

NOVAS TÉCNICAS DE MODIFICAÇÕES SUPERFICIAIS PARA AUMENTO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR EBULIÇÃO

Isabela I. da Silva^{1*}, Igor S. Kiyomura², Reinaldo R. de Souza³, Elaine M. Cardoso^{4*}

1. Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, UNESP/FEIS
2. Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, UNESP/FEIS
3. Pesquisador, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, UNESP/FEIS
4. Professora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, UNESP/FEIS

Resumo

Nas últimas décadas, a necessidade de produzir trocadores de calor mais eficientes e compactos, especialmente na indústria microeletrônica, tem motivado o estudo de novas técnicas para aumentar a transferência de calor por ebulição. A superfície de aquecimento pode ser modificada por meio da presença de protuberâncias (micro aletas ou pilares), as quais aumentam a área efetiva de troca térmica. Dentro desse contexto, o presente trabalho analisa o fenômeno de ebulição em piscina utilizando, como superfícies de aquecimento, uma superfície de cobre plana e outra microestruturada. A superfície plana é necessária para validação do aparato experimental e comparações com os resultados obtidos para a superfície microestruturada. O objetivo deste trabalho é analisar a influência de superfícies modificadas sobre a transferência de calor, levando em consideração a geometria das microestruturas (micropilares). Para a realização dos testes, o fluido de trabalho é a água deionizada (à pressão atmosférica e à temperatura de saturação). A caracterização das superfícies de aquecimento foi realizada usando as técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaio de molhabilidade e termografia. Os resultados alcançados possibilitam novas percepções do papel das superfícies microestruturadas no processo de ebulição e na transferência de calor, contribuindo para estabelecer diretrizes básicas de projeto para novas tecnologias de superfície com alta capacidade de remoção de calor para aplicações avançadas no gerenciamento térmico.

Palavras-chave: superfícies microestruturadas, ebulição nucleada, coeficiente de transferência de calor.

Apoio financeiro: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP); Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Introdução

Devido à forte demanda do mercado por produtos cada vez mais eficientes, a procura de novas técnicas que maximizem as trocas térmicas em equipamentos como, dispositivos microeletrônicos, células de combustível e concentradores de radiação solar, continua em alta. Algumas dessas técnicas consistem em tratar a superfície aquecedora de forma a variar suas características (Kiyomura et al., 2016; Souza et al., 2014). Por exemplo, mediante algum tratamento mecânico ou químico (superfícies nano e/ou micro estruturadas) é possível tratar/modificar a superfície aquecedora, contribuindo para aumentar tanto o coeficiente de transferência de calor (CTC) quanto o fluxo de calor crítico (FCC). Segundo alguns autores (Liang e Mudawar, 2019), esse aumento se deve ao aumento da rugosidade superficial que acarreta em um aumento da área superficial de transferência de calor e, ao mesmo tempo, no acréscimo de cavidades ou sítios de nucleação.

Superfícies microestruturadas - superfícies com a presença de micropilares (protuberâncias) - são capazes de proporcionar pequenas perturbações no líquido, auxiliando na dinâmica das bolhas de vapor (micro convecção). Além disso, o arranjo desses micropilares pode aumentar a densidade de sítios de nucleação ou cavidades ativas levando a um aumento do CTC. As micro/nano aletas, pilares e/ou pinos são estruturas geralmente feitas de silício, mas também podem ser feitas de outro material termicamente condutor, auxiliando na remoção de calor. Estas estruturas projetam-se para fora da superfície, aumentando a área da superfície aquecedora e alterando o escoamento do fluido. As microaletas podem ter diferentes formas e tamanhos e, também, podem estar dispostas em diferentes padrões a fim de melhorar a transferência de calor (Lu et al., 2016).

