

## MICROPILARES POROSOS PARA INTENSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR EBULIÇÃO

Arthur Gomes da Silva Vilaronga, arthur.vilaronga@unesp.br<sup>1</sup>  
Renan Ferreira Rezende, renan.f.rezende@unesp.br<sup>1</sup>  
Leonardo Lachi Manetti, leonardo.manetti@unesp.br<sup>2</sup>  
Elaine Maria Cardoso, elaine.cardoso@unesp.br<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira - SP, 15385-000

<sup>2</sup>IFMS - Instituto Federal de Mato Grosso do Sul / Campus Campo Grande, Campo Grande - MS, 79100-510

<sup>3</sup>UNESP - Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista - SP, 13876-750

**Resumo.** Em função da demanda do mercado por dispositivos com alta capacidade de processamento, as técnicas de controle térmico envolvendo condução e convecção têm se tornado pouco eficazes, dada a necessidade de dissipação de altos fluxos de calor. Assim, o gerenciamento térmico envolvendo mudança de fase tem ganhado destaque como uma alternativa a atender essa necessidade. Por isto, este trabalho se propõe a avaliar o coeficiente de transferência de calor por ebulição em piscina de água deionizada utilizando uma superfície de aquecimento estendida, consistindo de micropilares de espuma metálica de cobre. Os micropilares foram fabricados por meio do processo de eletroerosão por penetração. Para fins de comparação, sob as mesmas condições de operação, foi testada uma superfície plana e uma superfície com a adição de espuma metálica de cobre (de mesma espessura dos micropilares). Verificou-se que canais segmentados, originados da adição de micropilares, beneficiam a transferência de calor para altos fluxos de calor devido à combinação do aumento da área superficial e a redução da resistência à partida das bolhas de vapor.

**Palavras chave:** Ebulição em piscina. Espuma metálica. Micropilares. Intensificação da transferência de calor.

**Abstract.** Due to the market demand for devices with high processing capacity, thermal control techniques involving conduction and convection have become ineffective, given the requirement to dissipate high heat fluxes. Thus, thermal management involving phase change has become an alternative. Therefore, this work proposes to evaluate the pool boiling heat transfer of deionized water using a micro pin fin heating surface of metal foam. The micro pin fins were manufactured using the EDM process. For comparison purposes, a flat surface and a surface with the addition of metal foam, with the same thickness as the micro pin fins, were tested under the same operating conditions. It was found that segmented channels, originating from the addition of micro pin fins, benefit heat transfer at high heat fluxes due to the combination of increased surface area and reduced resistance to the departure of vapor bubbles.

**Keywords:** Pool boiling. Metal foam. Micro pin fin. Heat transfer enhancement.

### 1. INTRODUÇÃO

Os crescentes avanços tecnológicos têm impulsionado a necessidade de desenvolvimento de sistemas de gerenciamento térmico capazes de dissipar altos fluxos de calor com restrições geométricas cada vez maiores. Com isto, os métodos tradicionais, que envolvem condução e convecção natural estão atendendo cada vez menos estes critérios. Desta forma, diversas pesquisas estão sendo realizadas a fim de desenvolver técnicas de resfriamento passivo envolvendo o processo de mudança de fase, como ebulição.

A ebulição em piscina é caracterizada pela mudança do estado líquido para o gasoso onde, diferentemente da ebulição convectiva, o fluido de trabalho se mantém em regime estacionário. Esta mudança de fase é resultado do gradiente de temperatura entre a temperatura da superfície em contato com o fluido e sua temperatura de saturação. Nukiyama (1934) é comumente creditado como um dos primeiros a desenvolver pesquisas na área e foi o primeiro a estabelecer uma curva que relaciona o fluxo de calor com o gradiente de temperatura (Fig. 1). O fenômeno de ebulição é caracterizado por dois parâmetros: o coeficiente de transferência de calor (CTC) e o fluxo de calor crítico (FCC). Em aplicações práticas, convém antecipar a ativação dos sítios de nucleação, acarretando na intensificação do CTC, e

postergar o FCC (ponto C na Fig. 1), pois, ao atingi-lo, tem-se a degradação da transferência de calor, podendo inclusive ocorrer a queima do dispositivo.

