

DESENVOLVIMENTO DE APARATO E MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DA NUCLEAÇÃO DE BOLHAS NA DISTRIBUIÇÃO DO ESCOAMENTO EM DISSIPADORES DE CALOR COMPOSTOS POR MULTI-MICROCANAIS

Hugo Carreira Rufato, hugoc.rufato@usp.br¹
Tiago Augusto Moreira, tiago.moreira@usp.br¹
Gherhardt Ribatski, ribatski@sc.usp.br¹

¹Heat Transfer Research Group – HTRG, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), University of São Paulo (USP), Av. Trabalhador São-Carlense, 400, Parque Arnold Schimidt, CEP: 13566-590, São Carlos, Brasil.

Resumo. Este estudo trata do desenvolvimento de aparato e método óptico para avaliação experimental dos efeitos da nucleação de bolhas em microcanais em condições confinadas na distribuição do escoamento em um dissipador de calor composto de microcanais paralelos. O aparato permite simular a nucleação de bolhas por meio da injeção de ar no escoamento de água ao longo dos microcanais. Partículas de carbeto de silício são dispersas na água de forma a permitir, com o auxílio de um laser e uma câmera de alta velocidade, avaliar a partir das imagens, utilizando um programa a ser desenvolvido neste estudo, o efeito da nucleação de bolhas na distribuição do escoamento nos microcanais. Duas geometrias de microcanais fabricados por manufatura aditiva serão avaliadas, sendo uma apresentando restrições ao escoamento na entrada dos microcanais.

Palavras-chave: Microcanais, Instabilidades térmicas, Escoamento reverso, Escoamento bifásico, Ebulição Convectiva

Abstract. The present study concerns the design of an apparatus and development of an optical method to evaluate the effect on the flow distribution of bubble nucleation under confined conditions inside microchannels composing. In the apparatus, the bubble nucleation is simulated by injecting air in a water flow inside the microchannels at different locations. Silicon carbide particles are dispersed in the water, and a laser used to light the flow in the microchannels. High-speed videos are obtained, and the images processed in an own-developed code to evaluate the effect of the bubble nucleation on the flow distribution in the heat sink and possible reverse flows. Two geometries for the microchannels will be tested, both having parallel microchannels with one of them presenting a restriction at their inlet. Both heat sinks are manufactured by 3D printing.

Keywords: Microchannels, Thermal instabilities, Reverse flow

1. INTRODUÇÃO

Dissipadores de calor baseados na ebulição convectiva em multi-microcanais para remoção de elevados fluxos de calor em espaços restritos vem se tomando um consenso na indústria e academia (Leão *et al.*, 2015), encontrando aplicações no resfriamento de células fotovoltaicas com concentrador solar (Royne e Dey, 2007) e microprocessadores (Chavéz *et al.*, 2017). Microcanais são caracterizados por apresentar efeitos desprezíveis da gravidade na distribuição das fases (líquido-vapor) (Tibiricá e Ribatski, 2015; Kandlikar, 2010), e envolvem, de forma geral, dutos com diâmetro hidráulico inferior a 3 mm (Kandlikar e Grande, 2003). Entre as vantagens do emprego da ebulição convectiva em dissipadores de calor compostos de microcanais em relação aos dissipadores convencionais baseados na convecção forçada de ar, destacam-se: (i) elevado coeficiente de transferência de calor, que permite a remoção de fluxos de calor da ordem de 10 MW/m² (Ribatski *et al.*, 2007); (ii) elevada razão entre a área de contato da superfície do trocador de calor por unidade de volume; (iii) relativamente reduzido tamanho.

Tratando-se da remoção de elevados fluxos de calor em espaços restritos, apenas o uso de jatos incidentes se apresenta competitivo a dissipadores de calor baseados em multi-microcanais com emprego da ebulição convectiva (Royne *et al.*, 2005). Entretanto, conforme indicado por Royne *et al.* (2005), o uso de jatos incidentes está associado a gradientes de temperatura ao longo do dissipador, o que pode causar a falha dos componentes em questão resfriados. Em dissipadores de calor baseados em multi-microcanais com uso da ebulição convectiva, estes gradientes de temperatura são reduzidos,

apresentando-se, portanto, como uma solução mais adequada para a remoção de elevados fluxos de calor em espaços restritos.

