,06 \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,60 \pm 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$ para açaí, frutas vermelhas e pitanga, respectivamente. Os valores obtidos para o parâmetro f de Ball foram de $4561,8 \pm 159,2\text{s}$, $4519,1 \pm 118,0\text{s}$ e $4389,4 \pm 275,6\text{s}$, e para o parâmetro j os valores determinados foram $1,067 \pm 0,002$, $1,064 \pm 0,001$ e $1,062 \pm 0,002$ para açaí, frutas vermelhas e pitanga, respectivamente. Os valores do número de Biot foram de $0,283 \pm 0,009$, $0,269 \pm 0,004$ e $0,260 \pm 0,011$ respectivamente para açaí, frutas vermelhas e pitanga. O coeficiente convectivo de troca de térmica obtido foi de $0,899 \pm 0,011 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$. A viscosidade aparente obtida foi de $417,7 \pm 13,6 \text{ cP}$, $288,0 \pm 12,0 \text{ cP}$ e $572,0 \pm 13,9 \text{ cP}$ para açaí, frutas vermelhas e pitanga, respectivamente. Os valores para atividade de água obtidos foram de $0,993 \pm 0,006$, $0,995 \pm 0,001$ e $0,998 \pm 0,002$ para açaí, frutas vermelhas e pitanga, respectivamente. Os valores para sólidos solúveis obtidos foram de $3,75 \pm 0,80$, $4,90 \pm 0,10$ e $7,38 \pm 0,20$ para açaí, frutas vermelhas e pitanga, respectivamente.

Palavras-chave: Difusividade térmica, polpa de frutas, coeficiente convectivo.

ABSTRACT

In the present monography the thermophysical properties were determined in three kinds of fruit pulp: acai berry, red fruits (mix of blueberry, cranberry, strawberry and blackberry) and pitanga, during natural-convection air cooling. The measured properties were: thermal diffusivity, convective coefficient of heat exchange, Biot and Fourier numbers, the parameters of exchange j e f heat Ball, apparent viscosity, water activity and total soluble solids. The values of thermal diffusivity were $11,43 \pm 0,06 \text{ m}^2/\text{s}$, $1,50 \pm 0,06 \text{ m}^2/\text{s}$ and $1,60 \pm 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$ for acai berry, red fruits and pitanga, respectively. The values obtained for the parameter f Ball were $4561,8 \pm 159,2 \text{ s}$, $4519,1 \pm 118,0 \text{ s}$ and $4389,4 \pm 275,6 \text{ s}$, and the parameter j for the determined values were $1,067 \pm 0,002$, $1,064 \pm 0,001$ e $1,062 \pm 0,002$ for acai berry, red fruits and pitanga, respectively. The values of the Biot number were $0,283 \pm 0,009$, $0,269 \pm 0,004$ e $0,260 \pm 0,011$ respectively for acai berry, red fruits and pitanga. The convective coefficient of heat transfer obtained was $0,899 \pm 0,011 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. The obtained apparent viscosity was $417,7 \pm 13,6 \text{ cP}$, $288,0 \pm 12,0 \text{ cP}$ e $572,0 \pm 13,9 \text{ cP}$ for acai berry, red fruits and pitanga, respectively. The values for water activity obtained were $0,993 \pm 0,006$, $0,995 \pm 0,001$ e $0,998 \pm 0,002$ for acai berry, red fruits and pitanga, respectively.

Keywords: Thermal diffusivity, fruit pulp, convective coefficient.

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de alimentos os processos térmicos são essenciais durante a produção. Por esta razão, o desenvolvimento de equipamentos e a otimização da linha de produção são fundamentais. Através do conhecimento das propriedades térmicas dos alimentos é possível projetar e otimizar equipamentos em uma linha de produção de alimentos. Com isso, há a garantia de alimentos seguros, sem que haja elevada perda nutricional e/ou organoléptica no produto final. Entretanto, poucos dados são encontrados na literatura, em especial de polpas e sucos de frutas tropicais, apesar do intenso estudo na área.

As propriedades termofísicas dos alimentos têm sido amplamente estudadas, modelos de predição e novos métodos de determinação são propostos, revisões são realizadas e um grande número de produtos tem suas propriedades analisadas. No entanto, existem poucos dados relativos a propriedades termofísicas de sucos e polpas de frutas tropicais (SILVA, 1997). Trocadores de calor, bombas e demais equipamentos são utilizados na indústria de alimentos, dependendo de tais propriedades para que seu desempenho seja eficiente no processo produtivo.

O Brasil é o terceiro maior produtor de frutas do mundo, segundo a FAO (2013), com uma produção estimada, no ano de 2010, em cerca de 38,793 milhões de toneladas. Entretanto, o país está apenas em 12º lugar em volume de exportação e estima-se que 40% dessa produção seja perdida ao longo de toda a cadeia produtiva (FACHINELLO; NACHTIGAL; KERSTEN, 2006). As perdas atingem montantes expressivos nos trópicos e são especialmente relacionadas com produtos perecíveis produzidos nestas regiões. Além disso, a disponibilidade destes frutos é sazonal, ou seja, haverá consumo apenas durante o período da safra (CHITARRA; CHITARRA, 2005). Por isso o processamento destes frutos se torna necessário, garantindo a disponibilidade durante todo o ano, reduzindo as perdas devido à elevada atividade metabólica.

O setor industrial de produção de polpas de frutas congeladas vem se expandindo nos últimos anos. Consumidores que buscam informações sobre alimentação saudável e também os avanços nas tecnologias de conservação auxiliam este crescimento, segundo Costa et al. (2013). A polpa de fruta congelada possui grande importância como matéria-prima, uma vez que, após produzida durante a sua safra regular pode ser armazenada por longos períodos, sendo utilizada de acordo com a demanda nos mais variados mercados consumidores, desde o consumidor final até o seu emprego na produção de geleias, sorvetes, néctares entre outros produtos industrializados (COSTA et al., 2013).

Segundo Brasil (2000), polpa de fruta é a designação do produto obtido da parte comestível de uma ou mais frutas com um teor máximo e mínimo de sólidos totais, de acordo com a fruta utilizada. A polpa será considerada mista quando houver a mistura de duas ou mais polpas e, para tanto, será necessária a identificação na rotulagem com a designação “mista” e a descrição de quais polpas foram utilizadas. Esta legislação possui âmbito nacional, sendo regulamentada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

O processo de resfriamento das frutas e suas polpas deve ser o mais rápido possível pois, dessa forma, é garantida a redução da taxa de respiração e ação dos micro-organismos. Na indústria de alimentos o resfriamento rápido pode ser feito de diferentes formas: ar, ar forçado, água gelada, gelo e resfriamento a vácuo (FRASER, OTTEN, 1992; MITCHELL, 1972).

O presente trabalho tem por objetivo avaliar as propriedades termofísicas, reológicas e físico-químicas das polpas comerciais durante o resfriamento com ar em convecção natural. Os experimentos realizados determinaram os valores da difusividade térmica, do coeficiente convectivo, da viscosidade aparente, do número de Biot, do número de Fourier, dos coeficientes f e j de Ball, dos sólidos solúveis totais e da atividade de água.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

As polpas de Açaí, frutas vermelhas (mistura de morango, framboesa, amora e mirtilo; na mesma proporção de cada fruta) e pitanga, da marca Demarchi em embalagem de 100g (Polpa de Açaí, lote 05709; Polpa de frutas vermelhas, lote 05719; Polpa de pitanga, lote 05698) foram adquiridas na Central de Abastecimento do Rio Grande do Sul, localizada em Porto Alegre. As polpas foram transportadas até o Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ICTA-UFRGS), com auxílio de uma bolsa térmica, e mantidas sob congelamento em um freezer vertical (Marca Steigleder, modelo: FC-245L) com temperatura de $-23,3 \pm 1,0$ °C até o momento de sua utilização.

