



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

ESTUDO DA EBULIÇÃO CONFINADA DO n-PENTANO PARA APLICAÇÕES ESPACIAIS

Reinaldo Rodrigues de Souza¹, reisartre@yahoo.com.br
Júlio César Passos², jpassos@emc.ufsc.br

^{1,2} LEPTEN - Laboratórios de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia - Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina - 88040-900 - Trindade, Florianópolis - SC

Resumo: Atualmente, dispositivos eletrônicos miniaturizados estão cada vez mais presentes em nossas vidas. Reduzindo as dimensões de tais equipamentos confrontamos com o problema do resfriamento dos seus componentes, já que as antigas tecnologias não são capazes de prover a dissipação de calor desejada. O trabalho aqui dirigido contempla a situação onde componentes eletrônicos necessitam de resfriamento em ambientes restritos, como é o caso de dispositivos encontrados no interior de plataformas, veículos espaciais e satélites. O estudo experimental foi realizado sobre um disco de cobre de 12 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, com a superfície aquecida de face voltada para baixo, para analisar o comportamento do coeficiente de transferência de calor sobre o regime de ebulição nucleada para condições de baixos e moderados fluxos de calor ($\leq 60 \text{ kW/m}^2$) em espaços confinados e não confinados, em distâncias de 0,3;0,9 e de 10,4;11 mm, respectivamente. Os testes foram realizados em laboratório em ambiente de gravidade normal, $g=9,8 \text{ m/s}^2$ e, a escolha do nível de confinamento foi estabelecida de modo que o sistema se aproximasse daquele que será testado sob microgravidade ($g \approx 1.10^{-4} \text{ m/s}^2$). Os dados foram obtidos utilizando o fluido de trabalho n-Pentano, para o regime de ebulição nucleada subresfriada. Os resultados mostraram uma queda do coeficiente de transferência de calor quando se reduz a distância entre a superfície aquecida e a não aquecida. O mesmo comportamento foi observado quando há uma redução da temperatura do líquido no interior do sistema, para um mesmo nível de confinamento. Para melhor entender o efeito da ausência de gravidade sobre o fenômeno de ebulição, os resultados serão comparados com os dados obtidos sob microgravidade, realizados durante o vôo suborbital do foguete VSB-30, pela Agência Espacial Brasileira (AEB) através do Programa Microgravidade.

Palavras-chave: *ebulição nucleada subresfriada, ebulição confinada, transferência de calor*

1. INTRODUÇÃO

A partir da década de 60 com o início da corrida espacial, a realização de experimentos em vôos espaciais se tornou cada vez mais comum. A ausência dos efeitos gravitacionais passou a ser foco de interesse em muitas áreas do conhecimento, como a física, química e a biologia. Dentro da engenharia, o estudo dos fenômenos relacionados à mecânica dos fluidos e transferência de calor tem motivado as principais pesquisas. A realização de experimentos em microgravidade (gravidade muito próxima de zero), como é conhecida, possibilita observar um grande número de fenômenos que ocorrem nos fluidos, como por exemplo, os efeitos interfaciais de evaporação e condensação, variação da tensão superficial, coalescência das bolhas de vapor e a convecção de Marangoni, que eram encobertos pela ação da força gravitacional. O avanço da tecnologia espacial exigiu o desenvolvimento de equipamentos e dispositivos pequenos, compactos e leves equipados de microprocessadores cuja temperatura máxima deve ser bem controlada a fim de garantir o seu perfeito funcionamento. Dentro desse cenário, os processos com mudança de fase, ebulição e condensação, capazes de dissipar altos fluxos de calor desses microprocessadores, surgiram como alternativa.

O aparato experimental denominado câmara de ebulição, fará parte da carga útil do foguete brasileiro VSB-30 da AEB - Agência Espacial Brasileira que através do Programa Microgravidade oportuniza testar experimentos em ambiente de gravidade reduzida. No presente trabalho, são apresentados os resultados dos testes de ebulição nucleada confinada e não confinada realizados no LEPTEN/Boiling a fim de validar o experimento antes de ser testado em ambiente de microgravidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo da transferência de calor na ebulição nucleada tem sido investigado sobre diversas condições experimentais. Yao e Chang (1983), Nishikawa *et al.* (1984), Bonjour e Lallemand (1998, 2001), Kim *et al.* (2005, 2006) são alguns dos estudos sobre superfícies aquecidas inclinadas, verticais e horizontais. Os trabalhos de Passos *et*

al. (2004, 2005), para superfícies de face voltada para baixo ou para cima, variando o nível de confinamento, Su *et al.* (2008), para a ebulição nucleada confinada subresfriada. O processo de ebulição nucleada varia consideravelmente dependendo das condições em que a mudança de fase ocorre. O nível de fluxo de calor, propriedades termodinâmicas do líquido e vapor, a superfície do material e acabamento, e o tamanho físico da superfície aquecedora podem afetar o processo de ebulição (Carey, 1992). Em vários sistemas de aplicações industriais existe a necessidade de resfriamento utilizando um fluido refrigerante, em alguns casos, o espaço reservado ao líquido é pequeno. Nestes casos, após a formação e o crescimento das bolhas de vapor pode ocorrer a deformação das bolhas e a retenção destas por maior tempo, no espaço confinado. De forma simplificada, o nível de confinamento pode ser analisado por meio do número de Bond (Yao & Chang, 1983), adimensional, definido como a razão entre a distância entre as duas superfícies, s , e o comprimento capilar, L , definido conforme a Eq.(1).

$$L = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (1)$$

no qual g representa a aceleração da gravidade (m/s^2), σ a tensão superficial (N/m), ρ_l e ρ_v representam a massa específica do líquido e do vapor (kg/m^3), respectivamente. O comprimento capilar, L , que pode ser considerado como sendo proporcional ao diâmetro de partida das bolhas, conforme Carey (1992). Quando o diâmetro das bolhas de vapor formadas durante o regime de ebulição é inferior ao comprimento característico, s , a tendência é a de que as bolhas se apresentem isoladas, neste caso $B_o > 1$, por outro lado, se o comprimento capilar ultrapassar a distância, s , as bolhas se deformarão e vão se unir às bolhas vizinhas fazendo com que aumente a área de contato da película líquida entre a superfície aquecida e a base da bolha de vapor. Katto *et al.* (1977), Ishibashi e Nishikawa (1969), inferiram que quando isso acontece, a transferência de calor se intensifica por causa da vaporização de líquido da microcamada, desde que mantidos baixos fluxos de calor e o regime seja o de ebulição saturada.

