

# ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E REGIME DE ESCOAMENTO NO TRATAMENTO TÉRMICO DE POLPA DE AÇAÍ USANDO UM PASTEURIZADOR A PLACAS

F. G. DITCHUN<sup>1</sup>, H. C. B. COSTA<sup>2,3</sup> e J. A. W. GUT<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia de Alimentos, Faculdade de Tecnologia Termomecânica

<sup>2</sup> Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de São João del Rei

<sup>3</sup> Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia

<sup>4</sup> Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo

<sup>5</sup> Food Research Center (FoRC), Universidade de São Paulo

E-mail para contato: fer.nanda\_ditchun@hotmail.com

**RESUMO** – O tratamento térmico visa tornar os alimentos seguros para o consumo e com maior vida de prateleira, inativando microrganismos e/ou enzimas indesejados, mantendo a qualidade nutricional e sensorial do produto. A pasteurização é um tratamento térmico brando, amplamente aplicado na indústria de alimentos para processar produtos líquidos por meio de trocadores de calor. Este trabalho analisa a transferência de calor e o regime de escoamento na pasteurização de polpa de açaí usando trocadores de calor a placas. Foram processados água e polpa de açaí variando a vazão (15 a 25 L/h) e o arranjo das placas (10x1/10x1 e 5x2/5x2) na temperatura desejada de processamento de 90 °C. Foram calculados e comparados os calores nos lado quente e frio dos trocadores ( $q$ ) e a perda de calor no tubo de retenção, os coeficientes globais de transferência de calor ( $U$ ) e o número de Reynolds ( $Re$ ). Este trabalho contribuirá com a indústria do açaí e com outros estudos sobre processamento de polpa de açaí.

## 1. INTRODUÇÃO

A polpa de açaí tem ganhado notoriedade pelas indústrias alimentícias e farmacêuticas, devido à sua alta energia e valor nutricional. A alta perecibilidade e o elevado índice de contaminação em toda a cadeia produtiva do fruto exigem métodos adicionais de conservação, como a pasteurização e o congelamento das polpas, garantindo o sabor e a qualidade adequados até o seu consumo (Marino, 2009).

A pasteurização objetiva inativar microrganismos e/ou enzimas de alimentos líquidos para torná-los seguros para o consumo e com longa vida de prateleira. Especificamente, o processamento térmico do açaí é importante para eliminar o risco de contaminação da doença de chagas. O agente etiológico desta doença é o protozoário *Trypanosoma cruzi*, transmitido pela sanguessuga (Costa, 2019; Costa *et al.*, 2018 b; Ferreira *et al.*, 2014). No entanto, o protozoário não é resistente ao processamento térmico e uma pasteurização adequada da polpa de açaí é suficiente para eliminá-lo (Costa, 2019; Costa *et al.*, 2018 b).

Ao longo do tratamento térmico, podem ocorrer alterações químicas, bioquímicas e físicas que afetam a qualidade e aceitabilidade do produto. Portanto, os parâmetros tempo e temperatura devem ser bem definidos para além de inativar os microrganismos e enzimas alvo, minimizar as perdas sensoriais e nutricionais dos alimentos (Lewis; Heppel, 2000). Estes parâmetros também variam de acordo com as propriedades físicas dos alimentos, as espécies de microrganismos e sua concentração, trocadores de calor, layout do equipamento, entre outros (Costa, 2019; Costa *et al.*, 2018 b).

O estudo das condições de operação, configurações de equipamentos e propriedades dos alimentos é fundamental para o dimensionamento e otimização de processos na indústria de alimentos, minimizando impactos sobre atributos de qualidade e garantido a segurança dos produtos.

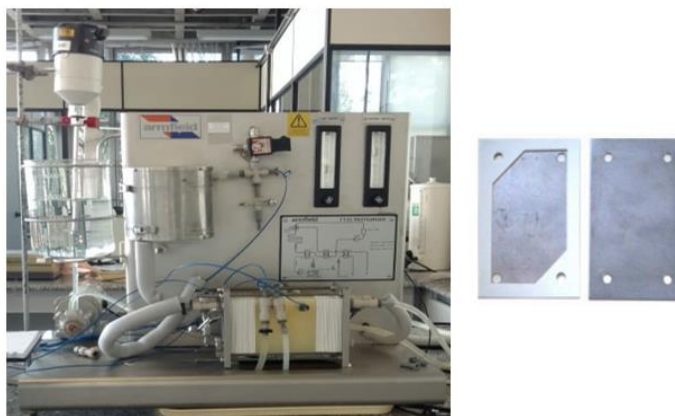
## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar a transferência de calor e o regime de escoamento na pasteurização de polpa de açaí usando trocadores de calor a placas.

