



QUALIFICAÇÃO DE ELEMENTOS POROSOS PARA USO EM BOMBAS CAPILARES

Eduardo Gonçalves Reimbrecht*

Edson Bazzo

Márcio Celso Fredel

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica,
Laboratório de Materiais, 88.040-900 - Florianópolis, SC, Brasil, *edurg@pg.materiais.ufsc.br

Resumo. No presente trabalho são analisados os resultados obtidos relativos à porosidade, distribuição de tamanho de poros e ordenação desses poros na estrutura, de modo a se obter elementos porosos mais adequados para uso em CPL's. Foi realizada análise de imagens mediante a aplicação do programa computacional Imago. A análise foi realizada em imagens obtidas via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Resultados obtidos através de porosimetria de intrusão de mercúrio são, também, apresentados. Testes preliminares realizados em bancada experimental demonstraram um desempenho satisfatório dos elementos porosos para aplicações em circuitos de transferência de calor de dupla-fase.

Palavras-chave. Elemento poroso, Bomba capilar, Caracterização microestrutural.

1. INTRODUÇÃO

Elementos porosos têm sido utilizados em circuitos de bombas capilares (CPL – Capillary Pumped Loop), destinados a processos de isothermalização e controle térmico de painéis de componentes eletrônicos de satélites e estações orbitais. CPL's foram originariamente desenvolvidos para substituírem tubos de calor ou circuitos convencionais de dupla-fase, em aplicações que requeiram altas taxas de demanda térmica. Bombas capilares são dispositivos utilizados em circuitos de transferência de calor de dupla-fase, em substituição a bombas mecânicas, para circulação de fluidos térmicos. Bombas capilares dispõem de elementos porosos capazes de proporcionar o trabalho requerido para bombeamento de líquido ao longo do circuito. A força capilar dos elementos porosos garante a circulação do fluido. Na expectativa de se melhorar o desempenho das bombas capilares, elementos porosos metálicos e poliméricos vêm sendo produzidos e testados como estrutura capilar (Ku, 1993; Goncharov, 1995; Fedorchenko, 1980). Os elementos porosos metálicos se constituem em uma alternativa vantajosa por apresentarem maior capacidade de bombeamento capilar (Ku, 1993). Elementos de níquel sinterizado têm sido propostos como estrutura capilar, apresentando porosidade da ordem de 60%, com tamanho de poros na faixa de 1 a 12 μm , o que corresponde a pressões de bombeamento variáveis entre 3 e 40 kPa (Maidanik et al., 1991). CPL's são constituídos por

um evaporador, um condensador, um reservatório e linhas para transporte de líquido e de vapor (Figura 1).

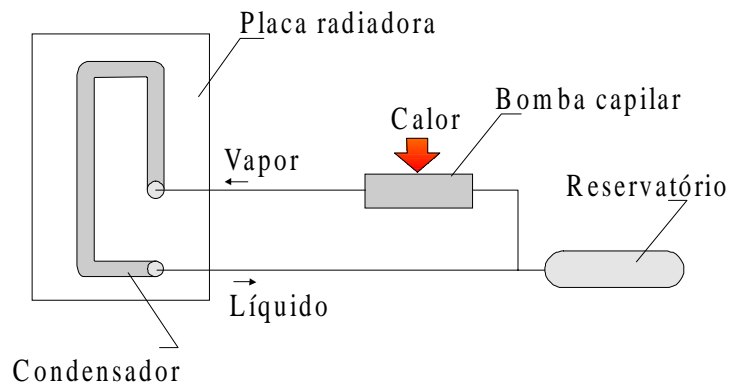


Figura 1 – Esquema simplificado de um CPL.