Passos *et al.* (2004) mostram o efeito do confinamento na curva parcial de ebulição, à temperatura de saturação, para o fluido FC-72, para níveis de confinamento de 0,2; 0,5; 1,0 e 13 mm. Os autores mostraram, com exceção de $s = 13$ mm, uma dependência particular do coeficiente de transferência de calor (ou ΔT) com s e q'' . Para os níveis de confinamento de 0,2 e 0,5 mm e fluxos entre 5 e 22 kW/m² o ΔT encontrado foi menor que para $s = 13$ mm, para o mesmo fluxo de calor, mostrando o aumento da ebulição. Passos *et al.* (2005) mostraram novos resultados para a ebulição confinada e não confinada dos fluidos FC-72 e FC-87 à pressão atmosférica para baixos e moderados fluxos de calor (menores do que 45 kW/m²) sobre um disco de face voltada para baixo. Os níveis de confinamento seguiram o trabalho anterior e os resultados mostraram um aumento do coeficiente de transferência de calor para as distâncias s de 0,2 e 0,5 mm quando comparadas aos casos para s igual a 1,0 e 13 mm e um aumento maior do coeficiente de transferência de calor para a ebulição do FC-72 comparada à ebulição do FC-87. Também em 2005 Passos *et al.* (2005a) fez um estudo da visualização da ebulição nucleada confinada e não confinada do fluido FC-72 à pressão atmosférica, à temperatura de saturação, e baixos e moderados fluxos (até 40 kW/m²). As fotografias do fenômeno de ebulição mostrou a coexistência de bolhas isoladas e bolhas coalescidas para $s \geq 0,5$ mm e a predominância de bolhas coalescidas deformadas para $s = 0,2$ e 0,5 mm.

Para a situação de ebulição nucleada subresfriada, segundo Carey (1992), o subresfriamento tem pouco efeito sob a transferência de calor por ebulição (quando não há confinamento), o autor ainda defende a utilização das mesmas correlações para ebulição saturada, para a maioria dos casos de subresfriamento. Um estudo detalhado do efeito do subresfriamento foi apresentado por Reinaldo (1999), onde são apresentadas as curvas parciais de ebulição para diferentes temperaturas do fluido no regime de ebulição nucleada, no interior de tubos verticais liso e ranhurado. Reinaldo mostrou que é pequena a influência do subresfriamento do fluido, de acordo com Carey (1992). Nos testes com o R-113 à pressão atmosférica e subresfriamentos de 3,5 e 25°C Passos e Reinaldo (2000) encontraram que as temperaturas da superfície aquecida para o caso em que $\Delta T_{sub} = 25^\circ C$ ficam, na média, 4°C mais resfriadas do que para o caso em que $\Delta T_{sub} = 3,5^\circ C$, mantido o mesmo fluxo de calor.

O efeito do subresfriamento sobre a ebulição nucleada confinada subresfriada foi estudado por Passos *et al.* (2004) sobre uma superfície aquecida de cobre (disco com 12 mm de diâmetro e 2 mm de espessura) de face voltada para baixo à pressão atmosférica utilizando o fluido de trabalho FC-72. No trabalho foi analisado o comportamento de dois diferentes níveis de subresfriamento, $\Delta T_{sub} = 26,6^\circ C$ correspondendo a uma temperatura do líquido de 30°C e um $\Delta T_{sub} = 46,6^\circ C$ e temperatura do fluido de 10°C, para uma seção de teste confinada s , de 0,2 mm. Passos *et al.* (2004) constatou o aumento do coeficiente de transferência de calor com o aumento do subresfriamento. Su *et al.* (2008) utilizando a água a pressão atmosférica como fluido de trabalho, estudou o efeito do subresfriamento sobre uma superfície de aço inoxidável de face voltada para baixo (diâmetros do disco de 100 e 300 mm) para diferentes níveis de confinamento. Segundo o autor, quando a ebulição ocorre sobre uma superfície voltada para baixo em espaço confinado, a circulação natural sobre a micro-região, pode ser impedida de se formar e o coeficiente de transferência de calor cai.

Oka *et al.* (1992) e Abe (1993) comprovaram experimentalmente, que fluxos de calor transferíveis na terra, também são possíveis em microgravidade, especialmente na ebulição subresfriada. Utilizando o fluido de trabalho FC-72 Kim *et al.* (2002) estudou o comportamento sobre o regime de ebulição nucleada subresfriada em gravidade reduzida, gravidade terrestre e alta gravidade empregando diferentes níveis de subresfriamento e mostrou que o coeficiente de transferência de calor é independente dos níveis de subresfriamento e de gravidade. Kannengieser *et al.* (2009), analisou

os efeitos para diferentes condições de subresfriamento e pressão sobre a curva parcial de ebulição. Os resultados obtidos mostraram que o coeficiente de transferência de calor é influenciado pelos efeitos de pressão e subresfriamento somente para baixos superaquecimentos da parede. Contudo, essa diferença desaparece quando há um aumento do superaquecimento da parede e o efeito da pressão se torna mais evidente do que o efeito do subresfriamento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura (1) mostra o esquema do aparato experimental desenvolvido para a realização dos testes em solo e em microgravidade. Este é constituído de uma câmara de ebulição e um transdutor de pressão, na parte superior, um suporte para a fixação da câmara no módulo do foguete, e de uma câmera fotográfica, montada na parte inferior do suporte de fixação. A câmara de ebulição é constituída de um tanque cilíndrico de alumínio preenchido com o fluido de trabalho, n-Pentano.



