

COMPORTAMENTO TÉRMICO E HIDRODINÂMICO DE BOMBAS CAPILARES COM E SEM A PRESENÇA DE GASES NÃO CONDENSÁVEIS

Heitor Victor Ribeiro Camargo

Edson Bazzo

Universidade Federal de Santa Catarina

Departamento de Engenharia Mecânica

88.040-900, Florianópolis – SC

e-mail: heitor@labsolar.ufsc.br

Resumo

Testes realizados em laboratório são apresentados para circuitos de transferência de calor de dupla-fase, adaptados com bombas capilares de ranhuras circunferenciais, ressaltando-se aspectos relacionados com o comportamento térmico de partida, regime permanente e de limite capilar. Resultados encontrados, com e sem a presença de gases não condensáveis, demonstram um comportamento térmico satisfatório e a possibilidade de reativação de bombas capilares em situação de colapso. Os testes foram realizados utilizando-se diferentes configurações internas de bombas capilares de ranhuras circunferenciais. Potências de 30 W e fluxos de calor de até 1,3 W/cm² foram alcançados com acetona como fluido de trabalho.

Palavras chaves: Bomba Capilar, CPL, Tubo de Calor.

Tema: Transferência de calor de dupla-fase.

1. INTRODUÇÃO

Bombas capilares são dispositivos utilizados em circuitos de transferência de calor de dupla-fase em substituição às bombas mecânicas, para movimentação do fluido de trabalho. Circuitos de transferência de calor de dupla fase representam uma importante alternativa em projetos de refrigeração, por envolver altas taxas de transferência de calor por evaporação e por condensação. O sistema tem capacidade para transferir calor por longas distâncias e pequenas diferenças de temperaturas entre evaporador e condensador. No caso específico da bomba capilar, há vantagens adicionais relacionadas com seu peso estrutural e completa ausência de vibrações, tornando-a uma importante alternativa para aplicações espaciais.

Um circuito de bomba capilar (CPL-Capillary Pumped Loop) é basicamente constituído por um ou mais evaporadores, um condensador, um reservatório e por linhas para transporte do líquido e do vapor. O projeto básico do CPL pode considerar a presença de uma ou de várias bombas capilares no evaporador. O reservatório serve para controlar a temperatura de operação e a quantidade de líquido presente no interior do circuito. As bombas capilares são instaladas nos evaporadores. O fluido de trabalho é circulado por ação das forças de tensão superficial desenvolvidas nas bombas capilares. Ao receber calor, o líquido presente na estrutura capilar evapora e se desloca ao longo das linhas de vapor, de volta ao condensador.

Em geral a bomba capilar consiste de um tubo ou placa plana associada a uma estrutura capilar, que promova força suficiente para o deslocamento do líquido e do vapor no interior do circuito. Vários tipos de materiais têm sido testados para atuar como

estrutura capilar, incluindo-se Teflon ou plástico poroso, titânio e pó de níquel sinterizado. Somente materiais porosos ou paredes finamente ranhuradas têm capacidade para superar as perdas de carga e promover a circulação do fluido no interior do circuito.

Os elementos porosos são geralmente constituídos de plástico poroso ou de metal sinterizado. A porosidade e o tamanho efetivo de poro determinam a capacidade de bombeamento da bomba capilar. Trabalhos iniciados na UFSC com níquel sinterizado, têm resultado na fabricação de elementos com porosidade da ordem de 50% e tamanho de poros na faixa de 2 a 24 μm . Pressões de bombeamento capilar de até 4 kPa foram medidas, usando acetona como fluido de trabalho (Reimbrecht et al., 1998). Na Figura 1 é mostrado um esquema em corte transversal e longitudinal da bomba capilar de elemento poroso.