A nucleação de bolhas em condições confinadas, conforme ocorre em dissipadores de calor baseados na ebulição convectiva em multi-microcanais, promove instabilidades térmicas no escoamento (Lee e Mudawar, 2005; Ribatski, 2013; Leão *et al.*, 2014; Chavéz *et al.*, 2019) que podem levar a falha crítica do componente resfriado (Boure *et al.* 1973; Tibiriçá *et al.*, 2015). Mais ainda, estas instabilidades térmicas afetam a distribuição do escoamento nos microcanais, podendo causar a falha crítica em microprocessadores, os quais apresentam *hotspots* que variam de posição devido ao acionamento de diferentes transistores ao longo do tempo (Aguiar and Ribatski, 2019). Conforme indicado por Tibiriçá *et al.* (2015), a nucleação de uma bolha em condições confinadas dentro do microcanal gera uma força no sentido contrário ao escoamento, podendo causar escoamento reverso e, conseqüentemente, oscilações de pressão e temperatura. Estes autores também verificaram que o fluxo crítico de calor, associado a falha crítica do componente, é significativamente reduzido na presença de instabilidades térmicas. Com isto, apesar das diferentes geometrias propostas para os microcanais com intuito de reduzir as instabilidades térmicas (Kosar *et al.*, 2006; Schneider *et al.*, 2007; Balasubramanian *et al.*, 2011; Szczukiewicz *et al.* 2013), estudos sobre este fenômeno ainda são necessários dado sua relevância, conforme indicado recentemente por Chavéz *et al.* (2019).

Neste contexto, o presente estudo envolve o desenvolvimento de aparato e método para avaliação do efeito da nucleação de bolhas na distribuição do escoamento em dissipadores de calor compostos por multi-microcanais. Vale ressaltar que com a presente pesquisa será possível analisar as instabilidades térmicas (escoamento reverso) causadas por esse efeito, que podem levar a falha crítica do componente resfriado ou a danos irreversíveis no dispositivo.

2. APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental em desenvolvimento, no qual os dissipadores de calor (seções de teste) serão instalados consiste de um circuito fechado, ilustrado esquematicamente na Fig. 1. O aparato é composto por um reservatório aberto para a atmosfera onde a mistura de água+particulado (carbeto de silício) é mantida. Uma bomba, conectada ao reservatório é responsável por circular a água pelo aparato. A jusante da bomba localiza-se um circuito *by-pass* e um rotâmetro, instalado de forma a controlar e medir a vazão de água na seção de testes. Um termopar do tipo-K será posicionado logo a montante da entrada na seção de testes de forma a monitorar a temperatura da água nos microcanais. A jusante da seção de testes a mistura bifásica retorna ao reservatório, no qual o ar será separado da água por meio de efeitos gravitacionais. O ar será injetado no escoamento com o auxílio de uma seringa dosadora controlada por um motor de passo.

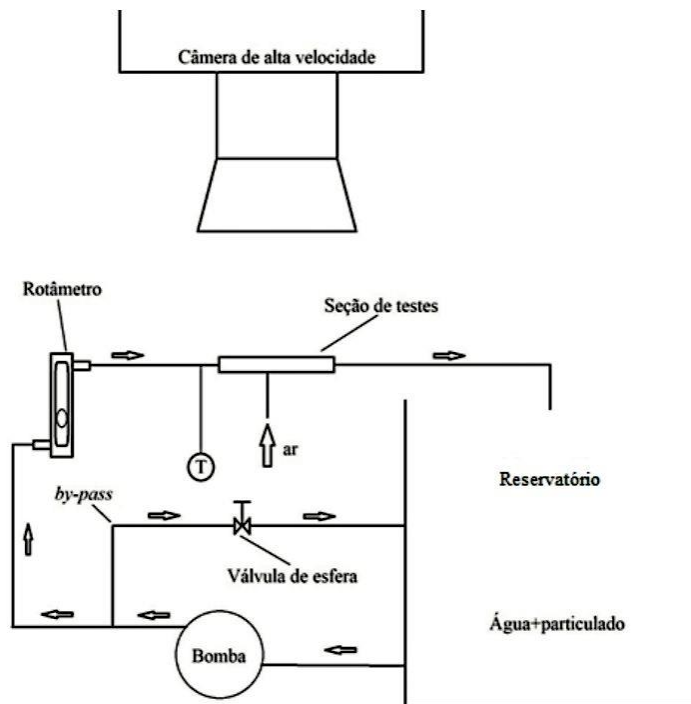


Figura 1 – Diagrama esquemático do aparato experimental a ser construído.

