

XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica -13 a 17/08/2012–São Carlos-SP
Artigo CREEM2012

Estudo da Ebulição Nucleada Confinada do HFE7100 em Substratos Lisos e Rugosos

Virgílio S. Machado, Reinaldo R. de Souza, Elaine M. Cardoso, Júlio C. Passos

UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica
Campus Universitário - Bairro Trindade - CEP 88040-900–Santa Catarina–Florianópolis
E-mail para correspondência: virgiliom@gmail.com

Introdução

Durante a última década é evidente o apelo por aparelhos eletrônicos que apresentem melhores desempenhos, mas em contra partida, que sejam cada vez mais finos e leves. Em decorrência disso, os microchips e os processadores passaram a exigir tamanhos reduzidos e conseqüentemente áreas menores para dissipação de calor. Tal paradoxo apresenta-se como um grande desafio para os dias atuais, pois para os computadores conseguirem manter um alto desempenho, tanto os chips quanto as juntas de conexão precisam manter em uma determinada faixa de temperatura. Caso isso não ocorra, o funcionamento do equipamento pode ficar comprometido.

Outra grande motivação para o estudo da ebulição está relacionada às usinas nucleares. Os reatores nucleares, quando estão em operação, atingem altas temperaturas necessitando assim, de um sistema de refrigeração bastante eficiente. Caso haja alguma falha nesse sistema, os reatores atingem temperaturas superiores à faixa de temperatura limite, comprometendo-os e conseqüentemente permitindo o vazamento de material radioativo. O melhor conhecimento dos fenômenos físicos envolvidos no processo de ebulição nucleada, como o do FCC (fluxo crítico de calor), pode evitar alguns desastres nucleares como correu em Chernobil, na Rússia, e mais recentemente em Fukushima no Japão.

Objetivos

Este estudo tem como objetivo analisar a ebulição nucleada do HFE7100 para as seguintes condições: ebulição nucleada em piscina, ebulição nucleada confinada, ebulição nucleada em piscina com substrato nano-estruturado, ebulição nucleada confinada com substrato nano-estruturado. Para os casos com confinamento, serão analisados três espaçamentos: 0,1 mm; 0,3mm e 1,0 mm. No que se refere aos substratos nano-estruturados serão utilizados a maguemita e a alumina em diferentes concentrações volumétricas.

A análise consiste na avaliação dos coeficientes de transferência de calor para as diferentes condições de teste citadas anteriormente. Outro importante parâmetro a ser avaliado são as características dos substratos antes e após o teste de ebulição, através da análise metalográfica utilizando o MEV e o rugosímetro (Taylor Hobson Talysurf Series i50). Serão testados diferentes substratos: cobre e aço inox.

Por fim, pretende-se também obter uma correlação que leva em consideração a deposição de nanopartículas, o fluido de trabalho e os diferentes graus de confinamento.

Aparato Experimental

Para atender os objetivos desse projeto foi desenvolvido junto à equipe LEPTEN/Boiling um aparato experimental que permite a execução de testes e o estudo dos fenômenos da ebulição nucleada.

O aparato experimental, Figura 1, possui basicamente quatro componentes, como descritos a seguir:

1. Geradores de energia:
 - a. Fonte Hp, modelo 6030A, de 200V e 17A, com potência nominal de 1000W responsável por fornecer potência às resistências elétricas.
 - b. Fonte Agilent, modelo E3634A, de 36V e 3A, responsável por fornecer potência para o funcionamento do transdutor de pressão no interior da câmara de ebulição.
2. Câmara de ebulição.
3. Sistema de aquisição de dados: Agilent modelo 34970A

4. Sistema de tratamento de dados: Computador Dell equipado com o software de aquisição e tratamento de dados LabView 6.1.

