



Fabricação e Caracterização de Microaletas Para Trocadores de Calor Baseados em Ebulição

Velandia L.P, Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos (LETef), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), lpvelandial@usp.br
Moreira D.C, EESC - USP, dcmoreira@usp.br

Resumo.

O gerenciamento térmico de componentes eletrônicos é essencial para possibilitar o desenvolvimento de novas tecnologias. Com a evolução das técnicas de fabricação de microchips, há uma crescente concentração de transistores e miniaturização de componentes, o que requer a dissipação de altas taxas de calor em espaço reduzido, a fim de garantir a operação dentro de faixas seguras de temperatura. Muitos estudos associados à transferência de calor por ebulição convectiva em microcanais durante os últimos anos foram motivados por tal demanda, com resultados promissores associados à dissipação de altos fluxos de calor com pouca variação de temperatura nos dispositivos. Particularmente, o uso de superfícies microestruturadas em vãos divergentes tem mostrado resultados promissores, e estudos indicam que a combinação de algumas dimensões das superfícies microestruturadas com o diâmetro de desprendimento de bolha esperado está associada a um melhor desempenho de transferência de calor por ebulição nucleada. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo a proposição e fabricação de três superfícies microestruturadas baseadas em microaletas trapézoidais tendo como base dois diâmetros de desprendimento de bolha distintos. Nesta etapa são abordadas as relações das dimensões com os tamanhos de bolhas esperados, as estratégias de fabricação das aletas por micro-usinagem e a caracterização superficial das amostras fabricadas. Doze amostras foram fabricadas em cobre, e foi possível observar a viabilidade de fabricação das geometrias propostas, apesar de alguns desafios a serem superados.

Palavras chave: Aleta, microestrutura, microfresamento, rugosidade, molhabilidade

RESUMO EXPANDIDO

A ebulição convectiva tem sido um tema de grande interesse de pesquisa durante as últimas décadas, especialmente em superfícies microestruturadas, como aletas e canais, devido à sua grande capacidade de remover cargas térmicas elevadas em espaços reduzidos, mantendo pequenos gradientes de temperatura. Em particular, o uso de superfícies microaletadas tem apresentado bons resultados, com redução da queda de pressão, altos coeficientes de transferência de calor e elevação do fluxo crítico de calor (FCC). Além disso, de acordo com o fluido utilizado e a pressão de trabalho, a temperatura de operação pode ser ajustada para os valores desejados.

A proposição de microestruturas para aumento da transferência de calor pode ser realizada a partir de estudos paramétricos baseados em geometrias padronizadas e comumente empregadas em dissipadores de calor, os quais costumam ter caráter empírico. Por outro lado, alguns estudos propuseram estruturas com base no que se conhece da física do processo de ebulição, e apresentaram resultados mais promissores não só de desempenho, mas também de avanço na compreensão dos fenômenos da ebulição (Kandlikar (2013), Woodcock et al. (2019), Tamvada et al. (2021)). Recentemente, Moreira et al. (2023) apresentaram uma estrutura de microcanais para ebulição convectiva cuja geometria em duplo-V assimétrico foi inspirada no trabalho de Kandlikar (2013), modificada para ebulição convectiva para interagir com as bolhas geradas e formar caminhos preferenciais de líquido e vapor, proporcionando a dissipação de até 93 W/cm² durante a ebulição convectiva do fluido HFO1336mzz(Z) sem atingir o FCC.

A proposta deste trabalho é desenvolver estruturas que se beneficiem de canais em V assimétricos para direcionar as bolhas para a saída dos dissipadores de calor, com canais transversais retangulares para maximizar a área de transferência de calor e proporcionar caminhos preferenciais de líquido. Assim, as microestruturas consistem em aletas alinhadas na forma de trapézios retângulos, com larguras, alturas e distâncias correspondentes a diferentes relações com o diâmetro de desprendimento de bolhas (Db), que variam de 0,5 Db a 2 Db, conforme listado na Tabela 1. Para este trabalho, foi considerado o uso do fluido Opteon™ MZ (HFO1336mzz(Z)), operando a duas pressões de trabalho, 92 kPa e 142 kPa, o que corresponde a diâmetros de desprendimento de bolha de aproximadamente 0,7 mm e 0,3 mm, respectivamente.