Diversos estudos vêm sendo sistematicamente realizados na expectativa de se resolver problemas pendentes relacionados com a operação do CPL e de se buscar alternativas de projeto que ampliem a capacidade de bombeamento capilar (Goncharov, 1995; Maidanik et al., 1991). Seguindo esta tendência, trabalhos vêm sendo conduzidos também na UFSC, no sentido de se projetar e construir um CPL de pequena escala, para testes em condições de microgravidade, a bordo do satélite científico franco-brasileiro previsto para ser lançado no ano 2001. Neste trabalho pretende-se utilizar uma bomba capilar com um elemento poroso de níquel sinterizado com as características anteriormente citadas (porosidade da ordem de 50% e tamanho de poros inferior a 15 μm). A sinterização de pó de níquel vem sendo apresentada como uma alternativa promissora na produção de estruturas capilares para CPL's. O níquel apresenta compatibilidade com o fluido de trabalho e o processo de sinterização permite o controle da porosidade. Na busca do aperfeiçoamento da estrutura capilar, diversas variáveis do processo de sinterização foram consideradas em laboratório, como, por exemplo, tempo, temperatura e granulometria do pó. A técnica utilizada para a fabricação de elementos porosos foi a de sinterização de pó densificado por vibração (Fedorchenko, 1980; Cahn, 1991), que permite controlar a forma e o volume de poros. Neste trabalho discute-se os resultados relativos ao tamanho e distribuição dos poros nas peças fabricadas, tal como a influência destes resultados no funcionamento da bomba capilar. O desempenho desses elementos porosos em bancada experimental e uma caracterização térmica preliminar são também analisados. O princípio de funcionamento de uma bomba capilar com elemento poroso pode ser observado na Figura 2.

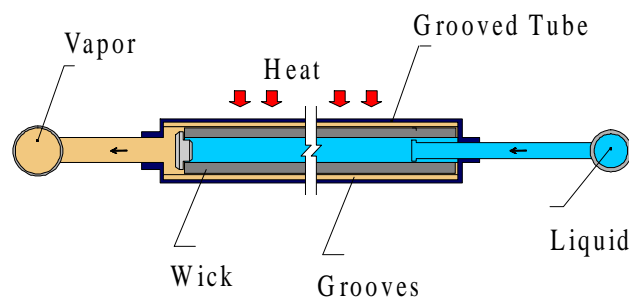


Figura 2 – Esquema de uma bomba capilar em corte longitudinal.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As matérias primas empregadas foram pó de níquel carbonila 123 com tamanho de partícula entre 3 e 7 μm , pó de níquel atomizado com tamanho de partícula entre 25 e 45 μm e uma mistura destes pós na proporção volumétrica de 1 carbonila para 7 atomizado. O pó de níquel foi vibrado no interior da matriz de grafite e, em seguida, sinterizado. O grafite é recomendado por Fedorschenko (1980) e Thümmeler (1993), tendo em vista sua baixa interação com o níquel nas temperaturas de sinterização empregadas. O processo de sinterização foi conduzido em um forno tubular Heraeus (ROK-F 7/60) com um fluxo aproximado de 1 cm^3/s de hidrogênio comercial. Foram testadas temperaturas de sinterização na faixa de 800 a 1000°C, a intervalos de 50°C, com ciclos de duração de 15 e 30 minutos. De acordo com os resultados apresentados por Reimbrecht et al. (1998), foram determinados os melhores parâmetros de sinterização para cada pó. No caso do NP-123 e da mistura, os parâmetros foram fixados em 950°C/30min. Para pó atomizado, os parâmetros foram fixados em 1000°C/30min.

2.1. Análise de imagens

Para o preparo das amostras, as peças foram cortadas conforme as posições indicadas na Figura 3. As diferentes seções foram, então, embutidas em baquelite, lixadas e polidas. A aquisição das imagens foi feita por microscopia eletrônica de varredura. As imagens foram analisadas com o auxílio do programa “Imago”, versão β , desenvolvido pelo LMPT/UFSC (Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais), em parceria com a empresa ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software). Com o programa “Imago” foram feitas as análises morfológica e topológica das estruturas. Na análise morfológica foi determinada a distribuição de tamanho de poros e porosidade total. Na análise topológica foi determinado o alcance de correlação da estrutura. O alcance de correlação é determinado pelo ponto em que a função $C(r)$ torna-se constante em relação a “ r ” (r = distância em pixels na imagem). O alcance de correlação indica a ordenação dos poros na estrutura. Quanto maior for essa ordenação, menor será o limite capilar (Fernandes, 1994). O limite capilar está relacionado com força de bombeamento e perdas de carga desenvolvidas no circuito.