2.2 Procedimento Experimental

Para determinar a difusividade térmica foi realizado o resfriamento em um cilindro, em aço inox, fabricado pela Ralf Winter, com tampas rosqueadas, sendo que uma unidade possuía locais apropriados para a fixação dos termopares, modelo PT100 (Figura 1), com as seguintes medidas: diâmetro de 3,7 cm e o comprimento de 20,5 cm. Com estas dimensões e aplicando a relação descrita por Incropera e Dewitt (2012) podemos considerar que o fluxo de calor ocorre através de um cilindro infinito, ou seja, a transferência de calor através das bases é tão pequena que pouco influencia na soma global de transferência de calor, podendo ser ignorado no cálculo. Para que tal fato ocorra, a razão entre o comprimento sobre o raio deve ser maior que 10 (INCROPERA; DEWITT, 2012). Neste experimento essa razão foi de 11,08.

As amostras foram previamente descongeladas com o auxílio do banho Laborota 4000, marca Heidolph, cuja temperatura foi de 25 ± 1 °C, até a temperatura da amostra atingisse aproximadamente 25 °C. A seguir, a amostra era introduzida dentro do tubo de aço inox e os termopares pt100 eram acoplados ao sistema para a medição da temperatura. Todo o sistema foi colocado, na posição horizontal, sobre uma superfície que erguia todos o sistema pelas pontas, permitindo que houvesse fluxo de ar na parte inferior do conjunto, dentro de um freezer horizontal (Marca Steigleder, modelo: FC-245L) cuja temperatura estável foi de $-23,3 \pm 1,0$ °C.

Para aquisição e registro de dados de temperaturas foi utilizado o registrador modelo Data Logger da marca Novus, com 8 canais e interface computacional, usando o software Field Chart versão 1.98.2. A coleta de temperaturas foi realizada a cada de 10 segundos.

Figura 1 - Cilindro de aço inox para processo de resfriamento das polpas de frutas.



2.3 Determinação da Difusividade Térmica para Geometria de Cilindro Infinito

A equação de transferência de calor para um cilindro infinito, de acordo com a segunda lei de Fourier é:

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

Para a solução da equação anterior, as condições iniciais e de contorno são:

$$T_{(r,0)} = T_i \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (3)$$

$$-k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h \cdot [T_{(R,t)} - T_{\infty}] \quad (4)$$

Integrando a equação (1), com as condições iniciais e de contorno descritas acima, obtêm-se a solução analítica de acordo com Pflug (1965):

$$\frac{T(r,t)-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{\lambda_n} \cdot \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n)+J_1^2(\lambda_n)} \cdot J_1\left(\lambda_n \cdot \frac{r}{R}\right) \cdot \exp(-\lambda_n^2 \cdot F_o) \right] \quad (5)$$

Onde F_o ($F_o=\alpha \times t/R^2$) é o número de Fourier, R é o raio e λ_n são as raízes da Eq (5)

$$B_i = \lambda_n \cdot \frac{J_n(\lambda_n)}{J_0(\lambda_n)} \quad (6)$$

B_i é o número de Biot, J_0 e J_1 são as funções de Bessel de zero e primeira ordem. Se o número de Fourier for maior que 0,2 de acordo com Erdogdu; Linke; Praeger; Geyer; Shülter; Linke; Praeger; Geyer; Shülter (2008), pode ser empregado somente o primeiro termo da série, uma vez que o comportamento da reta será linear, podendo ser expressa a equação (7) como:

$$\ln \left[\frac{T(r,t)-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}} \right] = - \frac{\lambda_1^2 \cdot \alpha}{R^2} \cdot t + \left\{ \ln \left[\frac{2}{\lambda_1} \cdot \frac{J_1(\lambda_1)}{J_0^2(\lambda_1)+J_1^2(\lambda_1)} J_1\left(\lambda_1 \cdot \frac{r}{R}\right) \right] \right\} \quad (7)$$

Se a troca de calor está sendo avaliada no centro do cilindro ($r = 0$), a equação (7) fica como:

$$\ln \left[\frac{T(0,t)-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}} \right] = - \frac{\lambda_1^2 \cdot \alpha}{R^2} \cdot t + \left\{ \ln \left[\frac{2}{\lambda_1} \cdot \frac{J_1(\lambda_1)}{J_0^2(\lambda_1)+J_1^2(\lambda_1)} \right] \right\} \quad (8)$$

Verificamos que a equação (8) na sua forma linear pode ser expressa como $y= a \times x + b$, onde o coeficiente angular (a) e o termo independente (b) são respectivamente:

$$a = - \frac{\lambda_1^2 \cdot \alpha}{R^2} \quad (9)$$

$$b = \left\{ \ln \left[\frac{2}{\lambda_1} \cdot \frac{J_1(\lambda_1)}{J_0^2(\lambda_1)+J_1^2(\lambda_1)} \right] \right\} \quad (10)$$

A difusividade térmica (α) é obtida a partir da equação (9), após determinado o valor de λ_l da equação (10) para o qual é utilizado métodos numéricos para a determinação dessa raiz.

2.4 Determinação do f e j de Ball

Os valores de j e f de Ball, foram obtidos a partir das equações (11) e (12) dadas por Pflug (1965), onde o valor da raiz λ_l , foi obtido da equação (10):

$$f = \frac{R^2}{\lambda_1^2 \cdot \alpha} \quad (12)$$

$$j = \frac{2J_1(\lambda_1)}{\lambda_1 \cdot (J_0^2(\lambda_1) + J_1^2(\lambda_1))} \quad (11)$$

2.5 Determinação do Número de Biot

De forma similar o número de Biot é determinado, a partir de λ_l , empregando a equação (13) (PFLUG, 1965):

$$B_i = \lambda_1 \cdot \frac{J_1(\lambda_1)}{J_0(\lambda_1)} \quad (13)$$

2.6 Determinação do Coeficiente Convectivo

Para a determinação do coeficiente convectivo foi utilizada a metodologia recomendada por Gaffney et al. (1982), com modificações, que consiste em obter o perfil de temperatura em função do tempo durante o resfriamento de um metal. O metal empregado foi o alumínio, na forma geométrica de cilindro, de 20cm de largura e 2,5 cm de diâmetro (dimensões que de acordo com Incropera e Dewitt (2012), corresponde a de um cilindro infinito). A massa específica (ρ) e o calor específico do alumínio (c_p) foram de 2.702 kg.m⁻³ e 903J.kg⁻¹.K⁻¹, respectivamente (VAN VLACK; MONTEIRO, 2003). Inicialmente, no cilindro de alumínio, foram inseridos três termo-resistores do tipo pt100, fixando dois nas laterais e um na base, foi

obtido o valor médio das temperaturas, nos três termopares. O cilindro foi previamente aquecido até atingir 50°C, na superfície. A seguir, o cilindro foi colocado num freezer horizontal, marca Steigleder, modelo FC-245L, cuja a temperatura média foi de -24,2°C ±1,2°C. O registro do perfil de temperatura em função do tempo foi obtido no registrador modelo Data logger da marca Novus.