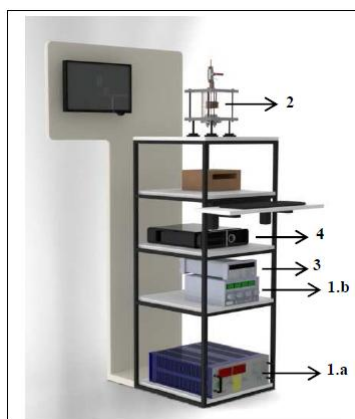


Figura 1 - Aparato Experimental

A câmara de ebulição, Figura 2, consiste em uma cuba de vidro com espessura de 5 mm e dimensões $160 \times 160 \times 150 \text{ mm}^3$ envolvendo um tubo de vidro de 83mm de diâmetro, 150mm de altura e 5mm de espessura. A cuba e o tubo de vidro são fixados entre duas chapas de aço inoxidável AISI 316, com dimensões de $200 \times 200 \times 17 \text{ mm}^3$. A vedação é feita com borrachas isolantes e graxas para vácuo. A região entre a cuba e o tubo de vidro é inundada com água, com o objetivo de manter a temperatura do fluido de trabalho constante, cuja temperatura é controlada por um criostato. Um segundo criostato 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 do tubo e uma válvula é usada tanto para adição de fluido de teste como para garantir a pressão atmosférica quando necessário.

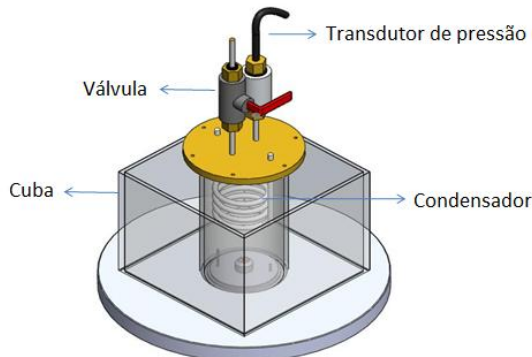


Figura 2 - Câmara de Ebulição

Na Figura 3, é apresentada uma vista explodida da seção de teste. Esta é constituída de um disco de cobre de 12 mm de diâmetro e 1 mm de espessura. O disco de cobre é aquecido por uma resistência elétrica do tipo “skin heater”, de $5,7 \pm 0,05 \Omega$. Ambos são fixados no suporte de Teflon, o qual possui um chanfro de 45° .

Três termopares estão fixados no disco de cobre, no interior de ranhuras espaçadas de 120° , ver Figura 4. O suporte de teflon, por sua vez, está fixado em um bloco de Teflon, preso à base inferior da câmara de ebulição, Figura 3.

Na face superior do bloco de teflon encontra-se o conjunto confinador (Figura 3), constituído de um suporte de alumínio e do elemento confinador. O suporte de alumínio, cuja dimensão é de 40mm de altura e 77mm de diâmetro, possui três colunas separadas por um ângulo de 120° e estas, por sua vez, em trilho que permite o ajuste do espaçamento entre a superfície aquecedora e o elemento confinador.

O elemento confinador é fixado nos trilhos do suporte de alumínio através de três braços espaçados 120° . A fim de permitir a visualização da ebulição, o elemento confinador foi confeccionado a partir de uma placa de acrílico de 70 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, evitando assim que suas faces fossem polidas.

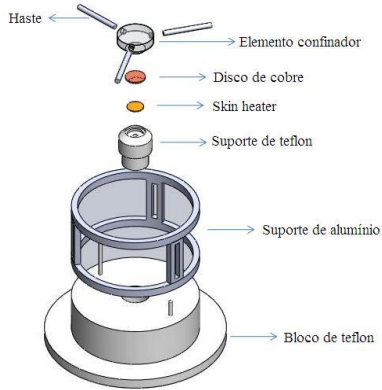


Figura 3 - Montagem da seção de teste

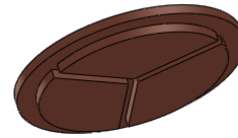


Figura 4 - Seção de teste/ disco de cobre

A incerteza experimental na temperatura foi de $\pm 0,8^\circ \text{C}$. A incerteza experimental para o fluxo de calor e para o coeficiente de transferência de calor foi de 6%, quando o fluxo de calor era de 5KW/m^2 . Para altos valores de fluxo de calor, a incerteza experimental foi menor que 2%.