O presente estudo baseia-se em ensaios experimentais no regime de ebulição nucleada da água (em condições saturadas), tanto em superfície lisa (a qual corresponde à superfície de referência) quanto em superfície modificada (micro e/ou nano estruturada). Assim, além de viabilizar o desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas à dissipação de elevadas taxas de calor, possibilita reduções de custos operacionais e de fabricação de equipamentos, com impacto direto no meio-ambiente através de uma maior eficiência energética e no decréscimo do uso de matérias-primas durante a manufatura do equipamento para atender as necessidades de dissipação.

Metodologia

As superfícies de aquecimento utilizadas nos experimentos consistem em uma superfície de cobre plana, com dimensões de 16 x 16 mm², polida com lixa #600 (corresponde a uma rugosidade superficial média, $R_a = 0,14 \mu\text{m}$) e uma superfície com a presença de microaletas (rugosidade efetiva, $R_a = 1,60$), com altura (L) de 150 μm , diâmetro (D) de 250 μm e espaçamento (s) de 250 μm , conforme Fig. 1.

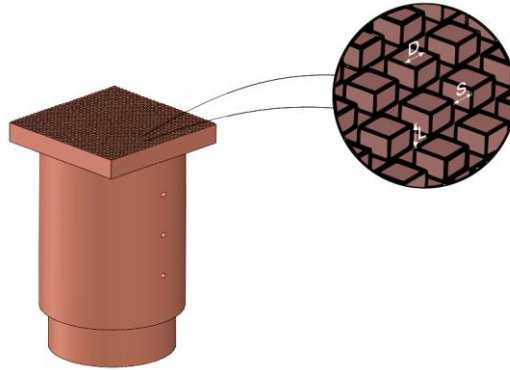


Figura 1 - Desenho esquemático da superfície microestruturada (seção de teste).

Todos os testes são realizados utilizando água deionizada como fluido de trabalho (400 ml) em condições saturadas, à pressão atmosférica, a fim de garantir a repetitividade dos resultados.

Aparato Experimental

A bancada experimental, cujo desenho esquemático é apresentado na Fig. 2, possui como principais componentes a seção de testes, banhos termostáticos, fonte de alimentação, sistema de aquisição de dados e o computador para aquisição e pré-tratamento dos dados. A fonte de potência de até 750 W, com tensão elétrica variando entre 0 – 300 Vcc, está conectada à resistência elétrica do tipo cartucho (300 W/220 V). 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 de aquisição de dados AGILENT 34970A.

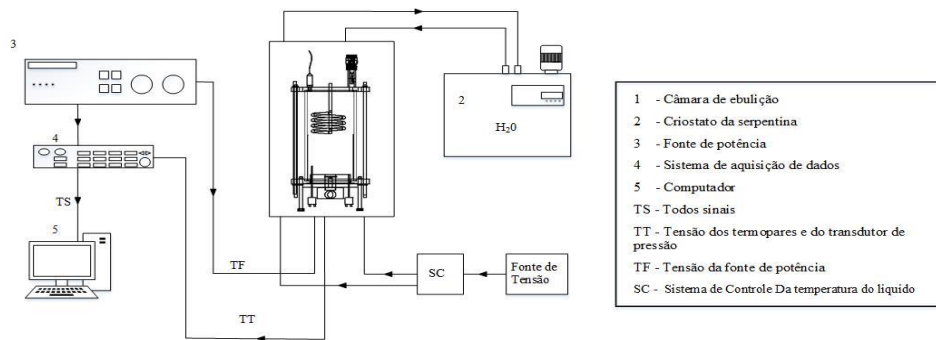


Figura 2. Desenho esquemático do aparato experimental.

A câmara de ebulição é composta por uma cuba de vidro de 5 mm de espessura e dimensões 100 x 100 x 200 mm, duas chapas de aço inoxidável AISI 316 com dimensões de 150 x 150 x 10 mm, um condensador tipo serpentina de cobre e a seção de testes, conforme mostra a Fig. 3. Para as vedações da câmara de ebulição e da cuba de vidro utiliza-se borracha nitrílica e silicone.