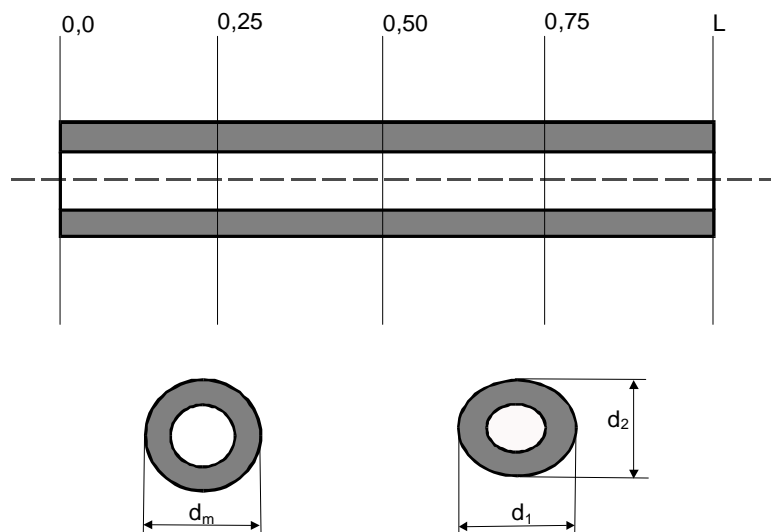


Figura 3 - Localização das cotas de corte das peças para aquisição de imagens.

2.2. Porosimetria de intrusão de mercúrio

A porosimetria de intrusão de mercúrio está fundamentada na Lei de Young-Laplace, que governa a penetração de líquido em pequenos poros. Para o caso específico de fluidos não molhantes, como o mercúrio, a Lei de Young-Laplace pode ser expressa pela Equação 1, onde d é o diâmetro do poro (m), σ é a tensão superficial do líquido (N/m), p é a pressão aplicada no líquido (Pa) e φ é o ângulo de contato entre o fluido e o sólido (Bellini, 1992).

$$d = \frac{-4 \cdot \sigma \cdot \cos \varphi}{p} \quad (1)$$

Para determinar o diâmetro crítico de poro (D_c) e a porosidade total, foi utilizado um porosímetro modelo “Micromeritics Pore Sizer 9320”. O equipamento possui um sistema capaz de gerar pressões entre 0 e 30.000 psia, sendo capaz de medir poros na faixa de 0,006 a 360 μm , com precisão de $\pm 0,1\%$. Através de pressão hidráulica, o mercúrio é forçado a penetrar na amostra. O volume de mercúrio que penetra nos poros é relacionado com a pressão aplicada. Conforme a pressão aumenta, o mercúrio penetra progressivamente nos poros cada vez menores. O diâmetro crítico de poro é o diâmetro que corresponde à pressão capaz de fazer com que a maior parte do mercúrio penetre na amostra.

Numa bomba capilar, quanto menor D_c maior será diferença de pressão que o elemento poroso poderá suportar sem colapsar, diferença essa medida entre a pressão do gás no lado externo do elemento poroso e do líquido no lado interno. O diâmetro crítico indica a maior ou menor capacidade de transferência de calor que o elemento poroso irá apresentar. Quanto menor o diâmetro crítico maior será o limite capilar da estrutura.

2.3. Teste da bomba capilar em bancada experimental

No sentido de avaliar o comportamento térmico do elemento poroso, testes foram conduzidos em bancada experimental. Para montagem da bomba capilar, o elemento poroso foi resfriado em nitrogênio líquido e colocado no interior de um tubo de alumínio ranhurado. Cuidados especiais foram tomados para eliminar a presença de espaços entre o elemento poroso e a parede interna do tubo de alumínio (montagem por interferência). Os acessórios complementares, como tampas e conexões de Teflon, foram também resfriadas e fixadas de modo a evitar qualquer possibilidade de vazamento no interior da bomba capilar. Por razões de segurança, acetona foi adotada como fluido de trabalho. Amônia seria mais indicada por propiciar um melhor desempenho térmico.