Caracterização das amostras

Foram utilizados para caracterização três equipamentos: o microscópio eletrônico de varredura (MEV); o goniômetro; e o rugosímetro. O primeiro gerou imagens ampliadas da superfície e também dados sobre a sua composição química da amostra. O segundo forneceu informações sobre o ângulo de contato enquanto o último caracterizou a rugosidade média da superfície. A caracterização está descrita na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização das amostras.

Substrato Liso – Lixa #1200	
Microscópio Atômico de Varredura (MEV)	
Ângulo de Contato	<p>Totalmente Molhante ($\theta = 0^\circ$)</p>
Rugosidade Média	<p>$R_a = 0,02\mu\text{m}$</p>

Substrato Rugoso – Lixa #600	
Microscópio Atômico de Varredura (MEV)	
Ângulo de Contato	<p>Totalmente Molhante ($\theta = 0^\circ$)</p>
Rugosidade Média	$R_a = 0,12\mu\text{m}$

Resultados

Como os testes propostos com as superfícies nano-estruturadas ainda não foram realizados, serão apresentados, comentados e comparados os resultados dos testes experimentais da ebulição nucleada do HFE 7100 para as seguintes superfícies aquecidas ou substratos:

- Substrato liso sem confinamento;
- Substrato rugoso sem confinamento;
- Substrato liso em ebulição nucleada confinada (espaçamentos de 1 mm, 0,3mm e 0,1mm);
- Substrato rugoso em ebulição nucleada confinada (espaçamentos de 1 mm, 0,3mm e 0,1mm).

Para a obtenção da superfície lisa foi utilizada uma lixa #1200 e para a superfície rugosa uma lixa #600.

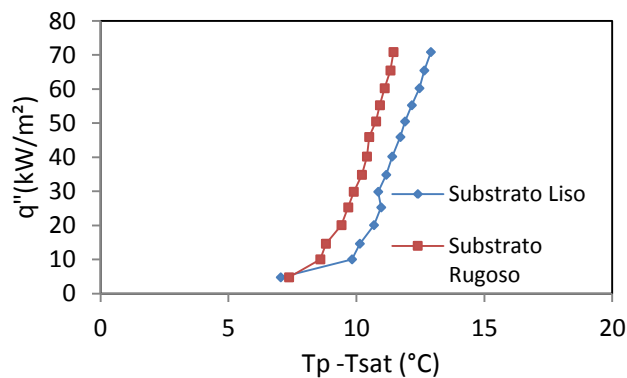


Figura 5–Comparação entre o substrato liso e rugoso, para o caso sem confinamento.

Observa-se na Figura 5 que para o caso sem confinamento, o coeficiente de transferência de calor para uma superfície rugosa apresenta um valor maior que para uma superfície lisa. Uma possível explicação para esse fato é que a superfície rugosa possui maior quantidade de sítios de nucleação comparada à superfície lisa. Dessa forma, o superaquecimento necessário para iniciar a ebulição é menor.

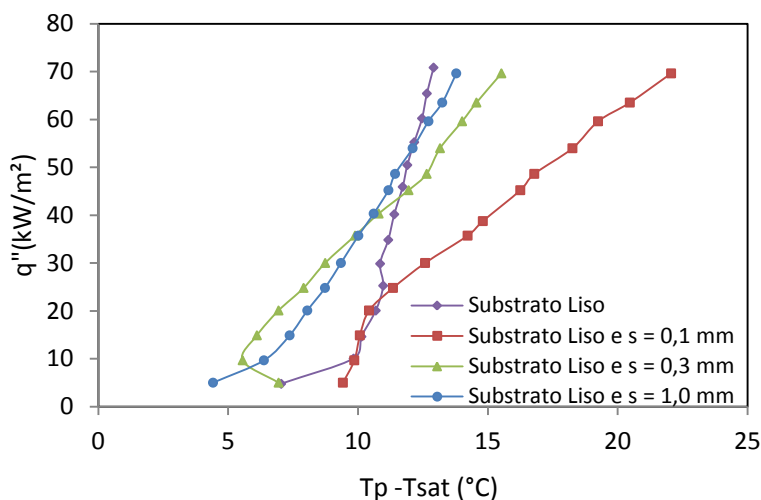


Figura 6 – Comparação da ebulição nucleada para substrato liso com e sem confinamento.