De forma similar que nas polpas, foram obtidas as curvas de resfriamento, e o coeficiente convectivo h determinado da equação (14) (PFLUG, 1965):

$$\frac{T(r,t)-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}} = e^{-\frac{h \times A}{\rho \times C_p \times V} \times t} \quad (14)$$

2.7 Determinação do Número de Fourier

O número de Fourier foi determinado com intuito de obter a porção linear do gráfico de $\ln((T-T_{\infty}) \times (T_i-T_{\infty})^{-1})$ em função do tempo, já que, para valores maiores que 0,2, o fluxo de calor é maior que seu acúmulo (ERDOGDU; LINKE; PRAEGER; GEYER; SHÜLTER; 2014) e, dessa forma, a maior parte do calor fornecido é transmitido ao longo do corpo garantindo uma transferência de calor constante ao longo do tempo (ÇENGEL, 2009).

2.8 Determinação Viscosidade Aparente

Para a determinação da viscosidade aparente (cP) foi utilizado um viscosímetro rotacional, (DV2T, Brookfield, USA), com temperatura controlada em 25 ± 1 °C através de um banho termoestático: metodologia adaptada segundo Lago; Bernstein; Brandelli; Noreña (2011). Para a realização do experimento de viscosidade foi utilizado o Spindle 63 e a rotação utilizado de 50rpm. As medidas foram realizadas em triplicata para cada amostra de polpa de fruta.

2.9 Determinação da Atividade de Água e Sólidos Solúveis

Na determinação experimental da atividade de água os valores foram obtidos através de leitura direta em medidor eletrônico (Aqualab 3TE-Decagon, Pullman, USA) método n°978;18 (AOAC, 1990). As medidas foram realizadas em triplicata para cada amostra de polpa de fruta.

Os valores experimentais para os sólidos solúveis totais foram obtidos através de leitura direta em um refratômetro digital (modelo Atago Pal-3; Atago, Taiwan, China) de acordo com o método n°932,12 (AOAC,1990).

2.10 Análises Matemáticas e Estatísticas

Para a determinação da raiz λ_1 , foram graficados os valores das funções de Bessel de ordem zero e primeira ordem, obtidos de Abramowitz e Stegun (2012), em função da raiz λ_1 (entre 0 e 2,4). A seguir, foram determinadas as equações que melhor fixaram os dados das funções de Bessel, sendo que os polinômios de 3ª ordem foram os escolhidos por terem coeficientes de determinação (r^2) de 0,999. Da equação (10) junto com a equação de terceira ordem, foi obtida a raiz λ_1 . Para a determinação da raiz, foi empregado o *software Maple*, versão 17.00, utilizando o método numérico de Newton-Raphson. Foi determinado o valor da raiz λ_1 para cada polpa de fruta.

$$\left\{ \ln \left[\frac{2}{\lambda_1} \cdot \frac{0,057 \times \lambda_1^3 - 0,323 \times \lambda_1^2 + 0,033 \times \lambda_1 + 0,997}{(0,057 \times \lambda_1^3 - 0,323 \times \lambda_1^2 + 0,033 \times \lambda_1 + 0,997)^2 + (-0,027 \times \lambda_1^3 - 0,071 \times \lambda_1^2 + 0,540 \lambda_1 - 0,004)^2} \right] \right\} =$$

$$6,346 \times 10^{-2} \quad r^2=0,999 \quad (15)$$

$$\left\{ \ln \left[\frac{2}{\lambda_1} \cdot \frac{0,057 \times \lambda_1^3 - 0,323 \times \lambda_1^2 + 0,033 \times \lambda_1 + 0,997}{(0,057 \times \lambda_1^3 - 0,323 \times \lambda_1^2 + 0,033 \times \lambda_1 + 0,997)^2 + (-0,027 \times \lambda_1^3 - 0,071 \times \lambda_1^2 + 0,540 \lambda_1 - 0,004)^2} \right] \right\} =$$

$$6,088 \times 10^{-2} \quad r^2=0,999 \quad (16)$$

$$\left\{ \ln \left[\frac{2}{\lambda_1} \cdot \frac{0,057 \times \lambda_1^3 - 0,323 \times \lambda_1^2 + 0,033 \times \lambda_1 + 0,997}{(0,057 \times \lambda_1^3 - 0,323 \times \lambda_1^2 + 0,033 \times \lambda_1 + 0,997)^2 + (-0,027 \times \lambda_1^3 - 0,071 \times \lambda_1^2 + 0,540 \lambda_1 - 0,004)^2} \right] \right\} =$$

$$5,899 \times 10^{-2} \quad r^2=0,999 \quad (17)$$

Os valores apresentados pelas equações (15), (16) e (17) representam a sessão linear da curva de resfriamento para as polpas de açaí, pitanga e frutas vermelhas, respectivamente.

Para o cálculo das médias e os desvios padrões foi empregado o software Excel 2013 versão 15.0.4667.1000.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Procedimento Experimental

As Figuras 2, 3 e 4 representam as curvas de resfriamento para as polpas de açaí, pitanga e frutas vermelhas ao longo do tempo. Podemos verificar nestas figuras que o comportamento linear teve início quando o número de Fourier se tornou superior a 0,2. Para as três amostras este intervalo de tempo foi de aproximadamente 500s a partir do início do processo de resfriamento e, tal comportamento linear, se estendeu até que a temperatura do centro do cilindro atingisse 0°C, momento em que era finalizado o experimento. Esse comportamento não linear, que acontece nos primeiros minutos de transferência de calor, deve-se ao tempo inicial do processo, para que ocorra a variação de temperatura nas regiões mais internas, denominado como *lag* (PFLUG, 1965). Este efeito se relaciona com as resistências internas e externas à troca do calor que existem nas polpas. Depois de transcorrido este tempo, é verificado o comportamento linear, com coeficientes de determinação (r^2) de 0,998, cujas equações são:

$$\ln \left[\frac{T_{(0,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right] = - 2,188 \times 10^{-4} \times t + 6,064 \times 10^{-2} \quad r^2 = 0,998 \quad (18)$$

$$\ln \left[\frac{T_{(0,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right] = - 2,273 \times 10^{-4} \times t + 5,746 \times 10^{-2} \quad r^2 = 0,998 \quad (19)$$

$$\ln \left[\frac{T_{(0,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right] = - 2,213 \times 10^{-4} \times t + 7,143 \times 10^{-2} \quad r^2 = 0,998 \quad (20)$$

Os valores apresentados pelas equações (18), (19) e (20) representam a sessão linear da curva de resfriamento para as polpas de açaí, frutas vermelhas e pitanga, respectivamente.

Na Figura 5 são apresentadas para as três polpas as curvas de resfriamento em função do número de Fourier, onde se observa que após 500 segundos os números de Fourier se tornam maiores que 0,2, verificando-se que pode ser empregada a equação (8) para o cálculo das propriedades térmicas. A porção linear da curva possui coeficientes de determinação de $r^2=0.998$, cujas equações se apresentam a continuação:

$$\ln \left[\frac{T_{(0,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right] = - 0,508 \times F_o + 0,045 \quad r^2 = 0,997 \quad (21)$$

$$\ln \left[\frac{T_{(0,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right] = - 0,485 \times F_o + 0,043 \quad r^2 = 0,997 \quad (22)$$

$$\ln \left[\frac{T_{(0,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right] = - 0,470 \times F_o + 0,042 \quad r^2 = 0,997 \quad (23)$$

Os valores apresentados pelas equações (21), (22) e (23) representam a sessão linear da curva de resfriamento para as polpas de açaí, pitanga e frutas vermelhas, respectivamente. Erdogdu; Linke; Praeger; Geyer; Shülter; et al. (2014) indica o uso apenas do primeiro termo da série da equação (10) quando os valores do número de Fourier forem superiores a 0,2, que no nosso caso constatou-se o uso da equação (12) como consequência do cumprimento desta condição.