## 3. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

Como objeto de estudo foi usado um pasteurizador a placas de escala laboratorial Armfield FT-43A (ARMFIELD, Hampshire, Reino Unido), com seções de aquecimento e resfriamento com 20 canais e um tubo de retenção.

Figura 1 – Pasteurizador a placas Armfield FT-43A e suas placas.



Dois arranjos de placas foram testados: 10 passes na seção de aquecimento e 10 passes na seção de resfriamento, sendo 1 canal por passe em ambas seções (10x1/10x1) e 5 passes na seção de aquecimento e 5 passes na seção de resfriamento, sendo 2 canais por passe em ambas seções (5x2/5x2). Foram processados fluidos com diferentes reologias, água (newtoniano) e polpa de açaí (pseudoplástico). Foi variada a vazão dos fluidos (15 a 25 L/h), inalterando as vazões da água de aquecimento (0,6 L/min) e resfriamento (1,2 L/min) e a temperatura desejada de processamento (90 °C). Termopares calibrados registraram as temperaturas de entrada e saída nos trocadores. Rotômetros e bomba dosadora calibrada foram usados para manter as vazões nos valores desejados.

Foi verificado regime permanente de operação e as propriedades termofísicas foram avaliadas na temperatura média do trecho. De acordo com os estudos realizados por Costa *et al.* (2018 a, b) e Costa (2019), as propriedades físicas e reológicas do açaí variam em função da temperatura e do conteúdo de sólidos do produto. Conforme o MAPA (2000), a polpa processada era do tipo B composta por 12,7% de conteúdo sólido.

Foram calculados e comparados os calores nos lados quente e frio dos dois trocadores ( $q$ ) e a perda de calor no tubo de retenção, assim como os coeficientes globais de transferência de calor para arranjo contracorrente ( $U$ ) e o número de Reynolds ( $Re$ ).

As taxas de transferência de calor nos lados quente e frio foram calculadas pelas Equações 1 e 2, respectivamente. Os subscritos  $q$  (quente) e  $f$  (frio) indicam os lados do trocador e os subscritos  $e$  e  $s$  representam entrada e saída.

$$q = \dot{m}_q \cdot c_{p,q} \cdot (T_{q,e} - T_{q,s}) \quad (1)$$

$$q = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{f,e} - T_{f,s}) \quad (2)$$

em que  $q$  é a taxa de transferência de calor (W),  $\dot{m}$  é a vazão mássica do fluido (kg/s),  $c_p$  é o calor específico médio do fluido (J/kg.K) e  $T$  é a temperatura do fluido (°C). A perda de calor no tubo de retenção corresponde ao balanço de energia para o lado quente de um trocador de calor (Equação 1), considerando o ar ambiente como o lado frio isotérmico.

O coeficiente global de transferência de calor para arranjo contracorrente foi calculado pela Equação 3, adotando  $F_{MLDT} = 1$ :

$$q = U \cdot A \cdot F_{MLDT} \cdot \Delta \bar{T}_{ln} \quad (3)$$

em que  $q$  é a taxa de transferência de calor (W),  $U$  é o coeficiente global de transferência de calor (W/m<sup>2</sup>.K),  $A$  é a área de referência para transferência de calor (m<sup>2</sup>),  $F_{MLDT}$  é o fator de correção da média logarítmica da diferença de temperatura (adimensional) e  $\Delta \bar{T}_{ln}$  é a média logarítmica da diferença de temperatura (°C).

Para fluidos newtonianos o número de Reynolds é calculado pela Equação 4.

$$Re = \frac{d_i \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (4)$$

em que  $Re$  é o número de Reynolds (adimensional),  $d_i$  é o diâmetro interno do tubo (m),  $v$  é a velocidade média de escoamento do fluido (m/s),  $\rho$  é a densidade do fluido (kg/m<sup>3</sup>) e  $\mu$  é a viscosidade do fluido newtoniano (Pa.s).

Para fluidos não newtonianos, é calculado o número de Reynolds generalizado ( $Re_g$ ) em que a viscosidade generalizada ( $\mu_g$ ) é dada pela Equação 5.

$$\mu_g = K \cdot \xi^{n-1} \cdot \left(\frac{v}{D}\right)^{n-1} \cdot \left(\frac{v \cdot n + 1}{(v+1) \cdot n}\right)^n \quad (5)$$

em que  $K$  é o parâmetro de consistência da Lei da Potência ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ),  $n$  é o índice de escoamento da Lei de Potência (adimensional),  $v$  é a velocidade do fluido (m/s),  $D = D_e$  é o diâmetro equivalente do canal do trocador de calor a placas (m) e os parâmetros  $\xi$  e  $v$  são obtidos experimentalmente (adimensionais).