A Figura 6 mostra o comportamento das curvas de ebulição para o substrato liso para diferentes níveis de confinamento. Observa-se que para um número de Bond muito baixo, ou seja, um alto grau de confinamento ($s=0,1$ mm), o coeficiente de transferência de calor apresenta um grande decréscimo. Uma possível explicação para esse fato se dá devido à coalescência das bolhas de vapor, no espaço reduzido entre a superfície aquecida e o elemento confinador, na qual retarda a saída das bolhas de vapor e dificulta o remolhamento da superfície aquecida. E, por conseguinte, aumenta a temperatura da superfície aquecida, levando ao processo de secagem desta.

Para número de Bond maiores ($s = 0,3$ mm e $s=1,0$ mm), o coeficiente de transferência de calor apresenta o melhor resultado para baixos fluxos, até mesmo comparado com o substrato rugoso sem confinamento. Já para altos fluxos, há um grande decréscimo do h , com valores menores quando comparados ao substrato liso.

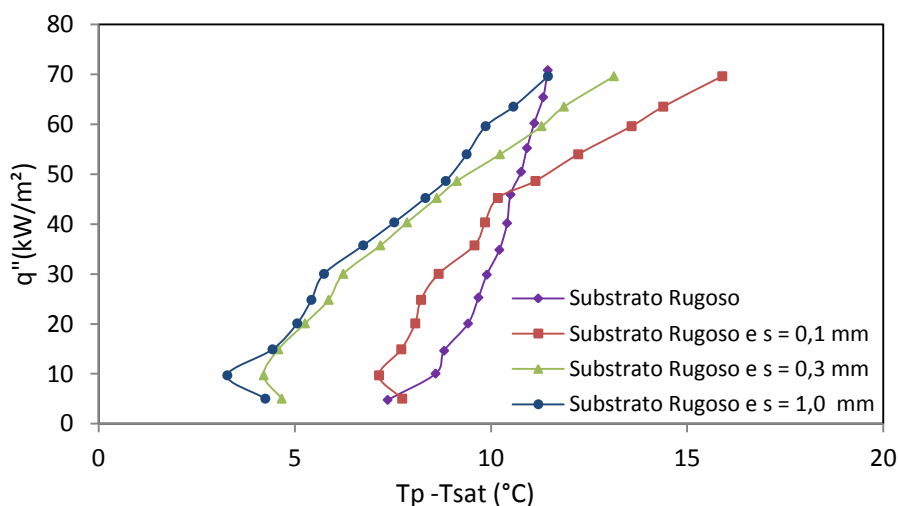


Figura 7 - Comparação da ebulição nucleada para substrato rugoso com e sem confinamento.

A Figura 7 mostra o comportamento das curvas de ebulição para o substrato rugoso para diferentes níveis de confinamento. Diferentemente do que ocorre com o substrato liso, um alto grau de confinamento ($s = 0,1$ mm) apresenta valores de coeficiente de transferência de calor maiores do que o substrato rugoso sem confinamento para fluxos de calor baixos e moderados. Para altos fluxos de calor, assemelha-se com o substrato liso onde ocorre um grande decréscimo do h .

Para menores níveis de confinamento ($s = 0,3$ mm e $s = 1,0$ mm) apesar de também haver um grande decréscimo do coeficiente de transferência de calor para altos fluxos de calor, este ainda apresenta valores maiores ou iguais que o substrato rugoso.