Os dissipadores de calor (seções de teste) que serão avaliados são ilustrados de forma esquemática na Fig. 2., onde nota-se que duas geometrias serão avaliadas. Ambas são compostas por 20 microcanais retangulares com $0.5 \times 1 \text{ mm}^2$

(largura e altura), espaçados por aletas de 1 mm de largura, e comprimento total de 40 mm. A diferença entre as duas versões do dissipador é a presença de restrições na entrada dos microcanais em uma delas (Fig. 2b). Os dissipadores, já projetados, serão fabricados em ABS por manufatura aditiva em impressora 3D disponível no laboratório (Stratasys F-170). Na peça que compõe os dissipadores serão deixados canais que conectam a seringa de ar a parte interna dos microcanais em várias localidades. Com isto, será possível a injeção direta de ar no escoamento, de forma a simular a nucleação de bolhas em condições confinadas no interior dos microcanais. A parte superior do dissipador será coberta com vidro para permitir a visualização e filmagem do escoamento.

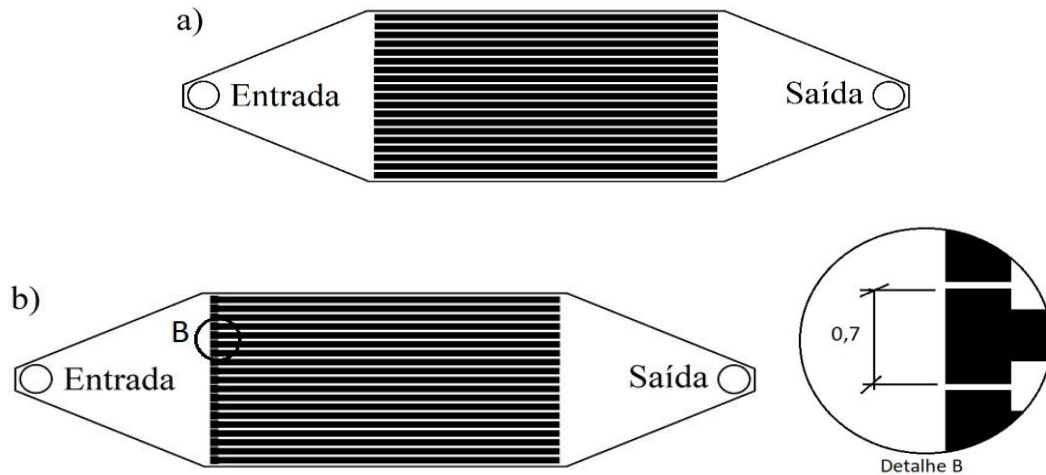


Figura 2 – Diagrama esquemático dos dissipadores a serem construídos.

A Fig. 3 ilustra esquematicamente o projeto da peça a ser impressa por manufatura aditiva contendo os dissipadores (uma peça será fabricada para cada dissipador). Nesta figura, a localidade dos pontos de injeção de ar nos microcanais é ilustrada pelos pontos dispostos na região interior dos microcanais. Na Fig. 3, as setas representam o sentido do escoamento da água e a posição onde será conectada a seringa para injeção de ar. Um motor de passo acoplado a esta seringa e conectado a uma placa de aquisição será utilizado de forma a controlar a vazão e, conseqüentemente, a frequência de nucleação das bolhas. Para a visualização do escoamento, uma peça em borosilicato será posicionada sobre o trocador e pressionada contra o mesmo através de uma flange, também fabricada por manufatura aditiva. Um total de 8 varões roscados posicionados nos furos ilustrados na Fig. 3 (base do dissipador), também presentes na flange, serão empregados para pressionar o vidro em borosilicato contra os microcanais e o o-ring (fixado no canal ilustrado na Fig. 3), vedando a seção de testes.