Figura 1. Aparato experimental

No interior da câmara de ebulição, estão montadas duas seções de teste, constituídas por discos de cobre, ambos com 12 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, montadas na extremidade de tubos de PVC, em duas distâncias distintas do fundo da câmara de ebulição, conforme mostrado na Fig. (2). O fundo da câmara é em acrílico transparente a fim de permitir a visualização do processo de ebulição por meio de uma câmera fotográfica digital da marca Canon, modelo *Power Shot SD1100 IS, 8.0 Megapixels*. O transdutor de pressão, da marca Ômega, modelo PX302, mede a pressão no interior da câmara de ebulição e está fixado lateralmente sobre o engate rápido utilizado para carregamento do fluido de trabalho e vedação.

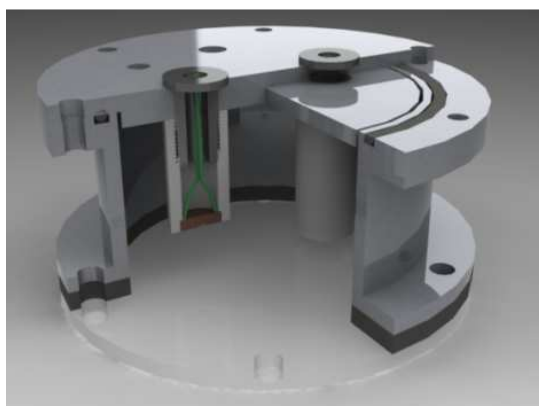


Figura 2. Detalhe da parte interna da câmara de ebulição

O grau de confinamento é função da distância entre o disco de cobre e o fundo (em acrílico) da câmara de ebulição, s. Os graus de confinamento testados em solo são de: 0,3; 0,9; 10,4 e 11,0 mm e em microgravidade serão duas distâncias fixas de 0,3 e 10,4 mm. Sobre cada disco de cobre, formando um ângulo de 120°, há três cavidades de 2,5 mm de diâmetro e 2 mm de profundidade onde estão inseridos três termistores de 10 Ω , modelo NTC – 10K (ADD-Therm Ind.com. de sensores LTDA), encaixados em rebaiços, no lado oposto aquele que estará em contato com o fluido

de trabalho. O aquecimento dos discos de cobre é feito através de resistências elétricas, do tipo “skin heater”, alimentadas por corrente contínua, com fluxos de calor entre 20 e 60 kW/m². Um microprocessador compacto modelo PC/104 Athena II com CPU VIA Mark de 800 MHz e sistema de aquisição integrado (marca Diamond Systems), controla as rampas de potência fornecidas às resistências elétricas em contato com os discos de cobre por meio de um programa executável através da interface C++. Ainda, são feitas as aquisições e transmissão de sinais, por meio de telemetria quando dos testes em microgravidade, e armazenamento em memória interna (capacidade de armazenamento de 4Gb), quando executado em laboratório.

O procedimento utilizado durante a realização dos testes consistiu em dois modos distintos. Na primeira seqüência dos ensaios, a câmara de ebulição foi envolvida por uma serpentina feita com mangueira de silicone, no interior da qual circulava água de resfriamento, cuja temperatura foi controlada por um criostato da marca microquímica, modelo MQBMP-01, conforme Fig. (3). Nos testes de segundo tipo não houve esse controle e procurou representar a condição mais próxima das condições de teste em microgravidade, uma vez que a câmara de ebulição não possui uma válvula de escape ou um volume de compensação da dilatação do fluido no interior da câmara, durante a realização dos testes. A tentativa de controle proporcionou analisar a influência da temperatura inicial do fluido sobre a curva parcial de ebulição. O intervalo de duração dos testes foi estabelecido, levando em consideração o tempo médio de vôo do foguete VSB-30 sob ausência de gravidade. O sistema de aquisição de dados faz cinco aquisições de temperatura e pressão por segundo. A condição de estabilidade para o primeiro fluxo de calor dura em média cerca de 60 segundos para ser alcançado, para os demais fluxos, o equilíbrio é antecipado. Feita a primeira aquisição de dados, um segundo patamar de potência é fornecido às resistências, permitindo nova aquisição. Os valores utilizados para a pesquisa foram obtidos através de uma média das últimas dez leituras dos termistores. O procedimento adotado foi sempre o mesmo a fim de garantir a repetibilidade dos resultados que se mostraram coerentes. Cada nível de potência fornecido às resistências corresponde aos fluxos de calor de, 20, 30, 40, 50 e 60 kW/m², em intervalos de tempo de 72 segundos para cada fluxo, totalizando 360 segundos a duração de um teste completo.