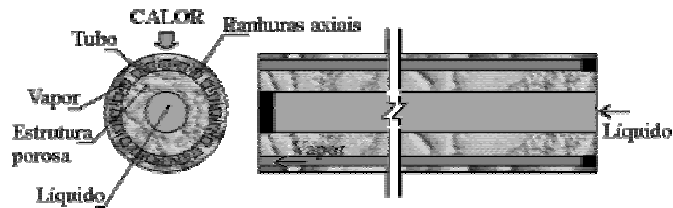


Figura 1 – Configuração interna de uma bomba capilar de elemento poroso.

Bombas capilares de ranhuras circunferenciais foram inicialmente testadas na Europa em tubos de alumínio de diâmetro $\frac{3}{4}$ " usinados com ranhuras internas circunferenciais, com dimensões da ordem de 35 μm e espaçamento de 220 μm (Bazzo et al., 1997). Ranhuras circunferenciais retangulares ou trapezoidais são usinadas no interior de um tubo liso de alumínio, de modo a garantir o trabalho de bombeamento do fluido térmico no interior do CPL. Pressões de bombeamento capilar próximas de 1 kPa foram medidas em laboratório. A geometria e o espaçamento das ranhuras determinam a capacidade de bombeamento capilar. Nesse caso, uma régua divisória é introduzida no interior do tubo para separação dos canais de líquido e vapor.

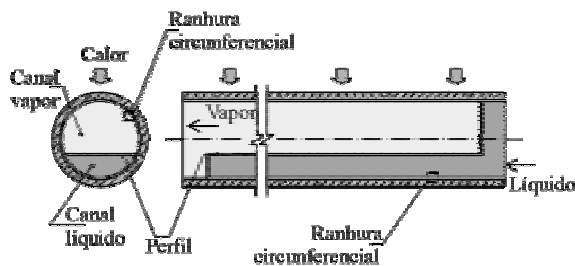


Figura 2 – Configuração interna de uma bomba capilar de ranhuras circunferenciais.

Na Figura 2 é mostrado em cortes transversal e longitudinal o esquema da bomba capilar de ranhuras circunferenciais utilizada no presente trabalho. Em termos práticos, o problema maior apresentado por bombas de ranhuras circunferenciais é a presença de interstícios entre o perfil (régua) e parede interna do tubo ranhurado. A presença de interstícios reduz significativamente a pressão de bombeamento capilar.

Um motivo que pode levar uma bomba capilar ao colapso, além de uma eventual falha na estrutura capilar, pode ser a presença de bolhas de vapor ou de gases não condensáveis (NCG-Non Condensable Gases) no canal de líquido. Bolhas de vapor e NCG podem bloquear o escoamento de líquido no canal ou nas ranhuras e promover o colapso do CPL. A presença de bolhas de vapor pode ser minimizada mediante a injeção de líquido subresfriado diretamente no final do canal da bomba capilar. Mas não ocorre o mesmo para

NCG. Sua presença depende da combinação do fluido de trabalho com os materiais utilizados. Mesmo em sistemas constituídos por alumínio/amônia há a formação de NCG.

2. BANCADA EXPERIMENTAL E TESTES

Na Figura 3 é mostrado a foto do CPL projetado com apenas uma bomba capilar e construído para ser testado em laboratório.

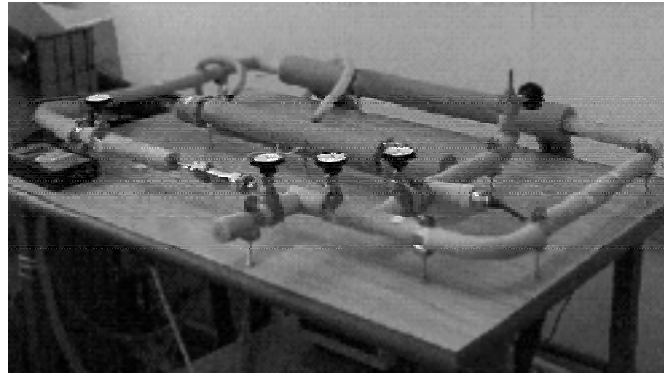


Figura 3 – Bancada experimental utilizada nos testes de laboratório.