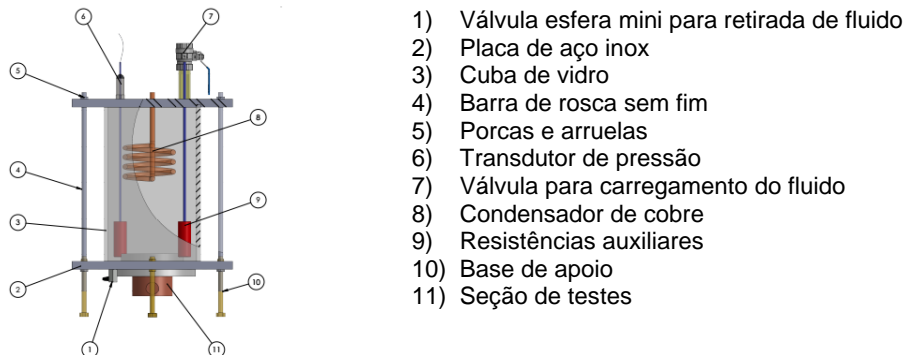


Figura 3. Câmara de ebulição.

O banho termostático é utilizado para controlar a temperatura do condensador, tipo serpentina, localizado na parte superior da câmara de ebulição. Um transdutor de pressão permite medir a pressão no interior da câmara de ebulição, a qual foi mantida próxima a pressão atmosférica local (98 kPa) durante os testes. A parte superior da câmara de ebulição possui uma válvula para realização de vácuo e posterior carregamento do fluido de trabalho. Aquecedores auxiliares, fixados na parte interna da câmara de ebulição, têm a função de manter a tem-

peratura do líquido à temperatura de saturação. A seção de testes, mostrada na Fig. 4, é composta por um tarugo de cobre com seção transversal quadrada ($16 \times 16 \times 60 \text{ mm}^3$) contendo três termopares tipo K, fixados no interior de três orifícios localizados ao longo do tarugo de cobre, com o objetivo de determinar as temperaturas e o fluxo de calor entregue ao fluido de trabalho.

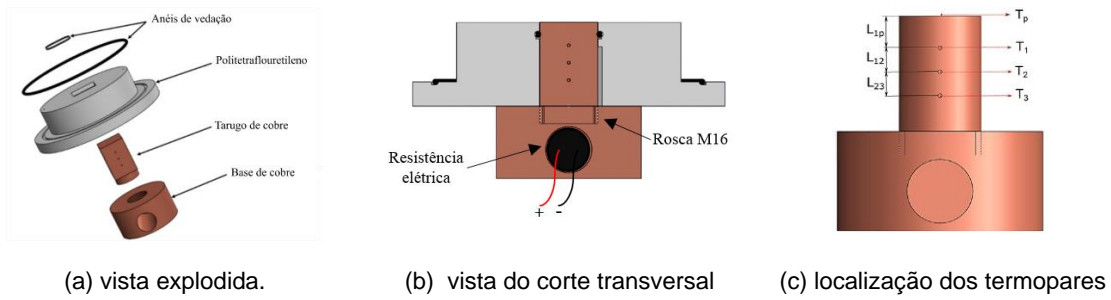


Figura 4. Desenho esquemático da seção de testes.

A parte inferior do tarugo de cobre contém uma rosca M16 de acoplamento para fixar à base do bloco de cobre. Durante os experimentos, o bloco de cobre é aquecido por uma resistência elétrica tipo cartucho, alimentada pela fonte de potência. O isolamento térmico da seção de testes é feito com uma peça de politetrafluoretileno e vermiculita.

Procedimento Experimental

Os experimentos foram realizados utilizando água-deionizada em condições saturadas, à pressão atmosférica. As condições saturadas são asseguradas mantendo a diferença entre a temperatura do fluido de trabalho, dentro da câmara de ebulição, e a temperatura de saturação, estimada pelo transdutor de pressão, dentro da faixa de incerteza do termopar ($\pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$).