Figura 3. Fotografia da bancada experimental

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na Figura (4), são mostrados os resultados do coeficiente de transferência de calor (W/m²°C) em função do fluxo de calor, para os casos em que o disco aquecido encontra-se a s=0,3; 0,9; 10,4 e 11 mm de distância do fundo da seção de teste, e temperatura média do n-Pentano, no centro da câmara de ebulição, de 36°C. Se forem comparadas apenas as duas seções de teste confinadas (s=0,3 e 0,9 mm) como se pode observar há diminuição do coeficiente de transferência de calor, h, quando se diminui s. O resultado é oposto do que ocorre para o regime de ebulição nucleada saturada, onde o confinamento (para baixos fluxos de calor) causa um aumento do coeficiente de transferência de calor. No caso da ebulição nucleada saturada, a área de contato entre a parede aquecida e o líquido interposto entre a bolha de vapor e o disco aquecido aumenta com o confinamento, permitindo a vaporização intensificada de parte do líquido na microcamada. No caso da ebulição confinada, o espaço limitado dificulta a circulação natural ou induzida do líquido. Sem o efeito da convecção natural, no equilíbrio, a situação eficiente é quando se tem a vaporização da microcamada e condensação no outro extremo da bolha (como ocorre na ebulição saturada). Ou seja, a bolha atua como uma bomba de calor ou tubo de calor. A base inferior da bolha recebe calor da superfície aquecida funcionando como um evaporador, do lado oposto, o topo da bolha de vapor desempenha a função de um condensador. Quando o nível de confinamento não é tão elevado (para o nosso caso, s=0,9 mm) existe um equilíbrio entre as taxas de evaporação e de condensação.

Quando se confina muito ($s=0,3$ mm), a condensação fica prejudicada, pois a temperatura média do líquido se eleva e a bolha tem que crescer de volume, por que a vaporização continua. A partir de um certo ponto, como a vazão de líquido para a região entre a bolha e a superfície aquecida diminui ocorre um processo de secagem progressiva da microcamada de líquido, causando a queda do coeficiente de transferência de calor. Se compararmos o regime de ebulição nucleada confinada subresfriada com o regime de ebulição nucleada saturada, no segundo caso, esse fenômeno não ocorre, pois a temperatura do líquido fora da camada de líquido superaquecido é igual ou próxima à temperatura de saturação, o que mantém o equilíbrio entre as taxas de evaporação e condensação. Para os casos sem confinamento ($s=10,4$ e 11 mm) a transferência de calor é menor, pois o tempo de permanência e de crescimento das bolhas de vapor formadas sobre a superfície é reduzido.

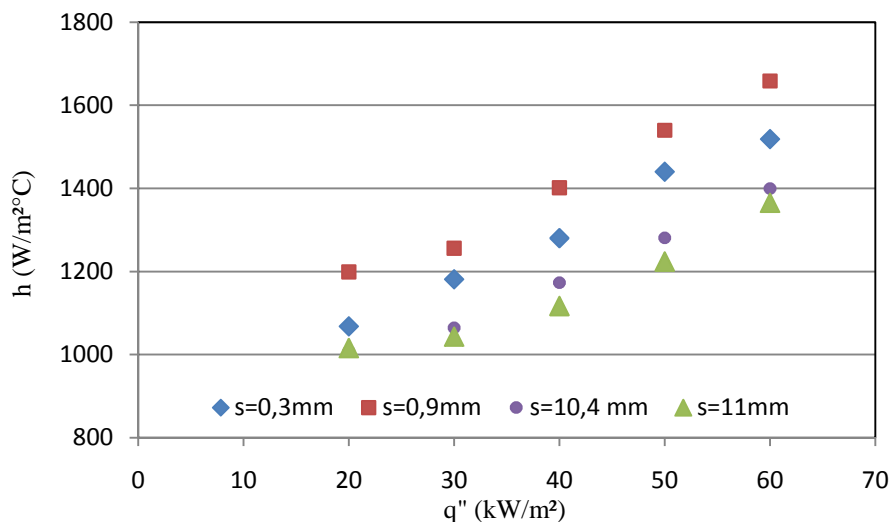


Figura 4. Efeito dos espaçamentos, $s=0,3$; $0,9$; $10,4$ e 11 mm sobre o coeficiente de transferência de calor.

A Figura (5) mostra a curva parcial de ebulição para o fluido n-Pentano, com graus de confinamento de $0,3$ e $0,9$ mm, com a superfície aquecida voltada para baixo. Para $s=0,9$ mm, os pontos experimentais estão deslocados para a esquerda, o que representa um maior coeficiente de transferência de calor para a situação de menor confinamento. Ambos os testes foram submetidos à mesma temperatura inicial de 36°C e temperatura de saturação da ordem de 45°C , isso corresponde a um grau de subresfriamento da ordem de 11°C . Para o primeiro fluxo de calor (20 kW/m²) fornecido às duas seções de teste, não há diferença de temperatura entre as superfícies dos discos. A partir do patamar seguinte, começa a ocorrer uma diferenciação entre as curvas nos dois níveis de confinamento propostos, indicando uma melhora no coeficiente de transferência de calor para a seção menos confinada.

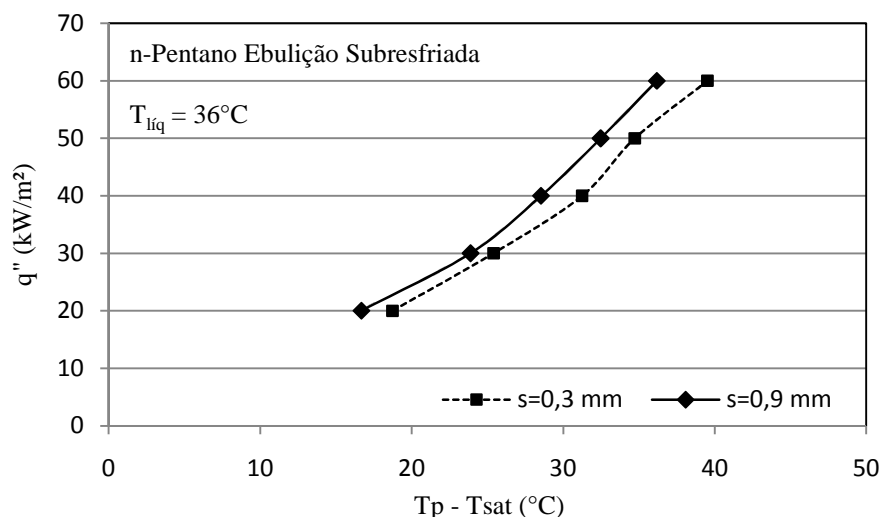


Figura 5. Curva parcial de ebulição para o n-Pentano em função do grau de confinamento, s .