Neste trabalho, três configurações para a bomba capilar de ranhuras circunferenciais foram testadas. Em todas as bombas capilares de ranhuras circunferenciais foi identificada a presença de interstícios, responsáveis por significativa redução da pressão de bombeamento capilar. As bombas testadas têm o perfil posicionado em $\phi = 15^\circ$ (Figura 4a), 30° (Figura 4b) e $\phi = 45^\circ$ (Figura 4c).

Os testes foram realizados nas bombas capilares descritas acima, usando a acetona como fluido de trabalho. A bancada experimental está mostrada na Figura 3. Calor é aplicado na superfície superior externa da bomba capilar, utilizando uma resistência elétrica. Uma fonte de potência foi conectada à resistência elétrica. O vapor e o líquido fluem através de tubos de aço inoxidável de diâmetro externo $\frac{1}{4}$ " Os testes foram programados com as diferentes bombas capilares, de modo a se estudar:

1. Comportamento térmico de partida.
2. Comportamento térmico em condições de regime permanente.
3. Limite capilar.
4. A sensibilidade do CPL por conta de variações bruscas da potência aplicada.
5. A capacidade de reativação do sistema em caso de colapso.
6. A influência de gases não condensáveis no interior do circuito.

O primeiro passo para se garantir sucesso na partida das bombas capilares tem sido inundar o circuito com líquido, aquecendo-se o reservatório, até a temperatura de operação desejada. Posteriormente, já com o condensador funcionando e com a fonte de potência ativada, o circuito é deixado em operação pelo tempo necessário, até que se atinja a condição de regime permanente ou, simplesmente, até que se obtenha as informações relativas ao comportamento térmico da bomba capilar.

Para determinação do limite capilar, os testes são realizados aumentando-se a potência aplicada, gradualmente, a intervalos regulares de 30 a 60 minutos. Assume-se que o limite capilar seja atingido no momento em que fica caracterizada uma elevação brusca das temperaturas medidas na parede da bomba capilar. Neste momento, a fonte é desligada ou a potência é reduzida, de modo a evitar danos à bomba capilar. Por motivos de segurança, a temperatura máxima admitida tem sido de 100°C .

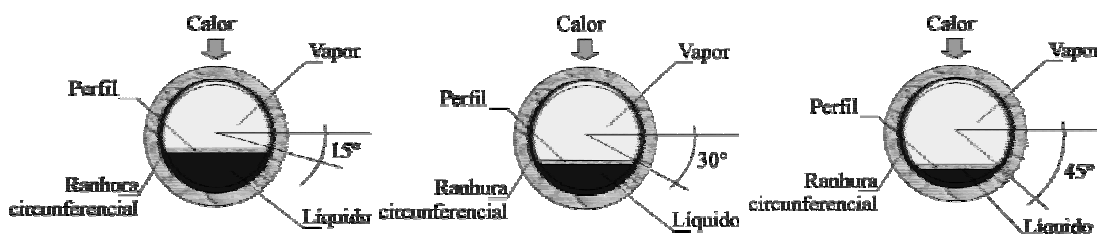


Figura 4a – Perfil em $\phi = 15^\circ$. Figura 4b – Perfil em $\phi = 30^\circ$. Figura 4c – Perfil em $\phi = 45^\circ$.

Para os testes de reativação das bombas capilares, é ligada a potência elétrica de modo que esta seja superior ao limite capilar da bomba em questão medido com o teste anterior. Após a entrada em colapso da bomba, a potência é reduzida ao nível imediatamente anterior em que a bomba capilar operou normalmente, sem oscilações na sua temperatura superficial. Neste caso, a potência tem sido mantida acima do limite capilar, até que a temperatura superficial da bomba capilar atingisse a temperatura limite imposta pela segurança. As demais potências são mantidas por cerca de 30 a 60 minutos.