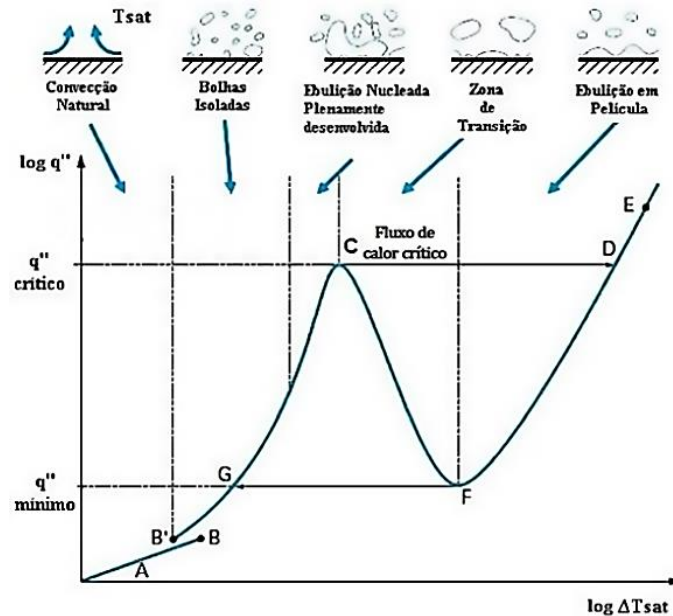


Figura 1. Curva de ebulição em piscina (adaptado de Bonjour e Lallemand, 2021).

Para intensificar o CTC e FCC utilizando técnicas passivas, existem dois caminhos possíveis: modificar o fluido de trabalho e/ou modificar a superfície de aquecimento. Em relação ao fluido de trabalho, a técnica mais utilizada é a dispersão de nanopartículas metálicas no fluido base, produzindo os chamados nanofluidos. Entretanto, essa técnica é de difícil repetibilidade porque o comportamento do CTC varia de acordo com o tempo e com o fluxo de calor, de modo que a técnica se comporta de forma randômica (MANETTI *et al.*, 2017). Assim, as modificações na superfície de aquecimento se apresentam como soluções mais viáveis. As modificações superficiais podem ocorrer em diferentes escalas, sendo as nano e microescalas mais utilizadas visto que as protuberâncias originadas provocam pequenas perturbações, favorecendo a microconvecção.

Liu *et al.*, (2022) desenvolveram superfícies com micropilares quadrados para intensificar a transferência de calor por ebulição em piscina do FC-72. Os autores observaram que as microestruturas promoveram um aumento na área de transferência de calor por evaporação, aumentando a taxa de crescimento das bolhas de vapor. Ademais, o confinamento entre os micropilares afetou positivamente a dinâmica de crescimento e partida das bolhas; os autores observaram uma intensificação de 158% e 71% no CTC e FCC, respectivamente, para a superfície microestruturada em relação à plana.

De acordo com Zhou *et al.* (2022), as regiões de baixa frequência de partida de bolhas geram pontos de superaquecimento (*hotspots*). Ao nuclear uma bolha de vapor, esta cresce como resultado das forças de inércia e partem com um diâmetro relativamente grande. Já para as regiões de maior frequência de partida de bolhas, a temperatura da superfície é menor pois maior quantidade de calor é retirada pela partida das bolhas de vapor de menor diâmetro.

Moghadasi, Saffari e Malekian (2021) produziram superfícies utilizando diferentes técnicas de fabricação para avaliar a influência dessas no desempenho térmico da ebulição em piscina. Os autores utilizaram a técnica de eletroerosão a fio e usinagem química (*chemical etching*), a qual utiliza a corrosão para remoção do material por meio de uma substância reagente. A intensificação do CTC foi de, aproximadamente, 37%, 121% e 177% para as superfícies usinadas quimicamente, por eletroerosão a fio e pela combinação das duas técnicas, respectivamente. A superfície produzida combinando as duas técnicas (superfície híbrida) foi capaz de atingir um FCC de 1189 kW/m<sup>2</sup>.

Ao diminuir o espaço entre os micropilares aumenta-se o efeito de bombeamento capilar, promovendo uma frequente reposição do fluido de trabalho em contato com a superfície de aquecimento, evitando a sua secagem. Entretanto, conforme identificado por Zhang *et al.* (2018), a porosidade das microestruturas e a relação entre o diâmetro hidráulico e o comprimento capilar possuem um valor crítico onde, a partir deste ponto, tem-se uma degradação do FCC. Por isso, o aumento do FCC é dado pelo balanço entre a resistência capilar (relacionada ao comprimento capilar) e o aumento de área efetiva.

Para Sajjad (2020), uma técnica capaz de intensificar os principais parâmetros da ebulição em piscina precisa combinar os efeitos de aumento da densidade dos sítios de nucleação, aumento da área efetiva de contato e redução da resistência à saída de vapor da superfície criando separação nos caminhos líquido-vapor. Portanto, micropilares podem ser uma boa alternativa para melhorar o CTC e postergar o FCC.