Podemos verificar na Figura 5, que no início do processo do resfriamento as amostras apresentaram um comportamento similar entre elas. A partir do ponto onde o número de Fourier se torna superior a 0,2, podemos constatar o início da linearização da curva. Além disso, é neste momento que começam a se diferenciar entre si as curvas das diferentes polpas. A polpa de açaí foi a que apresentou a menor velocidade de difusão de calor.

Figura 2 - Curva de resfriamento da polpa de Açaí.

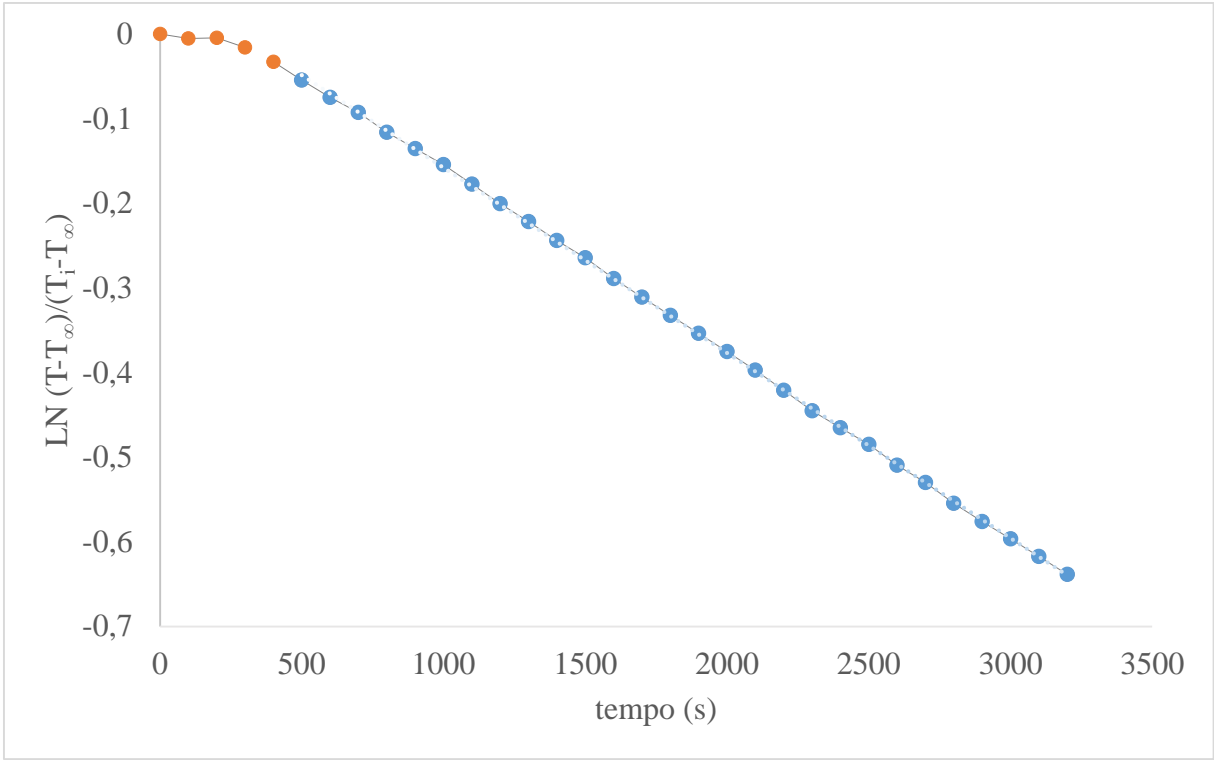


Figura 3 - Curva de resfriamento da polpa de Frutas Vermelhas

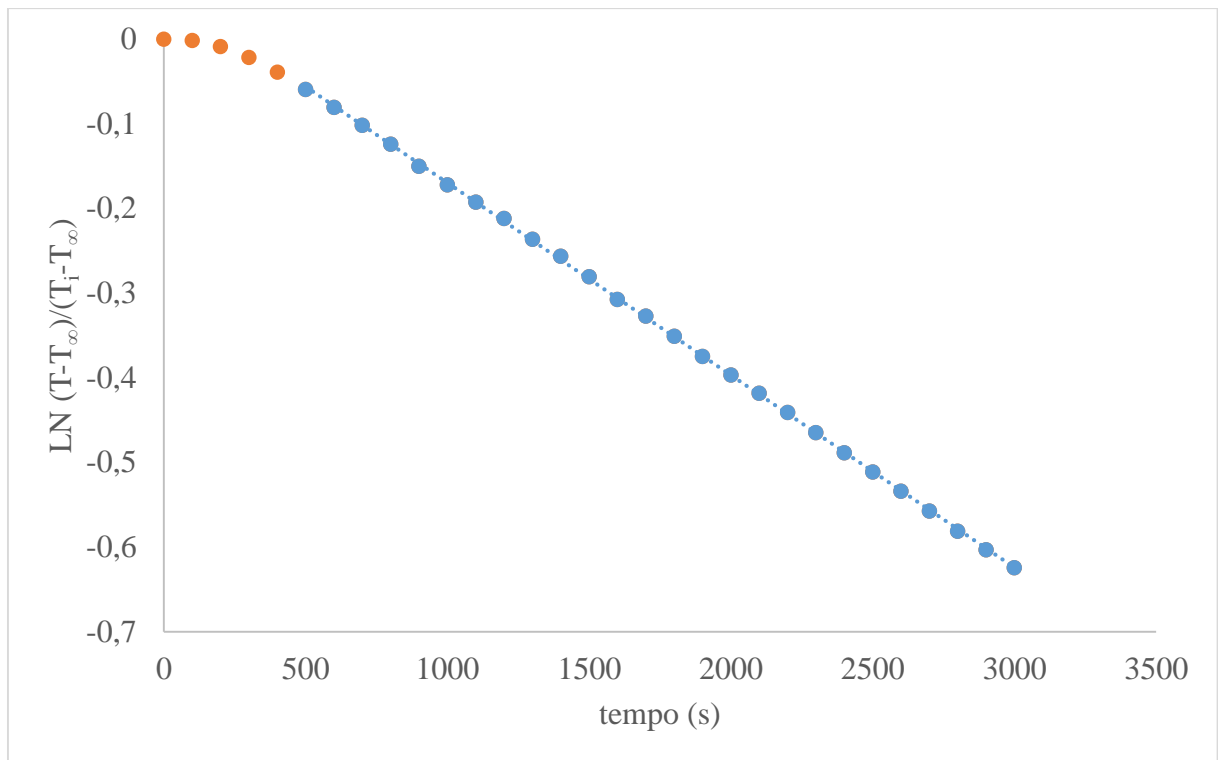


Figura 4 - Curva de resfriamento polpa de Pitanga

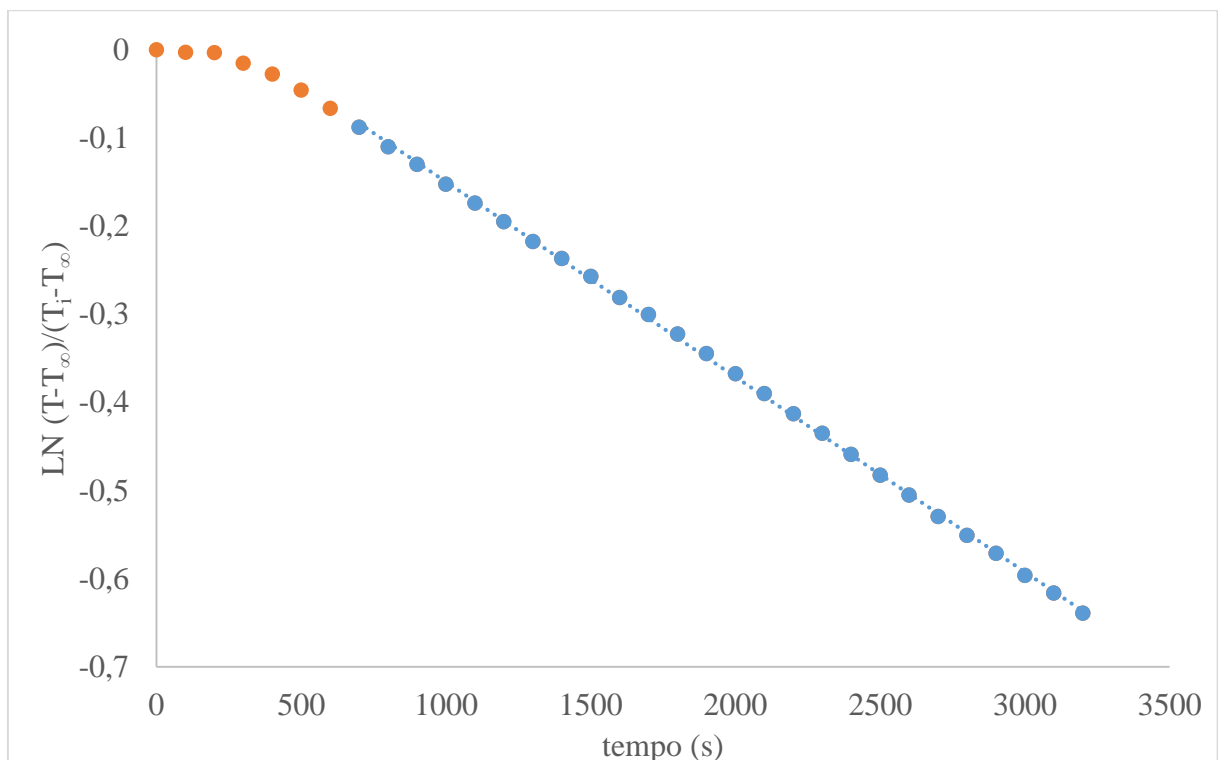
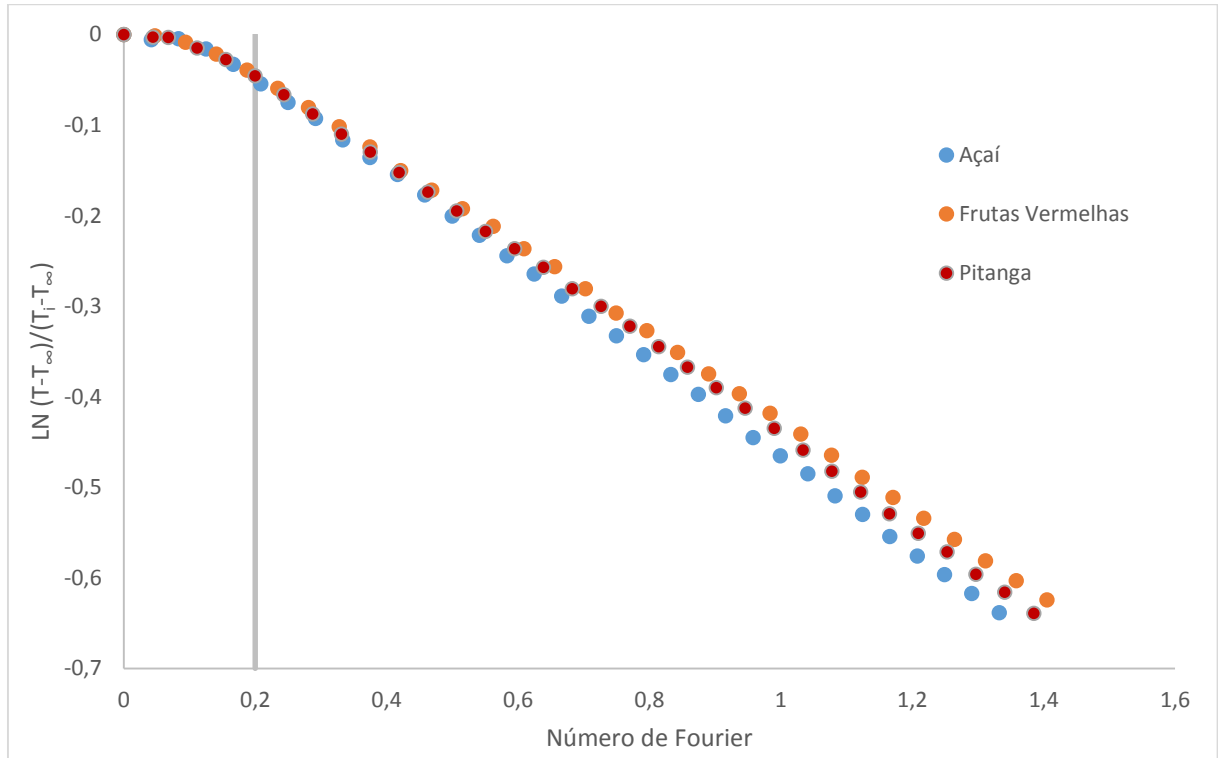


Figura 5 - Curvas de resfriamento em função do número de Fourier para as três polpas



3.2 Determinação da Difusividade Térmica

Na Tabela 2 são apresentados os valores de difusividade térmica das polpas. Podemos verificar que, em ordem de grandeza, os resultados obtidos para as três polpas de frutas, em comparação com o valor obtido para a água ($\alpha = 1,43 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) (ASHRAE, 2006), são similares.

Tabela 2 - Difusividade térmica experimental e número de Biot obtida para as polpas.

Polpa	Difusividade térmica (m^2/s) $\times 10^7$	Número de Biot
Açaí	$1,43 \pm 0,06$	$0,283 \pm 0,009$
Pitanga	$1,50 \pm 0,06$	$0,269 \pm 0,004$
Frutas Vermelhas	$1,60 \pm 0,05$	$0,260 \pm 0,011$