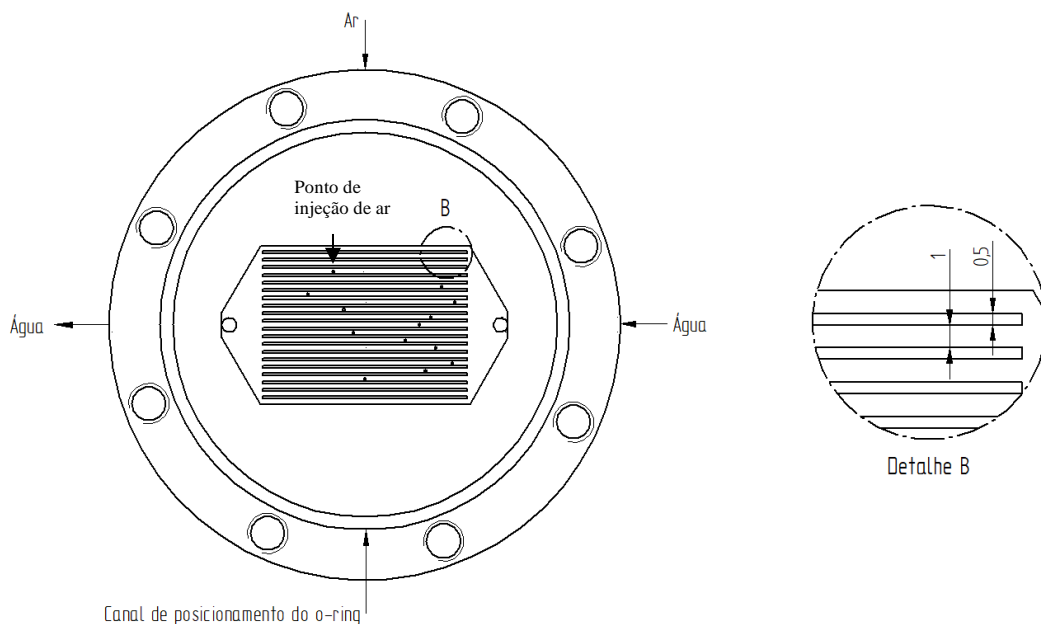


Figura 3 – Diagrama esquemático do dissipador já projetado e a ser fabricado.

3. METODOLOGIA EM DESENVOLVIMENTO PARA ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados será efetuada por meio de um programa a ser desenvolvido em MATLAB (2015), no qual, devido ao particulado (carbeto de silício) disperso na água, será possível verificar a ocorrência de fluxo reverso por meio de imagens capturadas por uma câmera de alta velocidade (Phantom v2012, 1000000 imagens/s com resolução de 128x16 pixels e 22500 imagens/s com resolução de 1280x800 pixels) submetidas primeiramente a uma análise qualitativa. Em seguida, essas imagens serão processadas para estimar a velocidade de escoamento em cada microcanal, e assim avaliar o campo de velocidades ao longo dos canais do dissipador. Por meio do processamento das imagens, será possível também caracterizar os efeitos de escoamento reverso associados ao crescimento das bolhas em condições confinadas no interior dos microcanais.

4. CONCLUSÃO

Neste estudo, com base em análise da literatura, caracterizou-se qualitativamente os danos da nucleação de bolhas em condições confinadas ao desempenho de dissipadores de calor baseados na ebulição convectivas em microcanais. Com o objetivo de estudar os fenômenos associados, propôs-se aparato e procedimento experimental que permitem avaliar o campo de velocidades durante o crescimento de bolhas em condições confinadas na distribuição do escoamento em dissipadores de calor compostos por multi-microcanais. Serão avaliados dissipadores com e sem a imposição de restrições ao escoamento na entrada dos microcanais. Como continuidade deste estudo, prevê-se a construção do aparato e fabricação dos dissipadores, o desenvolvimento do código para a análise das imagens do escoamento (possíveis devido ao particulado disperso na água) e a realização dos experimentos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo auxílio modalidade bolsa, processo nº 305673/2017-3, a FAPESP pelos auxílios modalidade bolsa, processos nº 2016/16849-3 e 2020/14819-5, e ao auxílio modalidade temático, processo nº 2019/08577-1. Os autores também agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por financiar em parte este estudo – Código de financiamento 001.