Outra modificação superficial que tem ganhado a atenção de pesquisadores é a utilização de espumas metálicas (*metal foams*), Fig. 2, pois possuem a vantagem de um significativo aumento da área superficial, quando comparadas a outras modificações. Isso as torna a escolha ideal quando são necessárias altas taxas de dissipação de calor e apenas um espaço limitado está disponível. Em superfícies porosas, a melhoria na transferência de calor ocorre principalmente devido às combinações de quatro fatores: (i) aumento na área efetiva da superfície; (ii) aumento da densidade de sítios de nucleação; (iii) aumento da capilaridade, a qual facilita o retorno do líquido para as regiões mais quentes (*hotspots*); (iv) aumento no comprimento da linha de contato sólido-líquido-vapor através dos poros, *i.e.*, molhabilidade (THIAGARAJAN *et al.*, 2015).

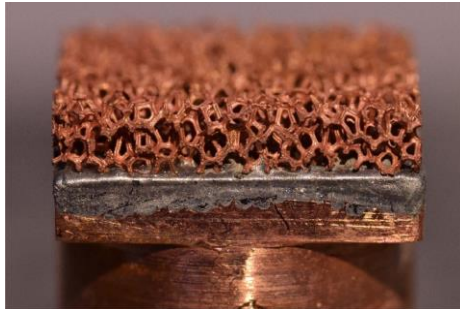


Figura 2. Superfície de aquecimento com adição de espuma metálica de cobre (MANETTI *et al.*, 2020).

Estruturas porosas, sob ação da força de tensão superficial, sugam o líquido de trabalho onde, quanto menor o diâmetro dos poros, maior será este efeito. Entretanto, diâmetros menores de poros não apenas aumentam a capilaridade como também apresentam maior resistência à partida das bolhas para altos fluxos (MA *et al.*, 2021).

Os parâmetros geométricos mais significativos que influenciam a transferência de calor por ebulição em piscina através de espumas metálicas são: a densidade de poros (PPI, poros por polegada), a porosidade  $\epsilon$  (razão do volume de vazio pelo volume total de um corpo ou elemento poroso, *i.e.*, corresponde à fração de vazio no interior da espuma) e a espessura da espuma. Jin *et al.* (2011) investigaram o processo de ebulição dos fluidos FC-72 e HFE-7000 em espumas de grafite. Os autores avaliaram os efeitos do tamanho dos poros na transferência de calor e relataram que poros maiores facilitam a partida das bolhas de vapor em comparação aos poros menores. O desempenho de transferência de calor foi maior em comparação com a uma superfície de referência (sem adição de espuma metálica).

Resultados semelhantes também foram relatados por Manetti *et al.* (2020) para ebulição em piscina HFE-7100 em espumas de cobre com densidade média de poros de 31,75 PPI e espessuras variando de 1 a 3 mm. Os autores observaram que quanto maior a espessura da espuma maior é a resistência à saída das bolhas de vapor, pois há um acúmulo de vapor no interior da espuma, o que inibe o arrefecimento da superfície aquecida e degrada a transferência de calor. Portanto, a menor espessura apresenta o melhor resultado de CTC para maiores fluxos de calor, mesmo que a área de contato com o fluido seja menor, porque dois outros parâmetros são mais significativos: o crescimento e desprendimento da bolha de vapor, e a capilaridade (capacidade de ‘bombeamento’ do líquido para as regiões mais quentes da superfície aquecida). Assim, a abertura de ‘caminhos’ para reduzir a resistência de partida das bolhas promove melhores resultados na ebulição nucleada.

Técnicas que combinam diferentes características como aumento da área de contato, da densidade dos sítios de nucleação e da capilaridade, são eficientes para promover a intensificação dos principais parâmetros da ebulição em piscina (ZHOU *et al.*, 2019). Como as principais técnicas envolvem superfícies com revestimento poroso e estruturas com diferentes configurações geométricas, o presente trabalho consiste na avaliação da influência de micropilares porosos de cobre sobre o coeficiente de transferência de calor (CTC) por ebulição em piscina, utilizando água deionizada, em condições de saturação à pressão local, como fluido de trabalho.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Aparato experimental

Na Fig. 3 tem-se o desenho esquemático do aparato experimental indicando os principais componentes tais como, a câmara de ebulição com a resistência auxiliar para controle de temperatura, (1) o sistema de aquisição de dados, (2) a fonte de potência, (3) a fonte de alimentação do (4) transdutor de pressão, (5) banho termostático (6) e computador. As aquisições dos sinais dos termopares, da tensão elétrica do transdutor de pressão e da tensão aplicada na resistência, são feitas por meio de um sistema DAQ AGILENT® 34970A.