No caso da ebulição nucleada subresfriada o aumento do confinamento reduz a condensação na parte superior da bolha de vapor (em contato com o confinador), por causa do aumento da temperatura média do líquido na região, quando isso ocorre, o desequilíbrio entre as taxas de evaporação e de condensação prejudicam o coeficiente de transferência de calor. No regime de ebulição saturada confinada o aumento da transferência de calor com o

confinamento foi demonstrado em trabalhos de, Katto (1977), Zhao *et al.* (2003), Passos *et al.* (2004) e Rops *et al.* (2009).

O efeito da temperatura inicial do líquido sobre a curva parcial de ebulição é mostrado na Fig.(6), para a seção de teste com confinamento, $s = 0,9$ mm, e Fig. (7), para o disco sem confinamento, $s = 11$ mm.

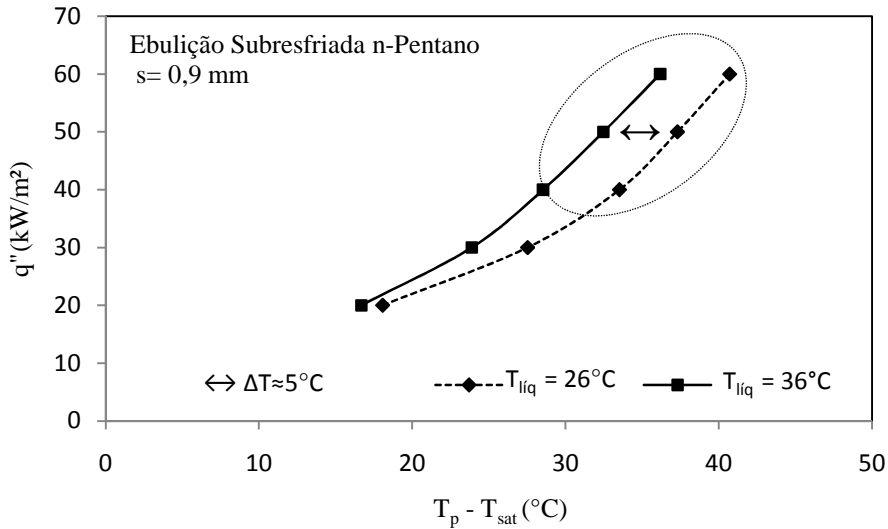


Figura 6. Efeito da temperatura do fluido, para $s = 0,9$ mm.

Na Figura 6, o processo de transferência de calor é intensificado para o caso do líquido com maior temperatura. Para fluxos de calor maiores ou iguais a 40 kW/m^2 , ocorre uma diferença de 5°C , na temperatura da superfície aquecida. Para os fluxos de calor menores, 20 e 30 kW/m^2 , esta diferença é menor, indicando que as bolhas de vapor ainda são pequenas sem chance de aprisionar o líquido, na região entre a superfície da bolha e a superfície aquecida.

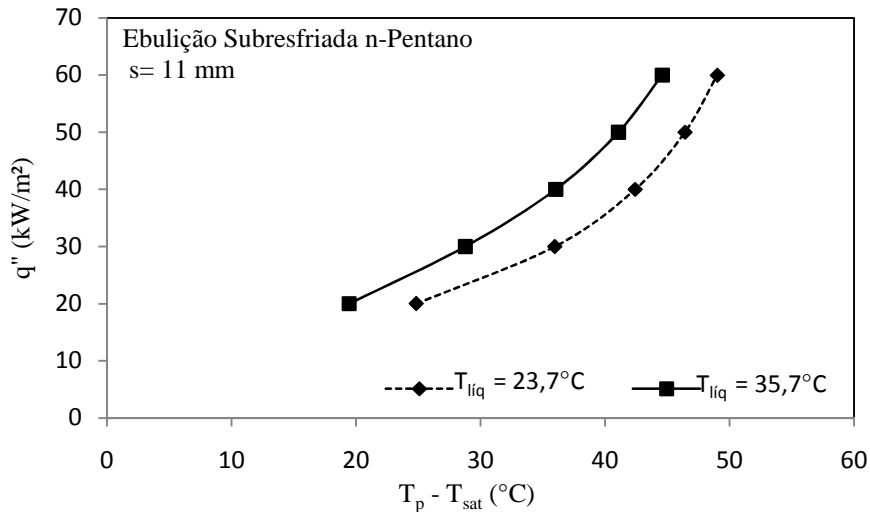


Figura 7. Efeito da temperatura do fluido, para $s = 11$ mm.

No caso sem confinamento ($s = 11$ mm) mostrado na Fig. (7), a diferença de temperatura, $T_p - T_{sat}$, entre uma curva e outra se mantém semelhante para as duas temperaturas iniciais do líquido. O fato de não haver confinamento faz com que a temperatura média do líquido que está em contato com o disco, ao receber o primeiro patamar (fluxo de 20 kW/m^2) dependa somente da condição inicial do banho, ou seja, a temperatura na região não se eleva tanto quanto ao caso anterior.

É importante verificar que, em ambos os casos independentemente do grau de confinamento observa-se a mesma tendência para o efeito da temperatura do líquido sobre o coeficiente de transferência de calor.

