

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE NUCLEAÇÃO DE BOLHAS DURANTE A EBULIÇÃO CONVECTIVA DE ÁGUA SUBRESFRIADA SOB ORIENTAÇÃO VERTICAL ASCENDENTE

Dannilo Belo Cardoso

Maurício Mani Marinheiro

Daniel Borba Marchetto

Gherhardt Ribatski

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo

dann.belo022@usp.br

Objetivos

O coeficiente de transferência de calor (CTC) durante a ebulição convectiva tem sido um parâmetro amplamente investigado, uma vez que os mecanismos de transferência de calor associados a este fenômeno ainda não são totalmente compreendidos. Modelos de previsão do CTC para esta condição se baseiam no particionamento dos mecanismos de transferência de calor presentes, como a evaporação da microcamada de líquido na base das bolhas, o remolhamento da superfície após o desprendimento das bolhas e a convecção monofásica. A densidade de sítios de nucleação, conforme apontado por Richenderfer *et al.* (2018), é um parâmetro fundamental para a avaliação dos mecanismos relacionados à nucleação de bolhas. Comumente, este parâmetro é levantado a partir de métodos indiretos, como correlações e modelos de previsão, devido à dificuldade de avaliá-lo experimentalmente. Devido a isso, não há um consenso na literatura acerca do grau de influência deste mecanismo de transferência de calor na ebulição convectiva. Em vista disso, este trabalho tem como objetivo a avaliação experimental deste parâmetro durante a ebulição convectiva de água em estado subresfriado utilizando técnicas baseadas em visão computacional.

Métodos e Procedimentos

A avaliação paramétrica da densidade de sítios de nucleação foi realizada empregando-se fluxos mássicos (G) de 300 a 1000 kg/m²s e graus de subresfriamento (Δ_{sub}) de 5,4 a 22,5 °C, estabelecidos no início da seção de testes. Esta seção consistiu em um canal de seção quadrada com 10x10 mm² de área transversal e 60 mm de comprimento. Uma de suas faces contia um recobrimento de óxido de índio e estanho (ITO), material eletricamente condutivo e transparente, que permitiu a aplicação de fluxo de calor simultaneamente à visualização do escoamento. Dessa forma, fluxos de calor de 0 a 3000 kW/m² foram empregados através do efeito Joule. O fenômeno de nucleação de bolhas foi avaliado a partir da análise de imagens do escoamento obtidas por meio de uma câmera de alta velocidade (Phantom V2512). O procedimento de análise consistiu em um tratamento prévio, para o destaque da superfície das bolhas e remoção de ruídos e imperfeições, e processamento, com o levantamento de informações de posição e dimensão para as bolhas. O reconhecimento de bolhas durante o processamento foi feito empregando-se uma técnica computacional de encaixe de elipses. Estes procedimentos foram realizados a partir do desenvolvimento de um código no ambiente de programação *MATLAB*.

Resultados

O procedimento de análise de imagens foi empregado para um banco de 351000 imagens do escoamento para as diferentes condições. Para cada condição, foram consideradas as imagens em que o padrão de escoamento bolhas esteve presente. A Figura 1 ilustra os resultados obtidos para $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e Δ_{sub} de 17,2 a 5,4 °C. Nota-se que, elevando-se o grau de subresfriamento, eleva-se o fluxo de calor necessário para a ativação dos sítios de nucleação. Além disso, todas as curvas tenderam ao mesmo valor após um fluxo de calor de aproximadamente 1000 kW/m^2 , exibindo um crescimento similar. A Figura 2 ilustra os resultados para $G = 1000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e Δ_{sub} de 12,4 a 22,5 °C. É possível observar um comportamento semelhante à condição da Figura 1, verificando-se uma relação entre o grau de subresfriamento e o fluxo de calor de ativação dos sítios de nucleação. O aumento de G pareceu não afetar significativamente o número total de sítios ativados, sendo possível verificar valores similares de densidade para fluxos de calor a partir de 1000 kW/m^2 em ambas as condições. Resultados similares foram verificados por Richenderfer *et al.* (2018), que realizaram o levantamento de diversos parâmetros fundamentais em condições experimentais similares.

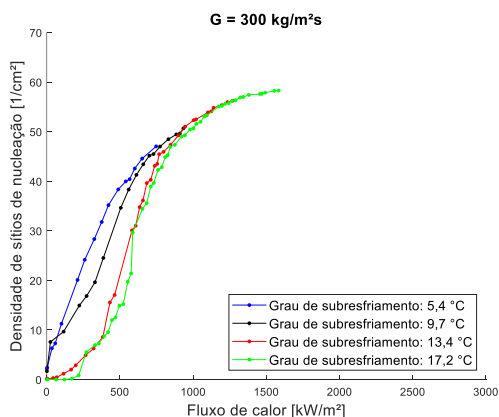


Figura 1: Densidade de sítios de nucleação para $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$

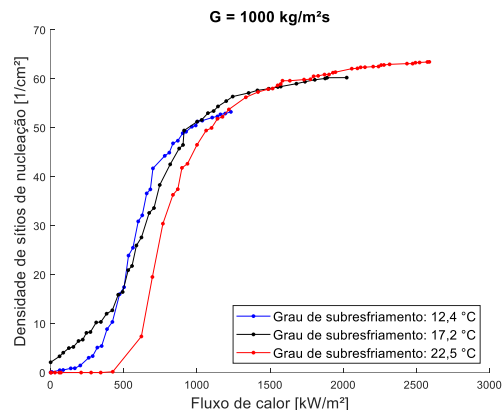


Figura 2: Densidade de sítios de nucleação para $G = 1000 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Conclusões

Foi possível observar que a densidade de sítios de nucleação é afetada pelo grau de subresfriamento, porém parece não estar relacionada ao fluxo mássico. Ao elevar-se o valor de Δ_{sub} , um maior fluxo de calor é necessário para a ativação dos sítios de nucleação. A variação de G , entretanto, pareceu não afetar significativamente o comportamento de ativação dos sítios de nucleação. Além disso, notou-se que, após um valor de fluxo de cerca de 1000 kW/m^2 , a densidade de sítios de nucleação para todas as condições de subresfriamento tende a crescer de maneira similar. Por fim, os resultados foram comparados com os apresentados por Richenderfer *et al.* (2018), verificando-se uma similaridade para o comportamento da densidade de sítios de nucleação.

Agradecimentos

O autor e colaboradores agradecem o suporte financeiro fornecido pela FAPESP sob os contratos 2022/14899-4 e 2023/17573-5.

Referências

Richenderfer, A., Kossolapov, A., Seong, J. H., Saccone, G., Demarly, E., Kommajosyula, R., ... & Bucci, M. (2018). Investigation of subcooled flow boiling and CHF using high-resolution diagnostics. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 99, 35-58.