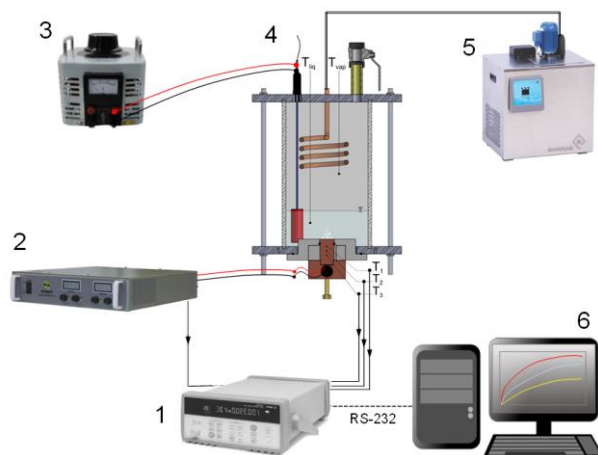


Figura 3. Desenho esquemático da bancada experimental (MANETTI, MOITA e CARDOSO, 2021).

A câmara de ebulição consiste em um vidro retangular ( $120 \times 100 \text{ mm}^2$ ) com 5 mm de espessura e 200 mm de altura, o qual está entre duas placas de aço inoxidável devidamente selada com borracha nitrílica e silicone. Um banho termostático, QUIMIS<sup>®</sup> Q241M, é utilizado para controlar a temperatura do condensador, localizado na parte superior da câmara de ebulição. Um transdutor de pressão absoluta Omega PXM309-2A realiza a aferição da pressão no interior da câmara de ebulição, a qual é mantida próxima à pressão atmosférica durante os testes em ebulição. A parte superior da câmara possui uma válvula para realização do vácuo, necessário para retirada de ar aprisionado na superfície e para o carregamento do fluido de trabalho. Um aquecedor auxiliar, tipo cartucho (350 W/220 V), está posicionado no interior da câmara de ebulição a fim de manter a temperatura do líquido à temperatura de saturação e é controlado por um VARIAC. Para monitoramento da temperatura do líquido e do vapor, dois termopares do tipo K de 0,5 mm com blindagem estão posicionados nas regiões de líquido e vapor, em diferentes alturas e posições opostas da resistência auxiliar (para não sofrerem influência da mesma).

A seção de teste, Fig. 4, consiste em uma peça de cobre circular com uma superfície superior quadrada ( $16 \times 16 \times 3 \text{ mm}^3$ ) usinada a partir de um bloco de cobre com 60 mm de altura (a seção de teste foi usinada a partir de uma peça única de cobre a fim de evitar resistência térmica de contato). Três termopares tipo K de 0,5 mm com blindagem (T1, T2 e T3) estão alocados na parte cilíndrica da seção de testes e esta, por sua vez, está fixada em um segundo bloco de cobre que contém a resistência elétrica, tipo cartucho, responsável pelo aquecimento da seção de teste. A fonte de potência FCC 75-30i de até 750 W, com tensão elétrica variando de 0 a 300 VDC, está conectada à resistência elétrica. Para garantir o isolamento térmico da seção de teste, é utilizada uma peça de politetrafluoroetileno (PTFE) e a uma fita de fibra de cerâmica.

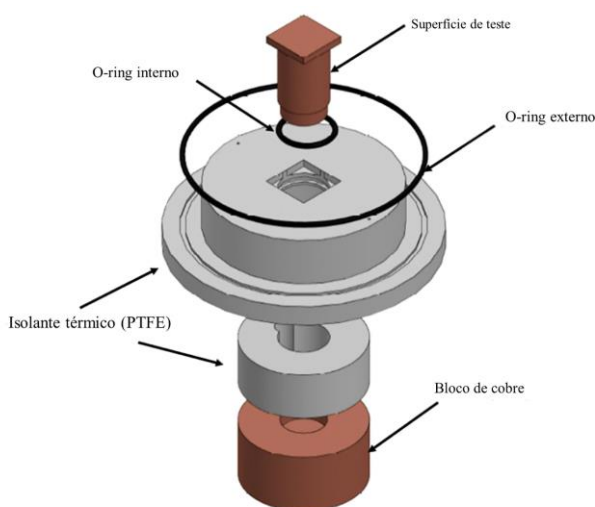


Figura 4. Seção de testes esquematizada e seu isolamento térmico (adaptado de KIYOMURA *et al.*, 2020).