4.1. VISUALIZAÇÕES

As fotografias que serão apresentadas a seguir foram obtidas sobre a mesma seção de teste com confinamento de $0,9$ mm e número de Bond igual $0,60$, com o disco aquecido voltado para baixo, para fluxos de calor de 20 a 60 kW/m^2 . A aquisição das imagens foi feita utilizando uma câmera digital modelo Canon SD1100 IS, 8.0 Megapixels, lente de $6.2-18.6\text{mm}$ $f/2.8-4.9$, a mesma câmera a ser embarcada. O processo de formação e acumulação de bolhas de vapor

sobre a superfície aquecida de cobre depende do fluxo de calor. Para fluxos de calor menores ($20, 30 \text{ kW/m}^2$), a tendência é a ocorrência de bolhas do tipo I e II, representadas na Fig. (8). Nessa condição, ainda há espaço entre as bolhas para o líquido inundar a superfície aquecida. Para fluxos de calor maiores ($40, 50, 60 \text{ kW/m}^2$) é mais comum a presença de bolhas do tipo III sobre a parede aquecida. O processo se torna mais complexo, pois com o aumento da temperatura de parede e dependendo da rugosidade da superfície bolhas pequenas também podem se formar debaixo da bolha grande. Bolhas do tipo III, no entanto, são capazes de promover, para fluxos de calor ainda moderados, a intensificação da transferência de calor devido à maior área da microcamada de líquido entre a bolha e a superfície aquecida do disco de cobre.

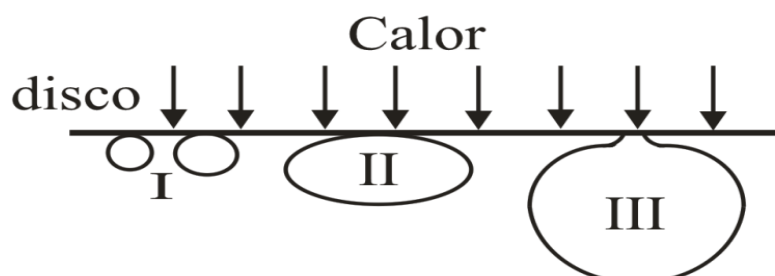


Figura 8. Tipos de bolha sobre a superfície aquecida.

Na Figura (9) é apresentada a seqüência de visualizações para o fenômeno de ebulição para os fluxos de calor de $20, 30$ e 40 kW/m^2 , respectivamente. Na Fig. (9a) mostra o surgimento das primeiras bolhas de vapor sobre a superfície aquecida. A maior parte das bolhas é pequena e se apresentam de maneira isolada sobre o disco. Próximo ao centro do disco de cobre elas começam a se aglomerar, formando bolhas maiores.

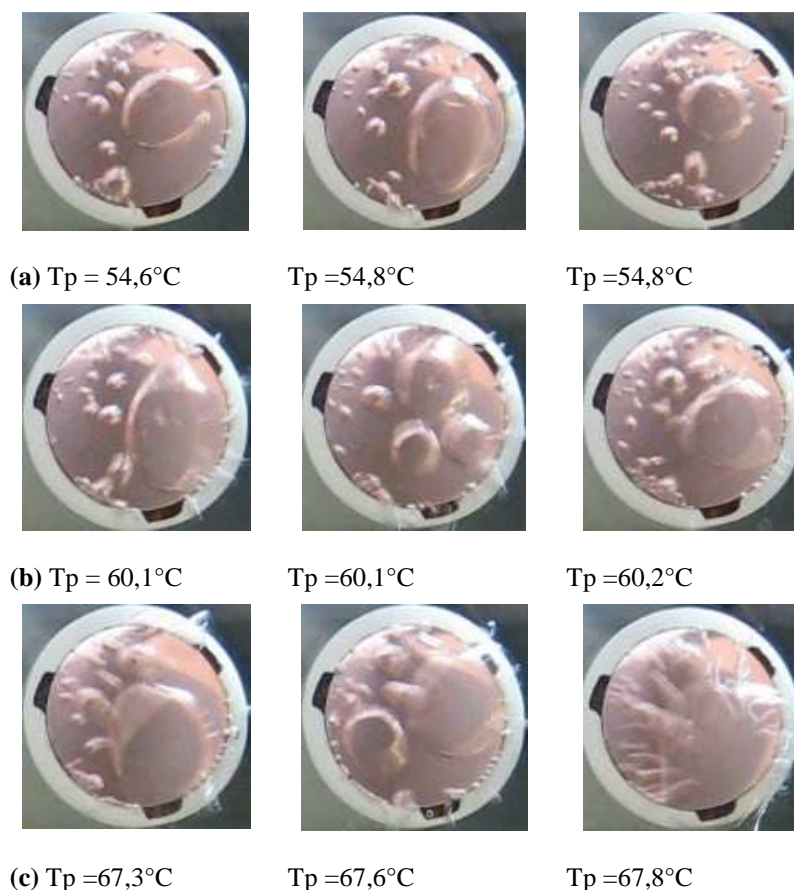


Figura 9. Visualização para $s=0,9\text{mm}$ e fluxo de calor de (a) 20kW/m^2 , (b) 30kW/m^2 , (c) 40kW/m^2

Analisando as fotografias, Fig. (9b-c), é possível perceber que as pequenas bolhas de vapor migram em direção as bolhas maiores, fazendo com que o conjunto deslize sobre a superfície e abandone o disco. Como consequência uma frente de líquido “mais frio” invade o volume de controle. O diâmetro desses “bolsões de vapor” cresce à medida que o fluxo de calor aumenta. Por essa razão, as dimensões da superfície (diâmetro da seção de teste) devem ser levadas em consideração no estudo da transferência de calor por ebulição em um meio confinado. O tamanho da superfície

aquecida influencia na forma como o meio é confinado e no tempo de crescimento e permanência das bolhas de vapor sobre a região e no número de sítios ativos.