Costa *et al.* (2018 a) e Costa (2019) avaliaram os parâmetros  $K$  e  $n$  da polpa de açaí no intervalo de 10 a 70 °C. Foram elaboradas correlações entre  $K$  e temperatura e  $n$  e temperatura a partir dos valores encontrados no parâmetro 4<sup>th</sup> down. Estas correlações são dadas pelas Equações 6 e 7, respectivamente.

$$K = 2,00 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 1,94 \cdot 10^{-2} \cdot T + 8,04 \cdot 10^{-1} \quad (6)$$

$$n = -1,00 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 1,04 \cdot 10^{-2} \cdot T + 3,25 \cdot 10^{-1} \quad (7)$$

Para o cálculo da viscosidade generalizada nas seções de aquecimento e resfriamento, foi adotado que os parâmetros  $v$  e  $\xi$  se referem a geometria de placas paralelas infinitas, com valores de 2,000 e 12,000, respectivamente. E para a seção de retenção, foi adotado que os parâmetros  $v$  e  $\xi$  se referem a geometria de tubo circular, com valores de 3,000 e 8,000, respectivamente (Delplace; Leuliet, 1995).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 1 a 4 apresentam os valores de  $q$ ,  $U$  e  $Re$  dos ensaios térmicos realizados com a água e polpa de açaí, nas configurações 10x1/10x1 e 5x2/5x2, respectivamente. Conforme verificação nas Tabelas 1 a 4, a seção de retenção foi fracionada em dois trechos para a modelagem térmica. O trecho 1 é composto por uma mangueira de silicone que transporta o produto da seção de aquecimento até o tubo de retenção e pelo tubo de retenção, variando os diâmetros internos e externos dos componentes, assim como seus materiais. O trecho 2 é composto por uma mangueira de silicone. Os coeficientes de transferência de calor deste trecho ficam em função de sua área afim de comparar os resultados com os obtidos no trecho 1.

Tabela 1 – Valores de  $q$ ,  $U$  e  $Re$  dos ensaios térmicos realizados com a água em que as seções do pasteurizador foram configuradas em 20 canais (10x1/10x1).

	Aquecimento	Retenção (Trecho 1)	Retenção (Trecho 2)	Resfriamento
$q$ (W)	1.363 a 1.986	61 a 109	99 a 204	702 a 1.066
$U$ (W/m <sup>2</sup> .K)/ $U.A$ (W/K)	1.048 a 1.193	0,92 a 1,47	1,53 a 2,90	1.108 a 1.250
$Re$ (-)	684 a 703	1.802 a 2.775	2.700 a 4.221	747 a 847

Tabela 2 – Valores de  $q$ ,  $U$  e  $Re$  dos ensaios térmicos realizados com a água em que as seções do pasteurizador foram configuradas em 20 canais (5x2/5x2).

	Aquecimento	Retenção (Trecho 1)	Retenção (Trecho 2)	Resfriamento
$q$ (W)	1.146 a 1.869	58 a 70	91 a 166	897 a 1.083
$U$ (W/m <sup>2</sup> .K)/ $U.A$ (W/K)	458 a 601	1,02 a 1,17	1,69 a 2,67	388 a 438
$Re$ (-)	345 a 359	1.647 a 2.481	2.484 a 3.772	247 a 295

Tabela 3 – Valores de  $q$ ,  $U$  e  $Re$  dos ensaios térmicos realizados com a polpa de açaí em que as seções do pasteurizador foram configuradas em 20 canais (10x1/10x1).

	Aquecimento	Retenção (Trecho 1)	Retenção (Trecho 2)	Resfriamento
$q$ (W)	1.235 a 1.869	104 a 169	152 a 304	1.127 a 1.721
$U$ (W/m <sup>2</sup> .K)/ $U.A$ (W/K)	860 a 1.160	1,79 a 2,33	2,33 a 4,59	1.077 a 1.361
$Re$ (-)	7 a 8	6 a 12	18 a 37	17 a 18

Tabela 4 – Valores de  $q$ ,  $U$  e  $Re$  dos ensaios térmicos realizados com a polpa de açaí em que as seções do pasteurizador foram configuradas em 20 canais (5x2/5x2).