## 2.2. Superfície de testes e procedimento experimental

Inicialmente, quatro superfícies foram submetidas a um processo de polimento mecânico utilizando pasta abrasiva de alumina (diâmetro médio da partícula de  $0,3 \mu\text{m}$ ) e, após, foram limpas com acetona e secas usando jato de ar

comprimido. Após o polimento, uma foi separada para ser usada testada sem nenhuma modificação (superfície Plana) como parâmetro de comparação. As demais foram usadas para adesão da espuma metálica na face polida.

A espuma de cobre (Cu) foi adquirida da Nanoshel<sup>®</sup> em placas de 500 × 500 mm com uma espessura ( $\delta$ ) de 3 mm; a escolha se deve à sua porosidade (90%), PPI (32 PPI) e tamanho de poro (0,5 mm). A espuma foi cortada em quadrados de 16 × 16 mm utilizando uma máquina de eletroerosão, mantendo a espessura original. O processo de solda na seção de testes foi feito pelo processo de brasagem por meio da aplicação de uma fina camada de liga de estanho ( $\approx 0,1$  mm) a qual é aquecida até o ponto de fusão ( $\approx 200$  °C). Um peso morto é colocado para pressionar a espuma contra a superfície e a camada de liga de estanho até que a mesma se solidifique.

Conforme reportado por Manetti *et al.* (2020), espessuras menores são melhores para altos fluxos de calor; assim, a fim de verificar possíveis incrementos na transferência de calor e no fluxo de calor crítico, optou-se por analisar espumas metálicas com 1 mm de espessura. Além disso, em duas das três espumas metálicas foram feitos micropilares conforme configurações apresentadas na Tab. 1 e ilustrados na Fig. 5. A terceira espuma metálica (superfície Cu Foam) foi mantida sem os micropilares para fins de comparação.

Tabela 1. Configurações geométricas dos micropilares.

Superfície	Largura (L)	Altura (A)	Espaçamento (E)
Cu Foam	–	–	–
MP1.5_0.5	1.5 mm	1 mm	500 $\mu$ m
MP1.5_1	–	–	1 mm

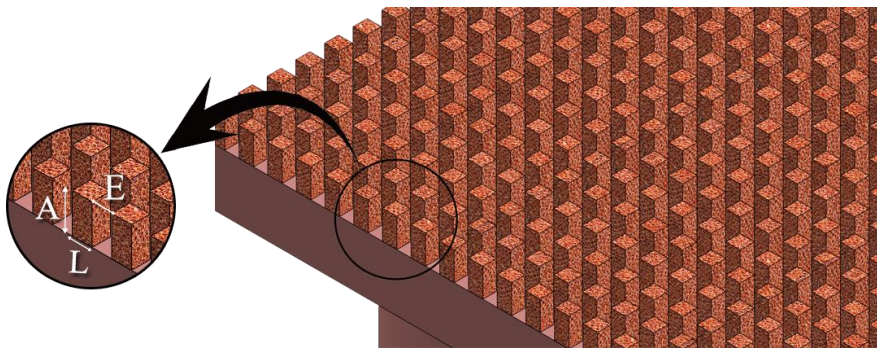


Figura 5. Desenho esquemático da seção de testes.

Os micropilares porosos (Fig. 6) foram fabricados a partir da superfície com espuma metálica com 1 mm de espessura; para tanto foi utilizado o processo de eletroerosão utilizando como eletrodo chapas de cobre cujas espessuras representem o espaçamento desejado entre os micropilares. Assim, microcanais foram fabricados ao longo do plano longitudinal e, posteriormente, ao longo do plano transversal (com o auxílio de um esquadro de precisão), formando assim os micropilares retangulares.

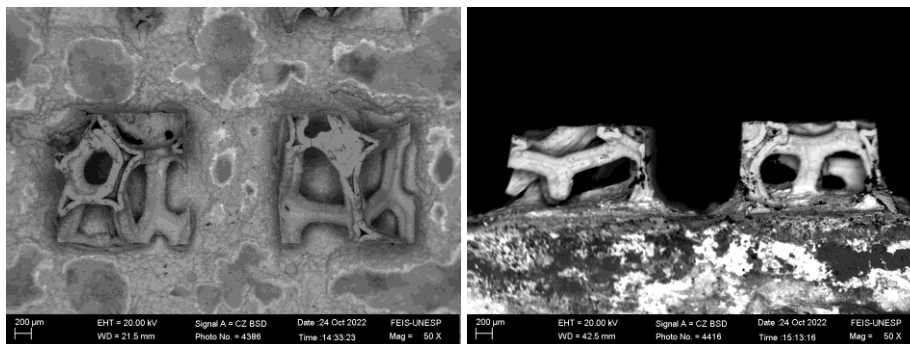


Figura 6. Vista (a) superior e (b) lateral da superfície MP1.5\_1 obtida por microscopia eletrônica de varredura.