Na Figura (10) são mostradas fotografias para a condição de confinamento com $s=0,9$ mm e fluxos de calor de 50 a 60 kW/m². A última imagem à direita da Fig. (10a), lado esquerdo do disco, foi tomada no instante logo após a saída de uma bolha do tipo III e passagem de uma frente de líquido frio, pois as bolhas presentes, na metade esquerda do disco, ainda são bem pequenas. Na Fig. (10b), também à direita, a imagem corresponde ao momento em que a grande bolha de vapor deslizava sobre a parede aquecida.

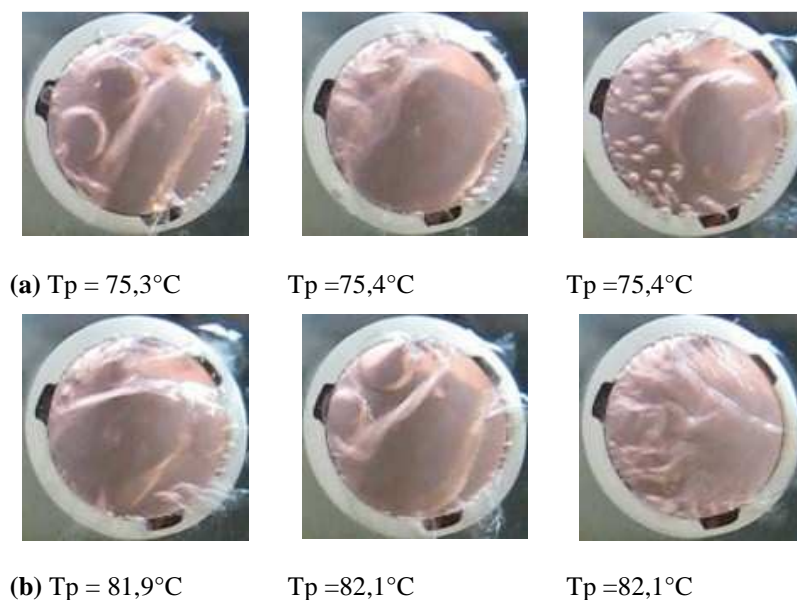


Figura 10. Visualização para $s=0,9$ mm e fluxo de calor de (a) 50kW/m², (b) 60kW/m²

A coalescência das bolhas de vapor se acentua para os fluxos de calor de 50 kW/m², Fig.(10a) e de 60 kW/m² Fig.(10b) cobrindo quase que a totalidade da superfície aquecida. Pressionada pelo confinador, as bolhas de vapor se alongam sobre o disco aumentando a área de contato do líquido entre a superfície aquecida de cobre e a base da bolha possibilitando uma troca maior de calor com o líquido que se encontra nessa região. No entanto, a interface da bolha (principalmente com a parte superior da bolha de vapor) entra em contato com uma região maior de líquido “mais frio” (condição de subresfriamento) o que aumenta a taxa de condensação e de certa forma, equilibra o que é vaporizado no outro extremo permitindo que o tamanho da bolha não cresça tão depressa. Nessa condição, a condensação não é comprometida. Ao passo que, se a distância entre a parede não aquecida e a superfície aquecida for diminuída menor será o efeito da condensação sobre a interface o que reduz o coeficiente de transferência de calor por ebulição.

5. CONCLUSÕES

Os resultados indicam uma queda do coeficiente de transferência de calor para a ebulição subresfriada, quando se alterou o nível de confinamento de $s=0,9$ mm para $s=0,3$ mm. Para as situações sem confinamento, correspondentes às seções com distâncias s de 10,4 e 11 mm, a transferência de calor é menor se comparada aos casos com confinamento. Nessas circunstâncias o tempo de permanência e de crescimento das bolhas de vapor formadas sobre a superfície aquecida é reduzido. O desequilíbrio entre as taxas de evaporação e de condensação da interface vapor-líquido foi empregado como justificativa da queda do coeficiente de transferência de calor para a ebulição nucleada confinada subresfriada.

O efeito da temperatura inicial do líquido sobre a curva parcial de ebulição para um mesmo nível de confinamento apresentou, para a seção confinada ($s=0,9$ mm) e temperaturas iniciais de 26 e 36°C, pouca influência para os dois primeiros fluxos de calor fornecidos (20 e 30 kW/m²) e mostrou uma variação média de ΔT de 5°C para os fluxos posteriores. Para a seção sem confinamento ($s=11$ mm) e temperaturas iniciais de 23,7 e 35,7°C, a influência da temperatura inicial do sistema sobre a curva parcial de ebulição manteve a característica do caso anterior, ou seja, para a maior temperatura inicial média do líquido, ocorre o aumento do coeficiente de transferência de calor. No entanto, a variação de ΔT com a mudança no valor do fluxo fornecido, nesse caso, são praticamente constantes.

As fotografias apresentadas mostraram a dependência do processo de formação e acumulação de bolhas de vapor sobre a superfície aquecida de cobre com o fluxo de calor imposto. Para os fluxos de calor de 20 a 30 kW/m² as bolhas de vapor sobre a superfície se apresentam de maneira isolada sobre o disco. À medida que o fluxo aumenta as bolhas de vapor começam a se aglomerar e a coalescência das bolhas de vapor se acentua para os fluxos de calor de 50 kW/m² e de 60 kW/m² cobrindo quase que a totalidade da superfície aquecida.

Como consequência da falta de controle da pressão e da temperatura do líquido no interior da câmara de ebulição, não foi possível alterar suficientemente o nível de subresfriamento do sistema a fim de analisar seu efeito sobre a ebulição nucleada confinada subresfriada.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Técnico Danti Régis de Souza pela assistência prestada durante a realização do experimento e ao apoio da Agência Espacial Brasileira.