	Aquecimento	Retenção (Trecho 1)	Retenção (Trecho 2)	Resfriamento
$q$ (W)	1.142 a 1.609	36 a 178	152 a 201	941 a 1.303
$U$ (W/m <sup>2</sup> .K)/ $U.A$ (W/K)	477 a 594	0,64 a 2,78	2,80 a 3,51	612 a 765
$Re$ (-)	3	6 a 13	17 a 36	6 a 7

O desvio médio entre calores nos lados quente e frio foi de 4,00% para os ensaios térmicos realizados com a água e de 3,42% para os ensaios térmicos realizados com a polpa de açaí, confirmando a conservação de energia.

A água apresentou valores de Reynolds superiores em relação a polpa de açaí nas três etapas do processamento térmico. A faixa de valores de Reynolds para a água nas etapas de aquecimento, retenção e resfriamento foi de 345 a 703, 1.647 a 4.221 e 247 a 847 e para a polpa de açaí foi de 3 a 8, 6 a 37 e 6 a 18, respectivamente.

A troca térmica mostrou-se mais eficiente na configuração 10x1/10x1. Para a água e a polpa de açaí, a faixa da transferência de calor nas etapas de aquecimento, retenção e resfriamento na configuração 10x1/10x1 foi de 860 a 1.193 W/m<sup>2</sup>.K, 0,92 a 4,59 W/K e 1.077 a 1.361 W/m<sup>2</sup> e para a configuração 5x2/5x2 foi de 458 a 601 W/m<sup>2</sup>.K, 0,64 a 3,51 W/K e 388 a 765 W/m<sup>2</sup>.K, respectivamente.

A perda de calor no tubo de retenção é significativa e não pode ser desprezada, sendo proporcional a diferença de temperatura do produto no tubo de retenção e a temperatura do ambiente. A temperatura de processamento atingida ao final do tubo de retenção variou entre 74,9 e 91,6 °C.

## 5. CONCLUSÃO

O uso de instrumentos calibrados confirmou a conservação de energia nos trocadores de calor e a qualidade dos resultados obtidos. Foi possível obter os valores de coeficientes globais de troca térmica e não houve grande diferença entre o processamento de água e de polpa, sendo a polpa mais viscosa. O aumento na vazão de produto eleva a taxa de transferência de calor ( $q$ ), o coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ) e o número de Reynolds ( $Re$ ) dada a maior turbulência.

A polpa de açaí apresentou valores inferiores de Reynolds em relação a água, dada a sua maior viscosidade advinda de seu conteúdo de sólidos.



Diferentes configurações das seções de troca de calor do equipamento alteram a demanda de transferência de calor. Nos ensaios térmicos realizados com a água e a polpa de açaí a troca térmica mostrou-se mais eficiente na configuração 10x1/10x1.

Resultados obtidos em outras vazões permitirão correlacionar o coeficiente global de transferência de calor com a vazão de produto. Ensaios experimentais em diferentes condições são necessários para avaliar o impacto do processo térmico sobre a atividade de enzimas presentes na polpa, a atividade microbiana, e atributos de qualidade, tais como cor e viscosidade.

## 6. REFERÊNCIAS

- COSTA, H. C. B.; AROUCA, F. O.; SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M. Study of rheological properties of açai berry pulp: an analysis of its time-dependent behavior and the effect of temperature. *J. Biol. Phys.*, 2018 a.
- COSTA, H. C. B. *Avaliação da pasteurização contínua da polpa de açaí sobre a inativação térmica das enzimas peroxidase e polifenoloxidase: estudo experimental e simulação em CFD*. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
- COSTA, H. C. B.; SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M. Physical properties of açai-berry pulp and kinetics study of its anthocyanin thermal degradation. *J. Food Eng.*, v. 239, p.104-113, 2018 b.
- DELPLACE, F.; LEULIET, J. C. Generalized Reynolds Number for the Flow of Power Law Fluids in Cylindrical Ducts of Arbitrary Cross-Section. *Chem. Eng. J.*, v. 56, p. 33-37, 1995.
- FERREIRA, R. T. B.; BRANQUINHO, M. R.; LEITE, P. C. Transmissão oral da doença de Chagas pelo consumo de açaí: um desafio para a Vigilância Sanitária. *Rev. Vig. Sanit. Debate*, v. 2, n. 4, p. 4-11, 2014.
- LEWIS, M.; HEPPELL, N. *Continuous thermal processing of foods: pasteurization and UHT sterilization*. Gaithersburg, Maryland: Aspen Publishers, Inc. 2000.
- MAPA: Instrução Normativa n. 1, de 7 de Janeiro de 2000 (2000).
- MARINO, T. C. *Considerações sobre o processamento e qualidade de polpa de açaí congelada*. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Gestão da Qualidade e Segurança dos Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

## 7. AGRADECIMENTOS

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos 2018/08178-7, 2013/07914-8, 2008/09791-2.