Para os testes de regime permanente, o circuito é mantido em operação com uma potência inferior ao seu limite capilar, por um período de aproximadamente 3 a 6 horas.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Comportamento Térmico de Partida e Regime Permanente

Para análise do comportamento térmico de partida e das condições operacionais na condição de regime permanente, foram levantados dados que permitissem determinar o perfil de temperatura para as diferentes bombas capilares indicadas nas Figuras 4a a 4c. Em geral os testes foram conduzidos com a duração mínima de uma hora. Para coleta de dados, um termopar do tipo K (T12) foi instalado no meio da bomba capilar, em sua superfície externa superior. Cada bomba utilizada possuía uma resistência colocada junto à sua superfície externa superior, e havendo sempre um espaço entre o final desta resistência e o perfil interno que separa os canais de líquido e vapor (ver Figura 5). Os dados apresentados nos gráficos a seguir mostram esta temperatura, assim como os valores relativos à pressão absoluta do circuito. Os primeiros testes foram realizados com bombas capilares de perfil interno em $\phi = 30^\circ$ sem um sistema de aquisição de sinais. Devido a este fato, um número pequeno de leituras de temperatura e de pressão foram anotados. As bombas de perfil interno em $\phi = 15$ e $\phi = 45^\circ$, já com um sistema adequado para aquisição dos dados, tiveram as temperaturas lidas de 3 em 3 s. Os pontos de pressão foram colhidos manualmente.

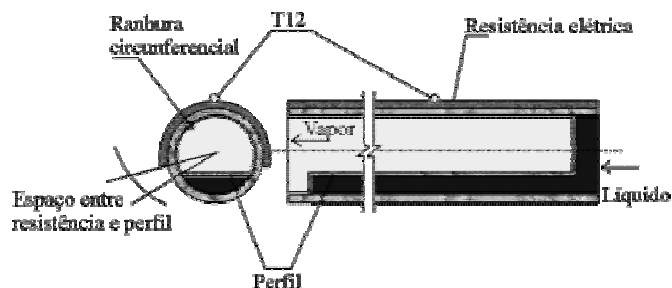


Figura 5 – Localização do termopar T12 e posicionamento da resistência.

A Figura 6 mostra o comportamento térmico da bomba de ranhuras circunferenciais com perfil interno posicionado em um ângulo de 30° , com a potência fixada em 10W. O teste mostrou que a temperatura superficial estabilizou em aproximadamente 70°C . A temperatura do reservatório foi fixada em 30°C e o condensador foi programado para

operar a 15°C. A bomba foi deixada operando durante uma hora. O pico de temperatura e o pico de pressão ocorrem quase que simultaneamente. Grandes picos de pressões podem ocorrer devido à necessidade de se deslocar o excesso de líquido presente nas linhas de vapor de volta para o reservatório.

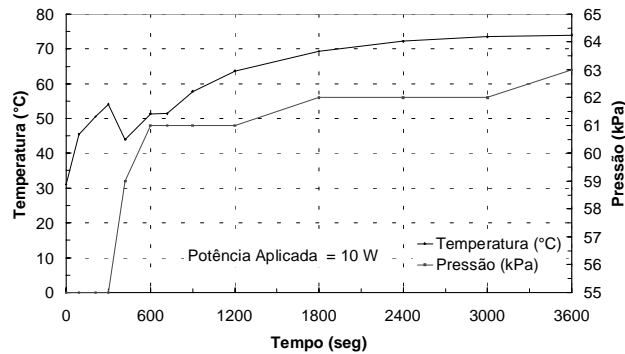


Figura 6 – Teste com a bomba capilar com perfil posicionado em $\phi = 30^\circ$.

Limite Capilar

No momento em que as perdas de carga do circuito ultrapassarem a pressão de bombeamento capilar, o vapor irá penetrar na ranhura, bloqueando a passagem de líquido e causando o colapso da bomba capilar. Dando seqüência aos trabalhos experimentais, testes foram realizados para determinação deste limite capilar. Tal limite está relacionado com a presença de interstícios entre a parede ranhurada e o perfil interno. Segundo medições experimentais, a pressão efetiva de bombeamento capilar das bombas testadas em laboratório foi medida em torno de 25% da pressão de bombeamento capilar teórica (ver Tabela 1). Conseqüentemente o calor trocado foi inferior ao valor calculado para o caso ideal. Na expectativa de melhorar este desempenho, novos esforços devem ser canalizados para novos projetos ou para uma montagem mais precisa dos perfis internos das bombas capilares.