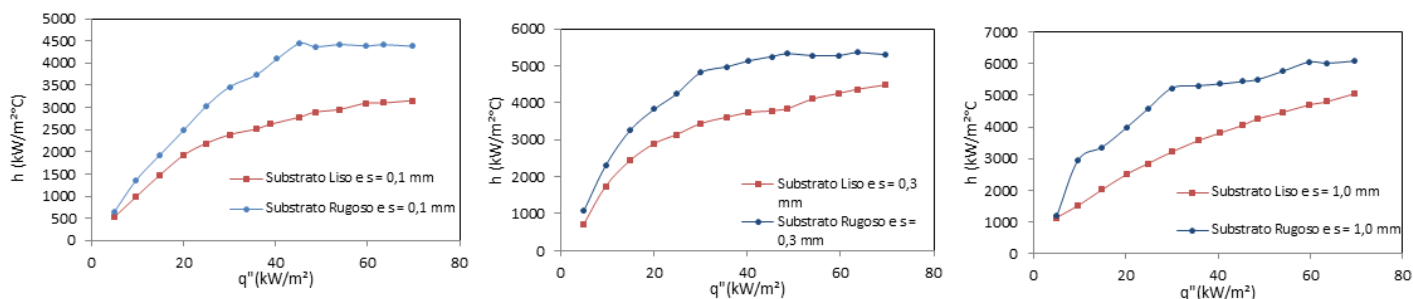


Figura 8 - Comparação entre o substrato liso e rugoso, para $s=0,1$ mm, $s= 0,3$ mm e $s=1$ mm.

A Figura 8 ilustra o comportamento do coeficiente de transferência de calor em função do fluxo de calor para confinamentos de 0,1 mm, 0,3mm e 1,0mm e para substratos lisos e rugosos. Observa-se o mesmo comportamento que a ebulição nucleada em piscina, onde a superfície rugosa apresenta resultados melhores para o coeficiente de transferência de calor.

A Figura 9 mostra o comportamento das bolhas de vapor para o caso de maior confinamento ($s=0,1$ mm) e para o caso não confinado, para o substrato rugoso. Observa-se que para o caso de maior confinamento existe a formação de um bolsão de vapor que dificulta a entrada da frente de líquido frio no canal. À medida que fluxo de calor aumenta ocorre a secagem da superfície aquecida e conseqüentemente a degradação da transferência de calor.



$$q'' = 60\text{kW/m}^2 \quad T_p = 74,0^\circ\text{C}$$



$$q'' = 60\text{kW/m}^2 \quad T_p = 72,0^\circ\text{C}$$

Figura 9. Visualização do fenômeno de ebulição para o caso confinado ($s = 0,1$ mm) e para o não confinado.

Conclusões

Os resultados dos testes de ebulição nucleada do HFE7100 apresentaram maiores coeficientes de transferência de calor para o substrato rugoso tanto para os testes confinados como para os não confinados.

Os dois substratos testados (liso e rugoso) mostraram também que para todos os níveis de confinamento testados ($s=1,0$ mm, $s = 0,3$ mm e $s=1,0$ mm) ocorre uma grande degradação do coeficiente de transferência de calor para altos fluxos de calor. No entanto, para baixos e moderados fluxos de calor os testes confinados apresentaram maiores valores de h quando comparados aos não confinados para os dois maiores graus de confinamento ($s = 0,3$ mm e $s=1,0$ mm).

Referências Bibliográficas

- Cardoso, E.M., Passos, J.C., Stutz, B.,Lallemand, M. "Confined boiling of the n-Pentane in a horizontal space." 7th ECI International Conference on Boiling Heat Transfer - Boiling 2009 Proceedins.Florianópolis/SC, 2009.
- Cardoso, E.M., Kannengieser, O.,Stutz, B., Passos, J.C.. "FC72 and FC87 nucleate boiling inside a narrow horizontal space." International Journal Heat and Fluid Flow, 35, 2011: 1038 – 1045.
- Carey, V.P. Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena: an introduction to the thermophysics of vaporization and condensation process in heat transfer equipment. Taylor & Francis., 1992.
- Passos, J.C., Possamai, L.F.B., Hirata, F.R. "Confined and Unconfined FC72 and FC87 boiling on a downward-facing disc." Applied Thermal Engineering, 2005: vol.25, 2543-2554.
- Passos, J.C.,Hirata,F.R.,Possamai,L.F.B.,Balsamo,M.,Misale,M. "Confined boiling of FC72 and FC87 on a downward facing heating copper disk." International Journal Heat and Fluid Flow, 2004: 25, 313-319.
- Wen, D. "Influence of nanoparticles on boiling heat transfer."Applied Thermal Engineering, 2011: 1-8.
- Kandlikar, S.G. "A theoretical model to predict pool boiling FC incorporating effects of contact angle and orientation." J. Heat Transfer,123, 2001: 1071–1079