Antes de cada ensaio, realizou-se vácuo na câmara de ebulição e, então, fez-se o carregamento do fluido de trabalho, sendo a pressão na câmara equalizada com a pressão atmosférica após o carregamento. As condições de testes são determinadas por monitoramento da pressão e temperatura dentro da câmara de ebulição. Uma vez estabilizadas as condições de testes e o processo de ebulição iniciado, o fluxo de calor imposto foi crescente em um intervalo de 25 a 900 kW/m^2 . A fim de garantir a estabilização do regime, cada patamar de fluxo de calor aplicado tem duração de no mínimo 1500 segundos, mas somente os dados de temperatura para os últimos 500 segundos do intervalo são considerados na análise. A condição de estabilização do regime caracteriza-se por variações na temperatura dentro da faixa de incerteza de sua medição.

Os valores de temperatura foram obtidos por um sistema de aquisição de dados a partir de três termopares posicionados no tarugo de cobre (Figura 4(c)). Pela lei de Fourier, considerando condução unidimensional em regime permanente, foi possível calcular o fluxo de calor entregue ao fluido de trabalho e a temperatura da superfície aquecida (T_p). Por fim, a partir da lei de resfriamento de Newton, pode-se realizar o cálculo do coeficiente de transferência de calor, h .

Resultados e Discussões

A validação do aparato experimental (Fig. 5) foi realizada a partir de testes experimentais com a superfície de aquecimento plana, utilizando a correlação fornecida pela literatura de Rohsenow (1952) e pelo ajuste de curva proposto por Stephan (1992), as quais são dadas pelas Eqs. (1) e (2), respectivamente.

$$h = \frac{1}{C_{sf}} Pr_l^{-s} \frac{q'' c_{pl}}{h_{lv}} \left(\frac{\mu_l h_{lv}}{q''} \right)^r \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{-\frac{1}{2} r} \quad (1)$$

$$h = C q''^n \quad (2)$$

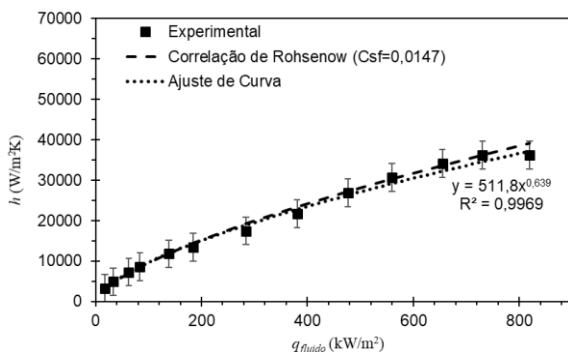


Figura 5 - Validação do aparato experimental por ajuste de curva exponencial e correlação de Rohsenow (1952).

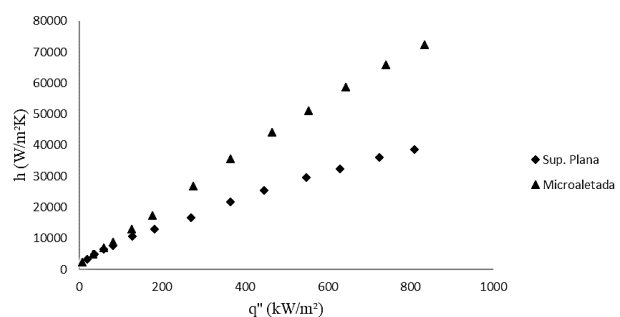


Figura 6 - Comparação dos resultados, em termos de h , para superfícies plana e microaletada.

O aumento no CTC para as superfícies microaletadas (Fig. 6) está relacionado a uma razão de aspecto maior que, por conseguinte, fornece uma maior área com capacidade de remoção de calor.

Após o ensaio de ebulição, a caracterização das amostras foi realizada de forma a obter informações estruturais (Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV), do ângulo de contato (a partir de imagens de uma gota sés-sil de água e medido por meio do software ImageJ) e da distribuição de temperatura sobre a superfície de aquecimento (realizada por meio de uma câmera termográfica Fluke Ti-09). Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 1.