Tabela 1 – Tabela comparativa entre os valores reais e teóricos das bombas capilares de ranhuras circunferenciais testadas (Acetona).

Bomba Capilar	Pressão Capilar (Pa)		Limite Capilar (W)		
	Estimada	Medida	Estimado (I)	Estimado (II)	Medido
15°	1612	405	130	30	25
30°	1612	233	98	10	20
45°	1612	404	77	17	20

(I) Valor calculado sem a presença de interstícios

(II) Valor calculado com a presença de interstícios

A Figura 7, mostra a temperatura superficial e a variação da pressão de trabalho para a bomba capilar de perfil interno posicionado em $\phi = 15^\circ$. O reservatório foi fixado em 40°C e o condensador foi controlado em 15°C. Pode-se notar que a bomba capilar funcionou com sucesso para potências inferiores a 25 W. Acima deste valor o sistema entrou em colapso. A partir de 3600 segundos, na potência de 25W, pode-se observar que a temperatura superficial da bomba eleva-se para níveis que demonstram uma condição de colapso. Nesta condição as ranhuras internas secam, provocando o bloqueio do fluxo de líquido proveniente do condensador e, conseqüentemente, uma elevação brusca da temperatura superficial da bomba capilar. Para este teste em particular, pode-se observar também o efeito da recuperação da bomba capilar. A potência após o colapso, foi reduzida

ao nível de potência em que se encontrava a bomba no início do teste. Pode-se notar que a sua temperatura superficial respondeu bem a essa redução, voltando aos mesmos valores do início do teste.

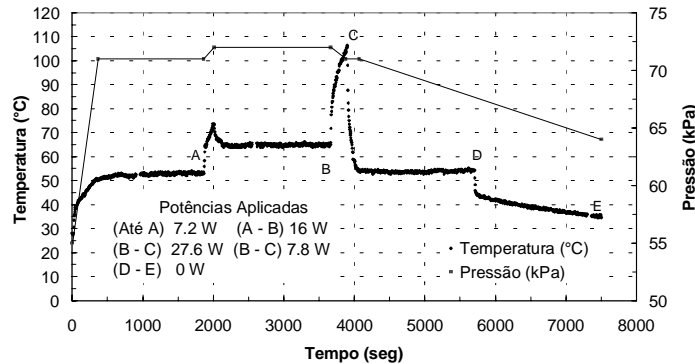


Figura 7 – Teste de limite capilar e reativação da bomba capilar de $\phi = 15^\circ$.

Capacidade de Reativação

Aumentos bruscos na temperatura superficial da bomba capilar indicam a ocorrência de secagem das ranhuras. Para retornar à condição de bombeamento, é imperativo que se reduza a potência ou mesmo que se interrompa a alimentação elétrica da bomba capilar. Naturalmente, em uma condição real poderá não ser possível o simples desligamento da potência aplicada. Testes realizados com a bomba capilar de ranhura circunferencial comprovaram a sua capacidade de reativação mesmo com potências próximas do limite capilar. A maioria das bombas retornou da condição de colapso.

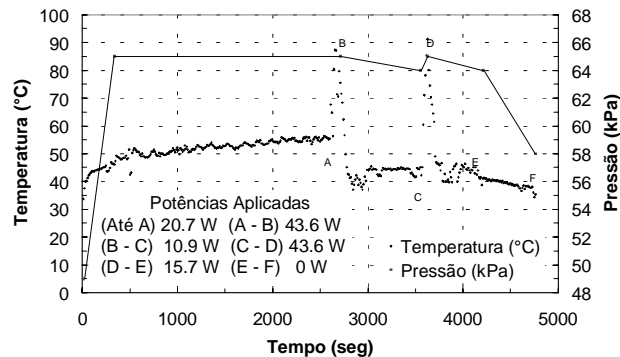


Figura 8 – Teste de reativação com a bomba capilar de 45° .