Como primeira etapa, foi medida a pressão efetiva de bombeamento capilar, com o auxílio de uma bancada existente no laboratório. Nesta análise, acetona é inicialmente introduzida no interior da bomba capilar. Em seguida, ar comprimido é forçado pelo canal de alimentação do líquido (Figura 2), até o aparecimento de bolhas de ar no canal de vapor. Para esta condição tem-se o valor de pressão que corresponde a máxima pressão de bombeamento capilar. Como segunda etapa, a bomba capilar foi instalada e testada na bancada experimental, conforme mostrado na Figura 4. De acordo com o esquema da Figura 4, foram instalados 6 termopares ao longo do CPL para tomada de temperaturas. O teste consiste em aplicar uma carga térmica pré-determinada à bomba capilar, através de uma resistência elétrica. As temperaturas são medidas a intervalos de tempo pré-estabelecidos, para desta forma analisar o funcionamento do CPL com a carga térmica escolhida. Um sistema de aquisição de sinais

conectado a um computador foi utilizado para leitura e armazenamento de dados. O CPL é operado com o auxílio de dois criostatos (criostato Lauda RK-20KP e criostato Lauda Ultra-Kryomet RUK-40S). O primeiro criostato é utilizado para aquecer ou resfriar o reservatório, controlando assim a temperatura de operação do CPL. O segundo criostato é utilizado para remover calor do condensador.

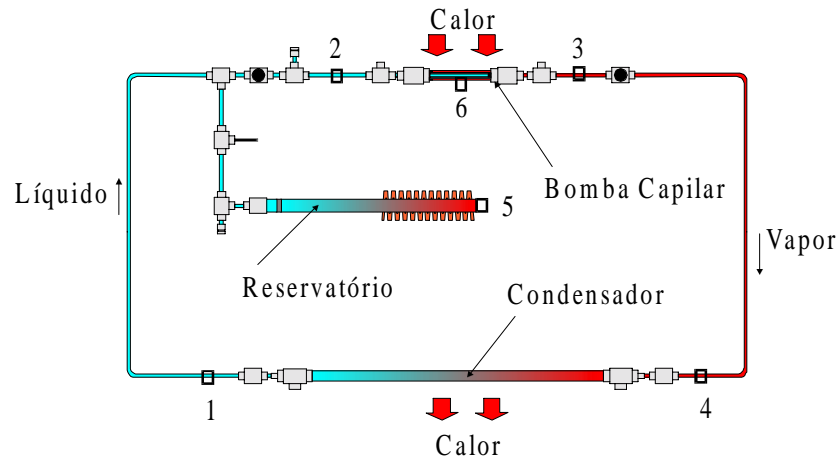


Figura 4 - Esquema de montagem do CPL com os pontos de medição da temperatura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise de imagens

Os resultados obtidos através da análise morfológica podem ser observados na Figura 5. As peças fabricadas com pó de níquel carbonila 123 e mistura de pós foram sinterizadas a $950^{\circ}\text{C}/30\text{min}$. As peças fabricadas com pó atomizado foram sinterizadas a $1000^{\circ}\text{C}/30\text{min}$. Para NP-123, as peças apresentaram cerca de 47% de porosidade, com diâmetro de poros variando entre 1 e $20\ \mu\text{m}$ e com D_{50} de aproximadamente $5\ \mu\text{m}$. Para pó atomizado, as peças apresentaram cerca de 49% de porosidade, com diâmetro de poros variando entre 4 e $37\ \mu\text{m}$ e com D_{50} de aproximadamente $17\ \mu\text{m}$. Para mistura de pós, as peças apresentaram cerca de 49% de porosidade, com diâmetro de poros variando entre 2 e $24\ \mu\text{m}$ e com D_{50} de aproximadamente $8\ \mu\text{m}$. Esses resultados dão um indicativo da força de bombeamento capilar que a estrutura apresenta, permitindo assim uma comparação de estruturas fabricadas com diferentes tipos de pós. Como um menor tamanho de poros indica maior força de bombeamento capilar, a princípio NP-123 parece ser mais indicado. Entretanto, as variações nos valores de porosidade total determinados por este método são relativamente grandes, devido à heterogeneidade da estrutura porosa ao longo de cada peça.