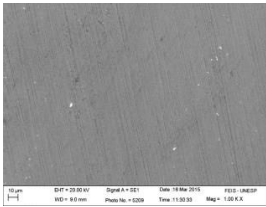

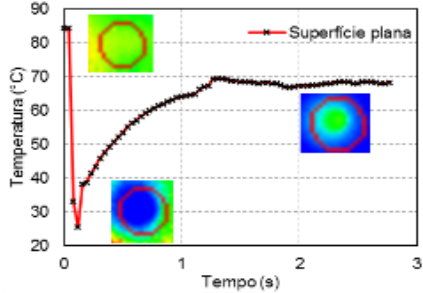
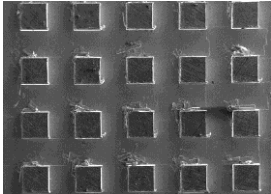

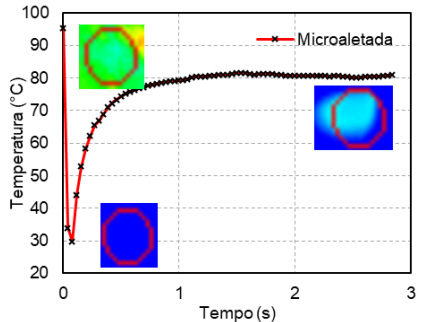
Superfície	MEV	Ensaio de Molhabilidade	Termografia
Plana		 Ângulo de contato estático, $\Theta = 95^\circ$	
Microaletada		 Ângulo de contato estático, $\Theta = 107^\circ$	

Tabela 1 - Resultados da caracterização para Microscopia Eletrônica de Varredura, ensaio de molhabilidade e ensaio termográfico.

Conclusões

O diâmetro hidráulico do canal nas superfícies microestruturadas é um dos principais parâmetros em um projeto bem sucedido de superfície para aplicações em transferência de calor por ebulição.

As superfícies microaletadas apresentam um aumento significativo no CTC devido ao aumento de área proporcionado pela presença das microaletas (densidade de aletas por mm ou polegada), intensificando a densidade de sítios de nucleação (aumento da área efetiva de remoção de calor).

A rugosidade da superfície e o ângulo de contato estático dependem das condições superficiais da superfície de aquecimento. Todas as superfícies testadas possuem comportamento hidrofóbico, porém, a análise termográfica indica que a área superficial afetada pela gota de água na superfície microaletada é maior do que na superfície plana, indicando que mais calor é removido da superfície modificada (a transferência de calor ocorreu de forma mais intensa e rápida nas superfícies microestruturadas, levando menos de 1 segundo para a temperatura estabilizar).

Referências Bibliográficas

Kiyomura, I.S., Manetti, L.L., Cunha, A.P., Ribatski, G., Cardoso, E.M., An analysis of the effects of nanoparticles deposition on characteristics of the heating surface and on pool boiling of water, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 106 (2016).

Liang, G., Mudawar, I., Review of pool boiling enhancement by surface modification, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 128 (2019).

Lu, L., Fu T., Tang, Y., Tang, T., Tang, B., Wan, Z. A novel in-situ nanostructure forming route and its application in pool-boiling enhancement. *Experimental Thermal and Fluid Science*. v. 72, p. 140–148, 2016.

Rohsenow, W. M., A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids, *Trans. ASME J. Heat Transfer* 74 (1952) 969–976.

Sarafraz, M. M.; Hormozi, F.; Peyghambarzadeh, S. M. Pool boiling heat transfer to aqueous alumina nano-fluids on the plain and concentric circular micro-structured (CCM) surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 72, p. 125–139, 2016.

Souza, R.R., Passos, J.C., Cardoso, E.M., Influence of nanoparticle size and gap size on nucleate boiling using HFE7100, *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 59, pp. 195-201, 2014.

Stephan, K. Heat transfer in condensation and boiling. Berlin: Springer-Verlag, 1992.