Desta forma, após o processo de fabricação, as superfícies foram submetidas aos ensaios de ebulição com água deionizada. Inicialmente, para retirada dos gases não condensáveis, o fluido de trabalho foi submetido a um pré-aquecimento utilizando uma resistência auxiliar. Três termopares, alocados no bloco de cobre (Fig. 7), foram utilizados para medir o fluxo de calor e estimar a temperatura da superfície.

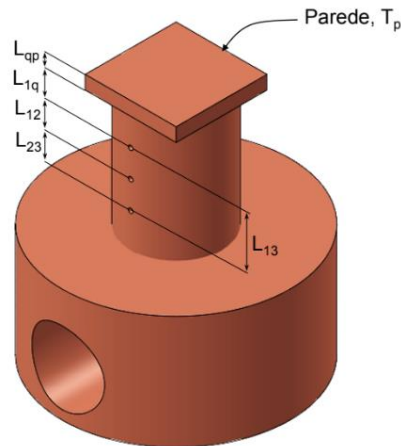


Figura 7. Posição dos termopares no bloco de cobre (adaptado de MANETTI *et al.*, 2020).

A potência foi aplicada em patamares crescentes na resistência elétrica alocada na base do bloco de cobre, por uma fonte variável de corrente contínua. Cada patamar correspondeu a um valor de fluxo de calor conhecido que foi usado como referência para o cálculo do fluxo de calor medido e perdido,

$$q''_{aplicado} = \frac{V^2}{R} \cdot \frac{1}{A_q} \quad (1)$$

sendo  $V$ ,  $R$  e  $A_q$  a tensão, a resistência e a área quadrada respectivamente. Com isto, o fluxo de calor foi determinado por meio da Lei de Fourier da condução, Eq. (2), assumindo condução de calor unidimensional ao longo do bloco de cobre.

$$q''_{medido} = \frac{\pi}{4} \cdot \left( k_{Cu} \frac{T_3 - T_1}{L_{13}} \right) \quad (2)$$

na qual  $k_{Cu}$  é a condutividade térmica do cobre e o fator  $\pi/4$  é usado como correção da área circular para a quadrada. Em seguida,  $q''_{medido}$  foi utilizado para determinar a temperatura da parede ( $T_p$ ) a partir da Eq. (3):

$$T_p = T_1 - \frac{q''_{medido}}{k_{Cu}} \left( \frac{4}{\pi} L_{1q} + L_{qp} \right) \quad (3)$$

sendo  $L_{1q}$  a distância do termopar  $T_1$  até o início da seção transversal quadrada; e  $L_{qp}$  a espessura da superfície quadrada. Por fim, utilizando a lei de Newton do resfriamento, pôde-se determinar o CTC como sendo:

$$h = \frac{q''_{medido}}{T_p - T_{sat}(P_{atm})} = \frac{q''_{medido}}{\Delta T_{sat}} \quad (4)$$

A incerteza da diferença de temperatura dos termopares tipo K é  $\pm 0,3$  °C (obtida por meio da calibração); a incerteza experimental do coeficiente de transferência de calor é maior para baixos fluxos de calor, diminuindo à medida que o fluxo de calor aumenta. Considerando todas as superfícies testadas, a incerteza experimental média para o fluxo de calor e para o coeficiente de transferência de calor foi de 5,8% e 6,9%, respectivamente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de ebulição estão apresentados na Figura 8. Observa-se que todas as superfícies modificadas foram capazes de minimizar o superaquecimento da superfície quando comparadas com a superfície de referência (Plana) para todos os fluxos aplicados. Nas superfícies modificadas têm-se dois efeitos governantes, e concorrentes, de intensificação: o aumento da área de contato e os ‘caminhos’ do líquido e do vapor. O aumento da área de contato proporciona uma maior dissipação do fluxo de calor imposto, devido ao aumento na densidade de sítios de nucleação; conjuntamente, os micropilares fornecem caminhos adicionais para a saída do vapor e reentrada de líquido, aumentando o valor do fluxo de calor crítico.