7. REFERÊNCIAS

- Abe, Y., 1993. "Pool boiling under microgravity", *Microgravity Science and Technology*, Vol. 6, No 4, pp. 229-238.
- Bonjour, J., e Lallemand, M., 1998. "Flow patterns during boiling in a narrow space between two vertical surfaces." *International Journal of Multiphase Flow*, 1998: 24, 947-960.
- Bonjour, J., e Lallemand, M., 2001. "Two-phase flow structure near a heated vertical wall during nucleate pool boiling." *International Journal of Multiphase Flow*, 27, 1789-1802.
- Carey, V.P., 1992. "Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena: an introduction to the thermophysics of vaporization and condensation process in heat transfer equipment", Ed. Taylor & Francis.
- Ishibashi, E., Nishikawa, K., 1969, "Saturated boiling heat transfer in narrow spaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, No. 12, pp. 863-894.
- Kannengieser, O., Colin, C., Bergez, W., Lacapère., 2009, "Nucleate pool boiling on a flat plate heater under microgravity conditions: results of parabolic flight, and development of a correlation predicting heat flux variation due to gravity", *ECI International Conference on Boiling Heat Transfer*, 03 - 07 de maio, Florianópolis-SC, Brazil.
- Katto, Y., Yokoya, S., Teraoka, K., 1977, "Nucleate and transition boiling in a narrow space between two horizontal, parallel disk-surfaces", *Bulletin of the JSME*, Vol. 20, No.143, pp. 638-643.
- Kim, J., Benton, J.F., Wisniewski, D., 2002. "Pool boiling heat transfer on small heaters: effect of gravity and subcooling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.45, pp 3919-3932.
- Kim, Y.M., Kim, S.J., Kim, J.J., Noh, S.W., Suh, K.Y., Rempe, J.L., Cheung, F.B., Kim, S.B., 2005, "Visualization of boiling phenomena in inclined rectangular gap", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 31, pp. 618-642.
- Kim, J., Oh, B.D., Kim, M.H., 2006. "Experimental study of pool temperature effects on nucleate pool boiling" *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 32, pp. 208-231.
- Nishikawa, K., Fujita, Y., Uchida, S., Ohta, H., 1984. "Effect of surface configuration on nucleate boiling heat transfer." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 27, n° 9, 1559-1571.
- Oka, T., Abe, Y., Tanaka, K., Mori, Y.H., Nagashima, A., 1992. "Observational study of pool boiling under microgravity", *JSME International Journal*, Ser. II 35, pp 280-286.
- Passos, J.C., e Reinaldo, R.F., 2000. "Analysis of pool boiling within smooth and grooved tubes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 22, pp 35-44.
- Passos, J.C., Hirata, F.R., Possamai, L.F.B., Balsamo, M., Misale, M., 2004. "Confined boiling of FC72 and FC87 on a downward facing heating copper disk", *International Journal Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp 313-319.
- Passos, J.C., Hirata, F.R., Possamai, L.F.B., Hirata, F.R., 2005. "Confined and unconfined FC72 and FC87 boiling on a downward-facing disc", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, pp. 2543-2554.
- Passos, J.C., Silva, E.L., Possamai, L.F.B., 2005a. "Visualization of FC-72 Confined Nucleate Boiling", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, pp. 1-7.
- Reinaldo, R.F., 1999. "Estudo experimental da ebulição nucleada em superfícies cilíndricas lisa e ranhurada" *Dissertação de mestrado - UFSC- Engenharia Mecânica*.
- Rops, C.M., Lindken, R., Velthuis, J.F.M., Westerweel, J., 2009. "Enhanced heat transfer in confined pool boiling." *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, pp. 751-760.
- Su, G.H., Wu, Y.W., Sugiyama, K., 2008, "Subcooled pool boiling of water on a downward-facing stainless steel disk in a gap", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.34, pp. 1058-1066.
- Yao, S.C., & Chang, Y., 1983. "Pool boiling heat transfer in a confined space", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.26, No.6, pp 841-848.
- Zhao, Y., Tsuruta, T., Ji, C., 2003. "Experimental study of nucleate boiling heat transfer enhancement." *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28, 9-16.

STUDY ON CONFINED NUCLEATE POOL BOILING OF n-PENTANE FOR SPACE APPLICATIONS

Abstract: Nowadays, miniaturized electronic devices are increasingly present in our lives. Reducing the size of these equipments is facing a trouble: cooling of the components. Later technologies are not able to provide the heat dissipation needed. The study here addressed concerns with situations where electronics need cooling in a restricted environment, such as devices installed within platforms, spacecrafts or satellites. The experimental study was performed on heated copper disk with 12 mm diameter and 3 mm thick, with the heated surface facing downwards, to analyze the behavior of the heat transfer coefficient on the nucleate boiling regime, low and moderate heat fluxes (≤ 60 kW/m²) in confined and unconfined spaces, for distances of 0.3, 0.9 and 10.4, 11 mm, respectively. The tests were performed in the laboratory at normal gravity, $g = 9.8 \text{ m / s}^2$ and the choice of confinement level was set so that the system behavior should be similar to the system that will be tested in microgravity ($g \approx 1.10^{-4} \text{ m/s}^2$). The experimental results were obtained using the n-pentane as a fluid working for the subcooled nucleate boiling regime. The results show the decrease of the heat transfer coefficient with the confinement increasing. For the same level of confinement, the increase of the liquid temperature inside the boiling chamber increases the coefficient of heat transfer. To better understand the effect of weightlessness on the phenomenon of boiling, the results are compared with data obtained in microgravity, collected during the suborbital rocket VSB-30, the Brazilian Space Agency (AEB) through the Microgravity Program.

Keywords: *Subcooled pool boiling, Confined boiling, Heat transfer*