Na literatura são encontrados dados de difusividade térmica para diversos tipos de polpa e sucos de fruta. Silva (1997) reportou na polpa de abacaxi valores de α de $1,44 \times 10^{-7}$ e de

$1,37 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ com 15 e 25°Brix , respectivamente. Pereira et. al. (2003) encontrou valores de α na polpa de açaí de $1,441 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, entretanto este experimento foi conduzido através de aquecimento da polpa, empregando o método de Dickerson (1965). Muniz et. al. (2006) obteve para a polpa de Bacuri, em concentrações de 5 até 20°Brix , valores de difusividade na faixa de $1,787 \times 10^{-7}$ até $1,637 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, sendo que a difusividade térmica decrescia à medida que a concentração de sólidos aumentava.

Gaffney et. al. (1980) listou valores de difusividade térmica para diversas frutas e hortaliças reportados na literatura, podendo destacar os valores para maçã de $1,37 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,11 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ *in natura* e polpa, respectivamente (Bennett, 1969); de $1,47 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,18 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para a polpa de morango e banana, respectivamente (Riedel, 1969). Erdogdu; Linke; Praeger; Geyer; Shülter (2014) obteve valores de difusividade de $1,442 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, para as bananas verdes e $1,50 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para as bananas maduras durante o processo de resfriamento em câmara frigorífica.