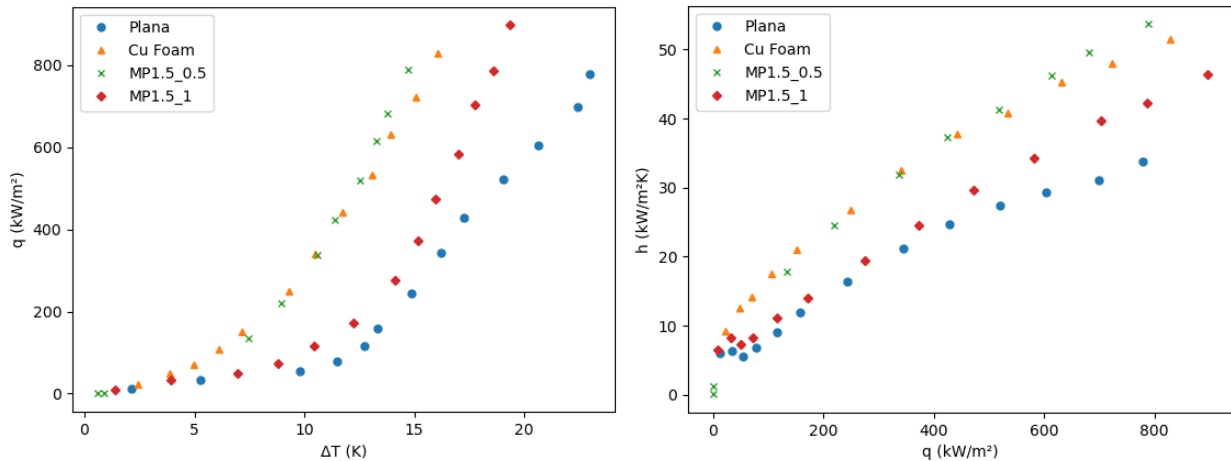


Figura 8. Influência das superfícies modificadas, testadas no presente trabalho, sobre (a) curva de ebulição e (b) CTC.

A fim de melhor observar o efeito dos micropilares porosos no aumento/deterioração do CTC, os resultados experimentais foram avaliados usando o fator de intensificação da transferência de calor  $\eta$  (Fig. 9), definido como a razão entre o coeficiente de transferência de calor para as superfícies com micropilares porosos e o CTC para a superfície Cu Foam.

$$\eta = \frac{h_{MP}}{h_{Cu\ Foam}} \quad (5)$$

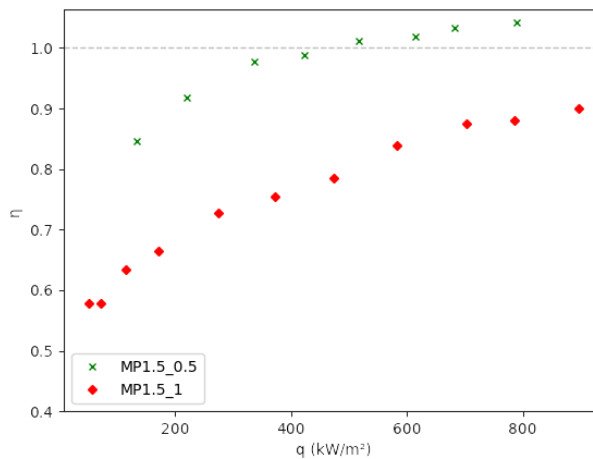


Figura 9. Fator de intensificação dos micropilares no CTC.

Na Fig. 9, conforme o espaçamento aumentou ocorreu uma degradação do CTC em relação à superfície com a adição da espuma metálica inteira (Cu Foam); o aumento no espaçamento significa que o número de micropilares diminuiu, o que reduz a área efetiva de transferência de calor. Já os micropilares com menor espaçamento proporcionaram um melhor desempenho no CTC para fluxos médios e altos, justamente em faixas de fluxo de calor onde há uma maior resistência à partida das bolhas devido ao acúmulo de vapor no interior da espuma metálica. De fato, a redução deste parâmetro (espaçamento) não só proporciona uma quantidade maior de micropilares e caminhos adicionais para a saída do vapor, como beneficia a transferência de calor e posterga a secagem da superfície por permitir o remolhamento da superfície, aumentando a capacidade de bombeamento do líquido para as regiões mais quentes da superfície aquecida.

#### 4. CONCLUSÕES

Com base na análise, a utilização de espuma metálica aumenta significativamente o coeficiente de transferência de calor por ebulição comparado à superfície plana, resultado do aumento da área efetiva de transferência de calor, da densidade dos sítios de nucleação, e da capacidade de bombeamento do líquido para as regiões mais quentes da superfície aquecida.