Na Figura 8, pode-se notar o comportamento térmico para a bomba de 45° com a potência aplicada de 20 W, durante 40 minutos. Em seguida esta potência foi aumentada para 44W. Nesta condição, a temperatura superficial elevou-se bruscamente de 55 para 95°C , caracterizando nitidamente a condição de colapso. Após alguns instantes, essa potência foi reduzida para 10W, por aproximadamente 15 minutos. Neste período, a bomba voltou a funcionar e a temperatura estabilizou-se em 45°C . Em seguida, a bomba foi novamente induzida à situação de colapso elevando-se a potência aplicada ao mesmo nível anterior de 44W. Essa potência foi reduzida novamente, agora para valores próximos dos 15W, onde mais uma vez a bomba voltou a funcionar. Alguns minutos depois, esta potência foi desligada e a bomba retornou a temperatura ambiente. Durante este teste a temperatura do reservatório foi fixada em 40°C e o condensador foi programado para operar a 15°C .

Gases Não-Condensáveis

Com o objetivo de estudar a influência de NCG, testes foram realizados com a bomba capilar de 15°, injetando-se quantidades conhecidas de argônio no circuito. Nesse caso, o argônio se comporta como NCG e, que ao se alojar no interior da bomba capilar, pode interferir no processo de alimentação de líquido, provocando o colapso da bomba capilar. Para realizar estes testes, uma bancada auxiliar foi montada junto a entrada da bomba capilar no CPL (ver Figura 9 e Figura 10) e quantidades conhecidas de argônio foram injetadas. Na Tabela 2 estão indicadas as quantidades de argônio, que foram injetadas para cada teste. O volume total do canal de líquido da bomba capilar é de $4,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$. Para a pressão de operação medida em 0,5 bar, a massa correspondente de argônio foi calculada em $3,36 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$.

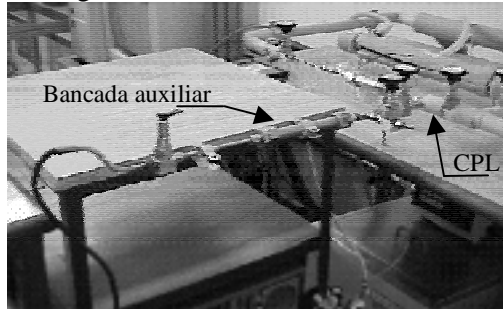


Figura 9 – Circuito auxiliar para injeção de NCG.



Figura 10 – Cilindro de argônio.

Tabela 2 – Quantidade de argônio (NCG) injetado no CPL.

Teste	Volume de Argônio (10^{-6} m^3)	
	Adicionado	Acumulado
1	-	0
2	0,35	0,35
3	0,71	1,06
4	1,04	2,10
5	3,39	5,49

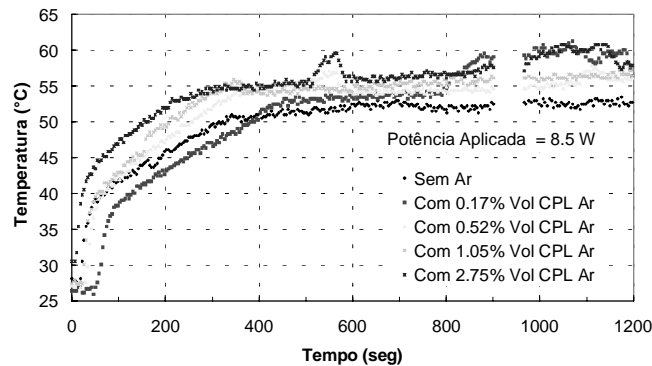


Figura 11 – Influência do argônio na operação da bomba capilar.