3.3 Determinação do Número de Biot

Na Tabela 2 também são apresentados os valores do número de Biot durante o processo de resfriamento. As três polpas apresentaram resultados muito próximos na sua ordem de grandeza. O que vai ao encontro das condições de fluxo de calor e condições iniciais serem semelhantes para as três polpas. Contudo, por possuírem coeficiente condutivo diferente, a velocidade de condução de calor através da polpa se dá de maneira diferente para as três. Por isso, a diferença existente para o valor de Biot.

Teruel (2001) obteve valores entre 0,2 a 0,1 para o número de Biot, em condições de fluxo com velocidade de até 1 m/s e 3,5 a 0,5, para laranja valência nas mesmas condições. Dussán-Sarria e Honório (2005) obteve número de Biot igual a 1,2 para resfriamento de figos com a utilização de ar forçado com velocidade de $17,2 \text{ m/s}$. Tais resultados vão ao encontro dos obtidos no presente trabalho. Além disso, podemos verificar que em corpos esféricos a perda de calor ocorre de maneira mais acelerada. Por tais motivos o número de Biot será maior nestes corpos do que em corpos cilíndricos

3.4 Determinação de j e f de Ball.

Na Tabela 3 são apresentados os valores de j e f de Ball. Podemos verificar que, apesar da ordem de grandeza ser muito parecida, a polpa de açaí apresentou o maior tempo necessário para a redução em 90% a sua temperatura, demorando em média 4561,8s.

Tabela 3 - Valores de f e j de Ball para as amostras de polpa de fruta.

Polpa	f (s)	j
Açaí	4561,8 ± 159,2	1,067 ± 0,002
Pitanga	4519,1 ± 118,0	1,064 ± 0,001
Frutas Vermelhas	4389,4 ± 275,6	1,062 ± 0,002

Rosa e Noreña (2003), obteve valores de f de 4324,8s e 5339,4s para o suco de laranja a 35 e 45 °Brix, respectivamente; de 4324,28s e 3813,0s para o suco de uva a 35 e 45 °Brix, respectivamente; de 3820,88s e 4909,2s para o suco de pêsego a 35 e 45 °Brix. As condições para a obtenção dos valores do presente trabalho e do trabalho de Rosa e Noreña (2003) foram muito semelhantes. Dessa forma, verifica-se que há grandeza semelhante entre os resultados apresentados.

Entretanto, se compararmos os resultados de f em função da concentração de sólidos solúveis totais, no presente trabalho, verifica-se uma relação inversamente proporcional, ou seja, quanto maior for o valor em sólidos solúveis, menor será o valor de f . O mesmo não ocorre para os valores obtido por Rosa e Noreña (2003), com exceção dos resultados para o suco de uva.

Segundo Pflug et al. 1965, o coeficiente f é inversamente proporcional a difusividade, como podemos constatar na equação (12). Considerando os valores obtidos no presente trabalho, para difusividade térmica e o coeficiente f , podemos verificar que os dados confirmam esta afirmação, uma vez que a polpa com o maior valor de difusividade térmica (frutas vermelhas) apresentou o maior valor de f . Podemos verificar que a relação contrária também é válida (polpa de açaí).

Rosa e Noreña (2003), obteve os seguintes valores de j : para o suco de laranja, 1,01 (a 35 e 45 °Brix); para o suco de uva, 1,00 (35 e 45 °Brix); para o suco de pêsego, 1,00 (35 °Brix) e 1,01 (45 °Brix). Verifica-se que a temperatura pseudo inicial para os valores obtidos por Rosa e Noreña (2003) estão muito mais próximos da temperatura inicial real, se comparados aos

valores apresentados neste trabalho. Isto porque o valor de j é a razão entre a diferença da temperatura inicial da reta assíntota a curva de resfriamento menos a temperatura do fluido de resfriamento sobre a temperatura inicial de resfriamento menos a temperatura do fluido de resfriamento. Tais resultados demonstram que apesar do coeficiente de determinação (r^2) ser 0,98, a aproximação linear feita em função da curva de resfriamento para os valores experimentais poderia ser desconsiderada uma maior parte dos valores iniciais. Para isso, seria interessante a aplicação da relação de Fourier, apresentado no presente trabalho.

Segundo Pflug et al. 1965 o coeficiente j é diretamente proporcional ao número de Biot. Considerando os valores obtidos no presente trabalho, para número de Biot e o coeficiente j , podemos verificar que os dados confirmam esta afirmação, uma vez que a polpa que apresentou o menor valor de número de Biot (frutas vermelhas) apresentou o menor valor de j . Podemos verificar que a relação contrária também é válida (polpa de açaí).

3.5 Determinação do Coeficiente Convectivo

O valor do coeficiente obtido foi de $0,90 \pm 0,01$ W/m².K. Arpaci (1990) reporta valores de 1 a 10 W/m².K para o ar atmosférico estagnado em diferentes tipos de superfícies. Teruel (2001) reportou valores de coeficiente convectivo na faixa de 55,5 a 21,2 W/m².°C, e 13,7 a 8,2 W/m².°C, para resfriamento de frutas in natura, laranja valência e banana prata, respectivamente, sendo realizado em túnel de resfriamento, cujas condições de velocidade do ar era de 1m/s, com temperatura de 0 °C. Amendola Dussán-Sarria e Rabello (2009), reportou valores de 22,0 W/m².°C para o resfriamento rápido utilizando fluxo de ar frio, temperatura de 0 °C e velocidade média de 1,5 m/s.

Diferentemente dos experimentos realizados na literatura, o valor do coeficiente convectivo, neste trabalho, é relativamente baixo devido à falta de fluxo de ar. Com isso a transferência de calor ocorre com menor intensidade: o que é comprovado através do valor do coeficiente convectivo. Outra importante constatação é que formas esféricas permitem que haja um valor mais elevado de coeficiente convectivo. Isto ocorre devido ao aumento da área de transferência em função do volume, se compararmos com o cilindro.

3.6 Viscosidade, Atividade de Água e Sólidos Solúveis nas Polpas

Na Tabela 4 são apresentados os valores referentes a viscosidade, atividade de água e sólidos solúveis para as três amostras de polpa de frutas.

Tabela 4 – Viscosidade, atividade de água e Sólidos solúveis obtidos para as três polpas de fruta.

Polpas	Viscosidade Aparente (cP)	Atividade de água	Sólidos solúveis (°Brix)
Açaí	417,7 ± 13,6	0,993 ± 0,006	3,75 ± 0,80
Pitanga	288,0 ± 12,0	0,995 ± 0,001	4,90 ± 0,10
Frutas Vermelhas	572,0 ± 13,9	0,998 ± 0,002	7,38 ± 0,20

Avaliando os valores obtidos para viscosidade aparente das 3 polpas pode-se verificar que a polpa de pitanga apresentou a menor viscosidade. Torres et. al. (2003) reportou valores de viscosidade aparente da polpa de umbu-cajá de 390,0 cP e 940,0 cP, a 9 e 13 °Brix. Para a polpa de manga centrifugada, medida em temperatura de 20 e 30 °C, Vidal (2006) obteve valores de 320,0 cP e 250,0 cP.