O aprimoramento do CTC usando superfícies com micropilares porosos está relacionado às características geométricas as quais afetam o número de pilares na superfície aquecida e, por conseguinte, a densidade de sítios de nucleação e os caminhos adicionais para a saída do vapor; superfícies com micropilares cujos espaçamentos são menores intensificam a transferência de calor, pois aumenta a ativação de sítios de nucleação em toda a superfície, o que melhora o processo de agitação local, além de facilitarem o remolhamento da superfície postergando a ocorrência de pontos secos (*dry spots*).

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNESP, ao apoio financeiro fornecido pelo PPGEM – UNESP/FEIS, a CAPES, ao CNPq (Processo 458702/2014-5) e a FAPESP (Processos 2013/15431-7 e 2019/02566-8).

## 6. REFERÊNCIAS

- BONJOUR, J. e LALLEMAND, M. “Transferts en changement de phase-Ébullition libre. Ébullition en vase”. *Physique énergétique*, 2021.
- JIN, L. W., LEONG, K. C. e PRANOTO, I. “Saturated pool boiling heat transfer from highly conductive graphite foams”. *Applied Thermal Engineering*, v. 31, n. 14-15, p. 2685-2693, 2011.
- KIYOMURA, I. S., NUNES, J. M., SOUZA, R. R., GAJGHATE, S. S., SWAPAN, B. e CARDOSO, E. M. “Effect of microfin surfaces on boiling heat transfer using HFE-7100 as working fluid”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 42, n. 7, 2020.
- LIU, Bin, YANG, XI, JIE, WEI, Jinjia e LI, Qing. “Enhanced pool boiling on micro-nano composited surfaces with nanostructures on micro-pin-fins”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 190, p. 122812, 2022.
- MA, Xiaojing, XU, Jinliang e XIE, Jian. “In-situ phase separation to improve phase change heat transfer performance”. *Energy*, v. 230, p. 120845, 2021.
- MANETTI, L. L., 2021. *Utilização de superfícies estendidas - espumas metálicas - para intensificação da transferência de calor por ebulição*. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira.
- MANETTI, L. L., MOITA, A. S. O. H. e CARDOSO, E. M. “A new pool boiling heat transfer correlation for wetting dielectric fluids on metal foams”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 171, p. 121070, 2021.
- MANETTI, L. L., MOITA, A. S. O. H., SOUZA, R. R. e CARDOSO, E. M. “Effect of copper foam thickness on pool boiling heat transfer of HFE-7100”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 152, p. 119547, 2020.
- MANETTI, L. L., STEPHEN, M. T., BECK, P. A. e CARDOSO, E. M. “Evaluation of the heat transfer enhancement during pool boiling using low concentrations of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water based nanofluid”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 87, p. 191–200, 2017.
- MOGHADASI, H., SAFFARI, H. e MALEKIAN, N. “Experimental and semi-analytical investigation of heat transfer in nucleate pool boiling by considering surface structuring methods”. *Experimental Heat Transfer*, v. 34, n. 4, p. 293–313, 2021.
- NUKIYAMA, S. “Maximum and minimum values of heat q transmitted from metal to water under atmospheric pressure”. *Soc. Mech. Eng. Jpn.* 1934 (37), v. 354, n. 367, p. 2, 1934.
- SAJJAD, Uzair, SADEGHIANJAHROMI, Ali, ALI, Hafiz Muhammad e WANG, Chi-Chuan. “Enhanced pool boiling of dielectric and highly wetting liquids - a review on enhancement mechanisms”. *International Communications In Heat And Mass Transfer*, v. 119, p. 104950, 2020.
- THIAGARAJAN, S. J., YANG, R.; KING, C. e NARUMANCHI, S. “Bubble dynamics and nucleate pool boiling heat transfer on microporous copper surfaces”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 89, p. 1297-1315, 2015.
- ZHANG, Yonghai, ZHOU, Jie, ZHOU, Wenjing e QI, Baojin; WEI, Jinjia. “CHF correlation of boiling in FC-72 with micro-pin-fins for electronics cooling”. *Applied Thermal Engineering*, v. 138, p. 494-500, 2018.
- ZHOU, Jie, QI, Baojin e WEI, Jinjia. “Critical heat flux on heterogeneous fractal surfaces with micro-pin-fins in pool boiling Part I: the effects of distribution and subcooling”. *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, v. 136, p. 1338-1348, 2019.
- ZHOU, Jie, XU, Pengzhuo, QI, Baojin, ZHANG, Yonghai e WEI, Jinjia. “Effects of micro-pin-fins on the bubble growth and movement of nucleate pool boiling on vertical surfaces”. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 171, p. 107186, 2022.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.