Para controle da quantidade injetada, a bancada auxiliar foi pressurizada com argônio até uma pressão conhecida. Conhecidas pressão e volume, pode-se então calcular a quantidade de argônio que entrou para o circuito, após a equalização das pressões entre bancada auxiliar e CPL. O primeiro teste foi realizado sem argônio. Para o segundo teste foi adicionado $0,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ de gás argônio, foi observado seu comportamento repetindo-se o mesmo procedimento realizado anteriormente. Esta quantidade foi fixada, de acordo com o equivalente a 1/3 do volume do canal de líquido da bomba capilar. Os testes se repetiram

sucessivamente até que a quantidade total de gás fosse superior ao volume do canal. O volume máximo de NCG foi de $5,49 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$. Pode-se notar no gráfico da Figura 11 que a temperatura superficial da bomba capilar foi aumentando na medida em que mais argônio foi sendo injetado no circuito.

As pressões também aumentaram na medida em que mais argônio foi adicionado ao CPL. Deste modo pode-se concluir que apesar da presença de NCG, bombas capilares de ranhuras circunferenciais funcionam sem problemas, ao contrário do que acontece com bombas capilares de elementos porosos. Não foram realizados testes que identificassem os limites em que o circuito deixa de funcionar.

4. CONCLUSÕES

Resultados experimentais e teóricos foram obtidos para três tipos de bombas capilares de ranhuras circunferenciais. Em termos gerais pode-se concluir:

- Bombas capilares de ranhuras circunferenciais tiveram um comportamento térmico satisfatório. Não houve problemas de partida e as bombas foram capazes de retornar da condição de colapso, apenas com uma pequena redução da potência aplicada.
- Em todos os casos estudados e testados, há a presença de bolhas de vapor no canal de alimentação. Mesmo assim, todas as bombas funcionaram normalmente. Baixas temperaturas de subresfriamento são recomendadas por minimizarem as instabilidades inerentes à presença dessas bolhas, promovendo seu colapso já no interior da bomba capilar.
- Os testes demonstraram potências transferidas da ordem de 30 W, o que corresponde a fluxos de calor de $1,3 \text{ W/cm}^2$, utilizando-se acetona como fluido de trabalho. Potências maiores não foram obtidas devido a problemas de montagem das bombas capilares e, por isso, os resultados são considerados preliminares. Novas bombas precisam ser construídas com os devidos cuidados, para então serem novamente testadas.

REFERÊNCIAS

- Bazzo, E., Camargo, H. V. R., "Performance of High-Capacity Grooved Heat Pipes Applied to a Two-Phase Heat Transfer Loop", 7th Congresso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, Salta, Argentina, Vol. II, pg. 487/491, 1998.
- Bazzo, E., Colle, S., Groll, M., Brost, O., "Bombas Capilares Aplicadas a Circuitos de Transferência de Calor de Doble Fase". Información Tecnológica, Vol. 8, No. 4, pag 355/364, La Serena, Chile, 1997.
- Bazzo, E., Passos, J. C. e Colle, S., "Comportamento Térmico de Bombas Capilares de Ranhuras Circunferenciais", VI ENCIT / VI LATCYM, Vol. 2, pp. 889 a 893, Florianópolis, Brasil, 1996.
- Cullimore, B. A., "Start Up Transient in Capillary Pumped Loops", 26th Thermophysics Conference, June 24-26, Honolulu, EUA, 1991.
- Ku, J., "Overview of Capillary Pumped Loop Technology", ASME 29th National Heat Transfer Conference, August 8-11, Atlanta, HTD-Vol.236, 1993.
- Ku, J., Hoang, T., "Start-Up Behaviors in the CAPL 2 Flight Experiment", Technical Paper 972328, 27th International Conference on Environmental Systems, July 14-17, Lake Tahoe, Nevada, 1997.
- Reimbrecht, E.G., Fredel, M.C., Bazzo, E., Pereira, F.M. "Manufacturing Microstructural Characterization of Sintered Nickel Wicks for Capillary Pumps", I Brazilian Simposium of Struurology, NADCEM, Belo Horizonte, Brazil, 1998.