6. REFERÊNCIAS

- AGUIAR, G. M.; RIBATSKI, G. The effect of transient power hotspots on the heat transfer coefficient during flow boiling inside single microscale channels. **Heat Transfer Engineering**, v. 40, p. 1337-1348, 2019.
- BALASUBRAMANIAN, K.; LEE, P. S.; JIN, L. W.; CHOU, S. K.; TEO, C. J.; GAO, S. Experimental investigations on flow boiling heat transfer and pressure drop in straight and expanding microchannels – a comparative study. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 50, p. 2413-2421, 2011.
- BOURE, J. A.; BERGLES, A. E.; TONG, L. S. Review of two-phase flow instability. **Nuclear Engineering Design**, v. 25, p. 165-192, 1973.
- CHAVÉZ, C. A.; LEÃO, H. L. S. L.; RIBATSKI, G. Evaluation of thermal-hydraulic performance of hydrocarbon refrigerants during flow boiling in a microchannels array heat sink. **Applied Thermal Engineering**, v. 111, p. 703-717, 2017.
- CHAVÉZ, C. A.; MORAGA, N. O.; RIBATSKI, G. Thermal oscillations during flow boiling of hydrocarbon refrigerants in a microchannels array heat sink. **Applied Thermal Engineering**, v. 157, p. 113725, 2019.
- KANDLIKAR, A. G., Scale effects on flow boiling heat transfer in microchannels: A fundamental perspective. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 49, p. 1073-1085, 2010.
- KANDLIKAR, Satish G.; GRANDE, William J. Evolution of microchannel flow passages--thermo-hydraulic performance and fabrication technology. **Heat transfer engineering**, v. 24, n. 1, p. 3-17, 2003.
- KOSAR, A. K.; KUO, C.-J.; PELES, Y. Suppression of boiling flow oscillation in parallel microchannels by inlet restrictors, **Journal of Heat Transfer**, v. 128, p. 251-260, 2006.
- LEÃO, H. L. S. L.; DO NASCIMENTO, F. J.; RIBATSKI, G. Flow boiling heat transfer of R407C in a microchannels based heat spreader. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 59, p. 140151, 2014.
- LEÃO, H. L. S. L.; CHAVÉZ, C. A.; DO NASCIMENTO, F. J.; RIBATSKI, G. An analysis of the effect of the footprint orientation on the thermal-hydraulic performance of a microchannels heat sink during flow boiling of R245fa. **Applied Thermal Engineering**, v. 90, p. 907-926, 2015.
- LEE, J.; MUDAWAR, I. Two-phase flow in high-heat-flux micro-channel heat sink for refrigeration cooling application: Part I – pressure drop characteristics. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, p. 928-940, 2005.

- MATLAB 2015a (2015). The Mathworks. Inc., Natick-MA, USA.
- RIBATSKI, G. A critical overview on the recent literature flow boiling and two-phase flows inside micro-scale channels. **Experimental Heat Transfer**, v. 26, p. 198-246, 2013.
- RIBATSKI, G.; CABEZAS-GÓMES, L.; NAVARRO, H. A.; SAIZ-JABARDO, J. M. The advantages of evaporation in micro-scale channels to cool microelectronic devices. **Reform Thermal Engineering**, v. 6, p. 34-39, 2007.
- ROCHA, DOUGLAS MARTINS; KANIZAWA, FABIO TOSHIO; HAYASHI, KOSUKE; HOSOKAWA, SHIGEO; TOMIYAMA, AKIO; RIBATSKI, GHERHARDT. Pressure and shear stress analysis in a normal triangular tube bundle based on experimental flow velocity field. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 42, p. 1, 2020.
- ROYNE, A.; DEY, C. J. Design of a jet impingement cooling device for densely packed PV cells under high concentration. **Solar Energy**, v. 81, p.1014-1024, 2007.
- ROYNE, A.; DEY, C. J.; MILLS, D. R. Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 86, p. 451-483, 2005.
- SCHNEIDER, B.; KOSAR, A.; PELES, Y. Hydrodynamic cavitation and boiling in refrigerant (R123) flow inside microchannels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, p. 2838-2854, 2007.
- SZCZUKIEWICZ, S.; BORHANI, N.; THOME, J. R. Two-phase heat transfer and high-speed visualization of refrigerant flows in 100 x 100 μm^2 silicon multi-microchannels. **International Journal of Refrigeration**, v. 36, p. 402-413, 2013.
- TIBIRIÇÁ, C. B.; CZELUSNIAK, L. E.; RIBATSKI, G. Critical heat flux in a 0.38 mm microchannel for suppression of flow boiling instabilities. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 67, p. 48-56, 2015.
- TIBIRIÇÁ, C. B.; RIBATSKI, G. Flow boiling phenomenological differences between micro- and macroscale channels. **Heat Transfer Engineering**, v. 36, p. 937-942, 2015.