Os valores de atividade de água foram de 0,99 em todas as amostras. Diniz, Figueirêdo e Queiroz (2003), obtiveram valores variando de 0,971 a 0,988 para polpa de acerola em diferentes concentrações. Guimarães et.al. (2008) obteve, para o fruto murici, valores de atividade de água de 0,98±0,00. A polpa de juazeiro apresentou valor de atividade de água de 0,98±0,03 (SOUSA, 2013). Lago; Bernstein; Brandelli; Noreña (2011) obteve valores de 0,99 e 0,93±0,02 para o suco e polpa de *yacon*. De acordo com Gava et. al. (2008) a atividade de água está ligada ao crescimento e atividade metabólica dos micro-organismos e com reações hidrolíticas de triglicerídeos, ácidos graxos livres e ligados. Polpas de fruta tendem a uma atividade de água superior a 0,98.

Os valores obtidos para os sólidos solúveis totais apresentaram grande variação entre as amostras mas os valores obtidos não foram superiores a 10°Brix. Pereira (2002) apresentou valor de 4,80 ± 0,02°Brix para a polpa de açaí. Lopes (2005) obteve valores de 11,47 ± 0,06°Brix para polpas de pitanga. Guimarães et.al. (2008) obteve para o fruto murici valores de sólidos solúveis totais de 10,67±0,58. Para a polpa de juazeiro os valores obtidos foram de 29,30±0,07 (SOUSA, 2013). Para a polpa de cajá os valores obtidos foram de 9,10 (MUNIZ; QUEIROZ; FIGUEIRÊDO; DUARTE 2005).

Os valores de atividade de água e sólidos solúveis totais se correlacionam de forma inversamente proporcional, ou seja, o aumento de sólidos solúveis causará a redução no valor de atividade de água. Tal definição está diretamente ligada ao resultado obtido experimentalmente. Moura et al. (1998) determinou para os sucos de tangerina, abacaxi e limão que tal relação é correta. Podemos verificar que, devido à baixa quantidade de sólidos solúveis totais nas polpas, o valor de atividade de água será elevado o que é comprovado na tabela 5.

Os valores para a viscosidade variam de acordo com a concentração de sólidos solúveis. Segundo Lago; Bernstein; Brandelli; Noreña (2011) a concentração afeta diretamente a viscosidade, isto por que, com o aumento da concentração, a quantidade de água disponível no meio será menor. Os estudos Azoubel et. al. (2005) verificaram a dependência direta do aumento da viscosidade do suco de caju com o aumento de sólidos solúveis.

Lago; Bernstein; Brandelli; Noreña (2011) afirmam que sucos e purês são considerados fluidos pseudoplásticos e o seu afastamento do comportamento newtoniano é determinado pelo conteúdo de polpa do produto. Tais considerações vão ao encontro dos resultados obtidos para a polpa de açaí e frutas vermelhas, não sendo o caso da polpa de pitanga. Tal resultado para a polpa de pitanga pode ser devido a facilidade de separação das fases que facilmente ocorriam nesta polpa.

4 CONCLUSÕES

Os valores de difusividade térmica nas polpas de açaí, pitanga e frutas vermelhas foram $1,43 \pm 0,06 \times 10^{-7}$, $1,50 \pm 0,06 \times 10^{-7}$, $1,60 \pm 0,05 \times 10^{-7}$ m²/s, e de $0,283 \pm 0,009$, $0,269 \pm 0,004$ e $0,260 \pm 0,011$, respectivamente.

Os números de Fourier encontrados foram maiores que 0,2, a partir de 300 segundos, verificando que foi possível o emprego da equação de transferência de calor em estado transiente apenas utilizando o primeiro termo da série.

Os valores obtidos para f e j foram $4561,8 \pm 159,2$, $4519,1 \pm 118,0$ e $4389,4 \pm 275,6$ segundos, e $1,067 \pm 0,002$, $1,064 \pm 0,001$ e $1,062 \pm 0,002$, para a polpa de açaí, pitanga e frutas vermelhas, respectivamente.

O coeficiente convectivo foi de $0,899 \pm 0,011$ W/m².C.

A viscosidade, atividade de água e sólidos solúveis totais foram de $417,7 \pm 13,6$ cP, $288,0 \pm 12,0$ cP e $572,0 \pm 13,9$ cP, $0,993 \pm 0,006$, $0,995 \pm 0,001$ e $0,998 \pm 0,002$, e $3,75 \pm 0,80$ °Brix, $4,90 \pm 0,10$ °Brix e $7,38 \pm 0,20$ °Brix, para as polpas de açaí, pitanga e frutas vermelhas, respectivamente.

Os dados obtidos neste trabalho auxiliaram as indústrias de alimentos no processo produtivo de polpas de frutas, pois com essas informações o cálculo de equipamentos se torna mais preciso.

A partir do estudo realizado, abre-se a perspectiva de novos estudos nesta mesma área. Obtenção de valores com calor específico, obtenção de modelos para avaliar as propriedades obtidas neste estudo sem a necessidade de utilização das polpas. Etc.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMENDOLA, M.; DUSSÁN-SARRIA, S.; RABELLO, A.A. Determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor de figos submetidos ao resfriamento rápido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 176-182, 2009.

ANDREUCCETTI, C. **Avaliação da Qualidade do Tomate de Mesa tratado com gas etileno**. 2005. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas, 2005.

AOAC (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS). Official methods of analysis. **Assoc Anal Chem**, 1990.

ARPAÇI, V. S. **Conduction Heat transfer**. Addison-Wesley, 1966.

ASHRAE (Estados Unidos). **ASHRAE Handbook—Refrigeration**. Atlanta: Ashrae, 2006. Disponível em: <<http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Termofluidodinamica/Utility/TabelleAlimenti.pdf>>. Acesso em: 1 out. 2014.

Azoubel, P.M.; Cipriani, D.C.; El-Aquar, A.A.; Antonio, G.C.; Murr, F.E.X., 2005, “Effect of concentration on the physical properties of cashem juice”. **Journal of Food Engineering**, V.66, pp.413-417

BENNETT, A. H.. **Thermal Characteristics of peaches as related to hydrocooling**. Washington: Usda - Ams, 1963. 33 p.

BRASIL, MAPA. **Instrução normativa N° 01 de 7 de janeiro de 2000**, Brasília, DF, 2002. 486 BRASIL. Adonai Gimenez Calbo.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. São Paulo, McGraw-Hill, 2009.

ÇENGEL, Y. A.; Palm III, W. J. **Equações Diferenciais**. Porto Alegre: Mcgraw Hill Brasil, 2014. 598 p.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-Colheira de Frutas e Hortaliças: Fisiologia e Manuseio**. 2. ed. Lavras: Ufla, 2005. 785 p.

COSTA, O. C.; CARDOSO, G. R.; SILVA, G. M. V. A evolução do setor produtivo e comercialização de polpas de fruta no brejo paraibano: estudo de caso na Coaprodes. In **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 33, Salvador Bahia, 2013.

DICKERSON, R. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods, **Food Technology**, v. 52, p. 880-886, 1965.

DINIZ, E.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. de; QUEIROZ, A. J. Atividade de água e condutividade elétrica de polpas de acerola concentradas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 1, n. 1, p.9-17, 2003.

DUSSÁN-SARRIA, S. S.; HONÓRIO, S. L. Parâmetros de resfriamento rápido do figo (*Ficus carica* L.) cv. Roxo de Valinhos embalado em caixa de exportação. **Revista UDO Agrícola**, v. 5, n. 1, p. 96-102, 2005.

Embrapa. **Respiração de Frutas e Hortaliças**. Brasília: Embrapa, 2007. 10 p. Disponível em: <http://bbeletronica.cnph.embrapa.br/2007/cot/cot_46.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2014.

ERDOGDU; LINKE; PRAEGER; GEYER; SHÜLTER, F. A review on simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient, **Journal of Food Engineering**, v. 86, p. 453-459, 2008.