As configurações de micropinos foram determinadas a partir de resultados de simulações no ANSYS Fluent, que abrangeram um amplo intervalo de condições de fluxo Velandia and Moreira (2024). Com base na visualização das velocidades no interior das aletas e canais, selecionaram-se as geometrias mais adequadas para o estudo. Essas geometrias foram fabricadas no Laboratório de Máquinas-Ferramentas da EESC-USP com as seguintes dimensões:



Tabela 1: Superfícies testadas

	θ		H	S	L1	W
S1	60		0.5	0.3	0.5	0.5
S2	60		0.3	0.5	0.3	0.5
S3	60		0.3	0.3	0.3	0.3

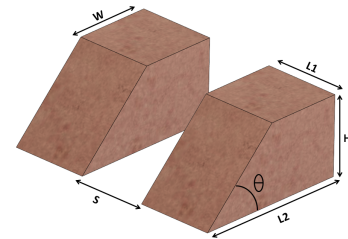


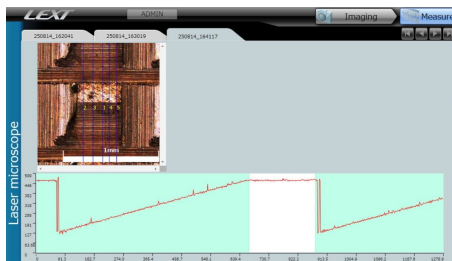
Figura 1: Dimensões

1. Materiais e Métodos

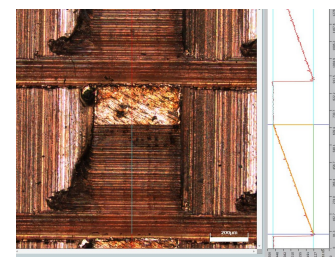
As amostras foram fabricadas em cobre eletrolítico (pureza 99,9%), escolhido por sua elevada condutividade térmica (aproximadamente $390\text{--}400, W/m \cdot K$ a 20°C), o que favorece a rápida dissipação e a distribuição uniforme de calor. A usinagem das peças foi realizada em um centro de usinagem CNC ROMI D600, do Laboratório de Máquinas-Ferramentas (LAMAFE), por fresamento (face milling) em uma área de $1 \times 1, cm^2$. Os canais foram produzidos com disco de precisão, formando microcanais com larguras nominais de 0,3, mm e 0,5, mm. As microaletas trapezoidais foram confeccionadas com o uso de uma ferramenta de perfil em cunha com ângulo de 60° , garantindo tolerâncias dimensionais adequadas e um acabamento superficial compatível com aplicações em ebulição convectiva.

2. Resultados e Conclusões

A caracterização das amostras foi realizada com um microscópio confocal no Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA), equipamento que permite a análise tridimensional da topografia superficial com alta resolução, como se observa na Figura 2a. Foram medidos parâmetros de rugosidade, como altura máxima (Sz), assimetria do perfil (Ssk) e curtose (Sku), que são relevantes para compreender o desempenho térmico e hidrodinâmico de superfícies em ebulição convectiva. O parâmetro Sz fornece a medida da amplitude máxima de picos e vales, enquanto o Ssk quantifica a simetria do perfil em relação ao plano médio — valores negativos indicam maior presença de vales, o que pode favorecer a retenção de fluido e a nucleação de bolhas. Já o Sku avalia a predominância de picos afiados ou vales profundos, afetando a molhabilidade e a distribuição de fluxo bifásico.



(a) Medidas da superfície



(b) Superfície aletada

Os parâmetros de rugosidade obtidos para as amostras estão apresentados na Tabela 1. A amostra S1 apresentou valores de $Sz = 10,565$, $Ssk = -0,167$ e $Sku = 3,731$. Para a amostra S2, os valores foram $Sz = 13,542$, $Ssk = -0,987$ e $Sku = 3,396$. Já a amostra S3 apresentou $Sz = 9,424$, $Ssk = -0,228$ e $Sku = 2,633$. Esses resultados evidenciam diferenças entre as superfícies, especialmente no parâmetro Ssk , que indica maior presença de vales na S2 em comparação com as demais. Realizarão-se testes qualitativos de molhabilidade com água, observando-se o espalhamento do fluido em diferentes regiões da superfície aletada. Foram encontrados erros de 10,6% entre as medidas propostas e as medidas de fabricação da amostra S1, 6,48% na S2 e 17,52% na amostra S3. Os resultados indicaram que variações nas dimensões das aletas e na ferramenta de corte influenciam significativamente o comportamento do líquido sobre a superfície, e observou-se que a presença e a orientação de rebarbas podem alterar a interação fluido-superfície, devendo ser controladas em futuras fabricações.

REFERÊNCIAS

Kandlikar, S. G. (2013). Controlling bubble motion over heated surface through evaporation momentum force to enhance pool boiling heat transfer. *Applied Physics Letters*, 102(5):051611.

- Moreira, D. C. et al. (2023). Flow boiling of r1336mzz(z) in tapered microgaps with asymmetric dual-v microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 228:120440–120440.
- Tamvada, S. R., Alipanah, M., and Moghaddam, S. (2021). Membrane-based two phase heat sinks for high heat flux electronics and lasers. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 11(10):1734–1741.
- Velandia, L. P. and Moreira, D. C. (2024). Design and numerical investigation of trapezoidal micro-pin fins for cooling systems. In *Proceedings of the 20th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2024)*, SP, Brazil.
- Woodcock, C., Ng'oma, C., Sweet, M., Wang, Y., Peles, Y., and Plawsky, J. (2019). Ultra-high heat flux dissipation with piranha pin fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128:504–515.