ERDOGDU; LINKE; PRAEGER; GEYER; SHÜLTER, F.; LINKE, M.; PRAEGER, U.; GEYER, M.; SCHLÜTER, O. Experimental determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of whole green (unripe and yellow (ripe) Cavendish bananas under cooling conditions, **Journal of Food Engineering**, v. 128, p. 46-52, 2014.

FACHINELLO, J. C.; NACHTIGAL, J. C.; KERSTEN, E. **Fruticultura Fundamentos e Práticas**. Pelotas: Embrapa, 2006. Disponível em: <<http://www.cpact.embrapa.br/publicacoes/livros/fundamentos-fruticultura/index.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2014.

FENNEMA, O. R.; DAMONDARAN, S.; PARKIN, K. L. **Química de alimentos de fennema**, Porto Alegre, Artmed, 2010.

FERREIRA N. C. J.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. Avaliação sensorial e da atividade de água em farinhas de mandioca temperadas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 4, p.795-802, Não é um mês valido! 2005. Bimestral.

Food and Agriculture Organization. **FAO Statistical yearbook 2013. World food and agriculture**. Roma, 2013. 307 p.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J.. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2006. 789 p.

FRASER H.; OTTEN, L. Predicting 7/8 cooling times for peaches by comparing heat transfer modelling and field measurement methods **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, Paper no. 92-6016. 1992.

GAFFNEY, J.J; BAIRD, C.D.; ESHELEMAN, W.D. Review and analysis of transient method for determining thermal diffusivity of fruits and vegetables. **ASHARAE Transactions**, v. 86(2), p. 261-280. 1982.

GAVA, A. J; SILVA, C. A. B; FRIAS, J. R. G. **Tecnologia de alimentos: princípios e aplicações**. Nobel. pag.301. São Paulo. 2008.

GUIMARÃES, M. M.; SILVA, M. S. Valor nutricional e características químicas e físicas de frutos de murici-passas (*Byrsonima verbascifolia*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 28, n. 4, p.817-821, 2008. Trimestral.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Porto Alegre: Mcgraw Hill Brasil, 2012.

LAGO, C. C., BERNSTEIN, A., BRANDELLI, A., NOREÑA, C. Z. Characterization of Powdered Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) Juice and Pulp. **Food And Bioprocess Technology**, New York, v. 5, n. 6, p.2183-2191, 2011.

LOPES, A. S.; MATTIETTO, A. A.; MENEZES, H. C. de. ESTABILIDADE DA POLPA DE PITANGA SOB CONGELAMENTO. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 3, p.553-559, 2005.

MASCHERONI, R. H. **Operations in Food Refrigeration**. Boca Raton: Crc Press, 2012. 402 p.

MATA, Mario E. R. M. Cavalcanti; DUARTE, Maria E. M.; ZANINI, Helen L. H. T.. Cajá pulp (*Spondias lutea* L.) specific heat and density for different soluble solids concentrations at low temperatures. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 488-498, 2005.

MITCHELL, F.G.; GUILLOU, R.; PARSONS, R.A. Commercial cooling of fruits and vegetables: Manual Series No.43. **Califórnia: Division of Agricultural Sciences**. University of California, 1972

MOURA, S. C.; SOBOTTKA, R.; HUBINGER, M. D.; DE ALMEIDA V.A. PREDIÇÃO DA ATIVIDADE DE ÁGUA E RELAÇÃO ENTRE A ATIVIDADE DE ÁGUA EA DEPRESSÃO DO PONTO DE CONGELAMENTO DE SUCOS DE FRUTAS. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, v. 18, n. 4, 1998.

MUNIZ, M. B., QUEIROZ, J. M., FIGUEIRÊDO, R. M.F., DUARTE, M. E. M. Caracterização termofísica de polpas de bacuri. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 2, p.360-368, 2006. Trimestral.

ORDÓÑEZ, Juan A. et al. **Tecnologia de Alimentos: Componentes dos alimentos e processos**. Porto Alegre: Artmed, 2005

PEREIRA, E. A.; QUEIROZ, A. J. de M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. de. Massa específica da polpa de açaí em função do teor de sólidos totais e da temperatura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p.526-530, 2002.

PFLUG I. J.; BLAISDELL, J. L.; KOPELMAN, I. J. Developing temperature-time curves for objects that can be approximated by a sphere, infinite plate, or infinite cylinder, **ASHARAE Transactions**, v. 71(1), p. 238-248. 1965.

RESENDE, J. V.; SILVEIRA JUNIOR, V. Medidas da condutividade térmica evetiva de modelos de polpa de frutas no estado congelado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 2, p.177-183, 2002.

RIEDEL, L.. Measurements of thermal diffusivity on foodstuffs rich in water. **Kältetechnik-Klimatisierung**, Kältetechnik- Klimatisierung, v. 21, n. 11, p.315-316, 1969.

ROSA, E. B.; NOREÑA, C. P. Z. Determinação da difusividade térmica em sucos concentrados de laranja, pêsego e uva. In: **Simpósio em Ciência de Alimentos**, 2, 2003, Florianópolis. SIMPOCAL 2003, SBCTA/SC. Florianópolis: SBCTA/SC, 2003. p. 465-469.

SATIM, M.; SANTOS, R. A. M. Estudo das características nutricionais das polpas de mangas (mangifera indica l.) variedade tommy Atkins. VI EPCC. **Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar**, 2009.

SILVA, S. B. **Propriedades termofísicas de polpa de abacaxi**. 1997. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. Campinas, São Paulo, 1997.

SINGH, R.P. Thermal diffusivity on food processing, **Food Technology**, v. 36(2), p. 87-91, 1982.

SOUSA, F. C., SILVA, L. M. M., CASTRO, D. S. NUNES, J. S., SOUSA, E. P., Propriedades físicas e físico-químicas da polpa de juazeiro. **Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 8, n. 2, p.68-71, 2013. Trimestral.

ŠTENCL, J. "Water activity of skimmed milk powder in the temperature range of 20-45 C." **Acta Veterinaria Brno** 68.3 (1999): 209-None.

TABILO-MUNIZAGA, G.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. Rheology for the food industry. **Journal of Food Engineering**, v. 67, p. 147-156, 2005.

TABILO-MUNIZAGA, G.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Rheology for the food industry. **Journal of Food Engineering**, v. 67, n. 1, p. 147-156, 2005.

TERUEL, B., CORTEZ, L. A., LEAL, P., LIMA, A. G. B., ESTUDO TEÓRICO DO RESFRIAMENTO COM AR FORÇADO DE FRUTAS DE GEOMETRIAS DIFERENTES. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 2, p.228-235, 2001.

TORRES, L. B. V.; QUEIROZ, A.J.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Viscosidade aparente da polpa de umbu-cajá concentrada a 10 C. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 5, n. 2, p. 161-168, 2003.

TUCKER, G. A. Introduction. In: SEYMOUR, G. B.; TAYLOR, J. E.; TUCKER, G. A. (Eds.). *Biochemistry of fruit ripening*. London: Chapman & Hall, 1993. p.01-51.

VAN VLACK, L. H.; MONTEIRO, E. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2003. 567 p.

VITALLI, A. A., Importancia da atividade de água em alimentos. In: Jardim, DCP (Org), Seminário sobre a atividade de água em alimentos, 1, 1987, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1987, p 1-5.

ABRAMOWITZ, Milton; STEGUN, Irene A.. **Handbook of Mathematical Functions: with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables**. New York: Dover Books On Mathematics, 2012. 1046 p