Os resultados obtidos na análise topológica para NP-123, pó atomizado e mistura de pós podem ser observados na Figura 6. Para as peças fabricadas com NP-123, a $950^{\circ}\text{C}/30\text{min}$, a curva mostrada continua descendente após $r=100$, sendo portanto o alcance de correlação maior do que 100. Para as peças fabricadas com pó atomizado, a $1000^{\circ}\text{C}/30\text{min}$, o alcance de correlação indicado é de aproximadamente 70. Para os elementos porosos fabricados com a mistura de pós, a $950^{\circ}\text{C}/30\text{min}$, pode-se observar que mesmo após $r=100$ a curva continua decrescente, indicando que o alcance de correlação é maior do que 100.

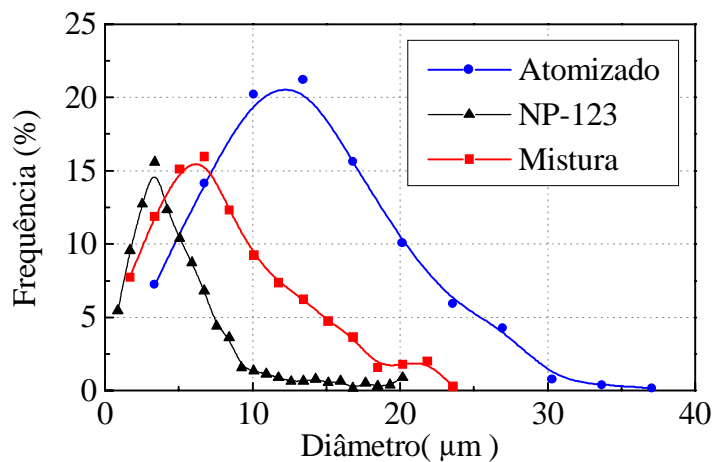


Figura 5 – Análise morfológica e distribuição do tamanho de poros.

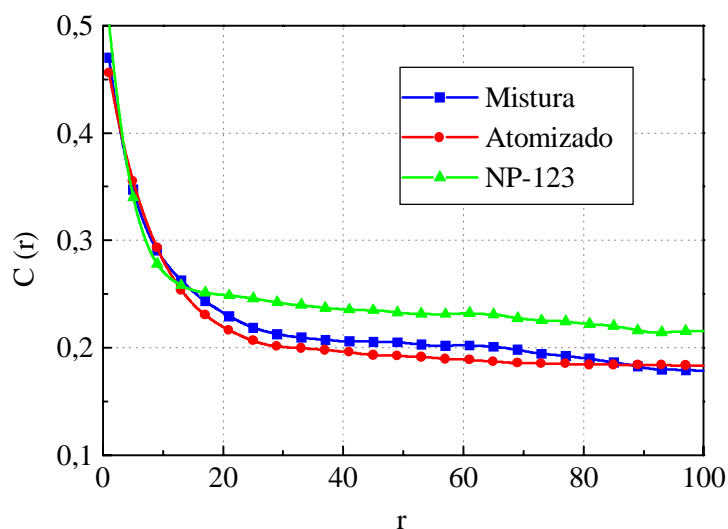


Figura 6 – Análise topológica e alcance de correlação.

A análise topológica complementa a análise morfológica. Com esses resultados pode-se concluir que as peças fabricadas com pó atomizado apresentam uma menor ordenação dos poros, devendo assim possuir um menor diâmetro crítico (D_c) e, conseqüentemente, uma maior força de bombeamento capilar. As estruturas fabricadas com NP-123, apesar de apresentarem um diâmetro médio de poros menor, possuem uma maior ordenação, o que ocasiona um D_c menor. Essa maior ordenação pode ser percebida ainda pela análise morfológica mostrada na Figura 5, onde se observa para o NP-123 uma distribuição de tamanho de poros mais estreita.

3.2. Porosimetria de intrusão de mercúrio

Os resultados relativos ao diâmetro crítico dos elementos porosos podem ser observados na Figura 7. A porosidade obtida através da porosimetria de mercúrio (Hg) foi de 42% para o pó atomizado, 49% para a mistura de pós e 60% para o NP-123. Os valores de porosidade determinados por este método são mais precisos do que aqueles apresentados na análise de imagens, pois a peça é analisada no campo tridimensional.

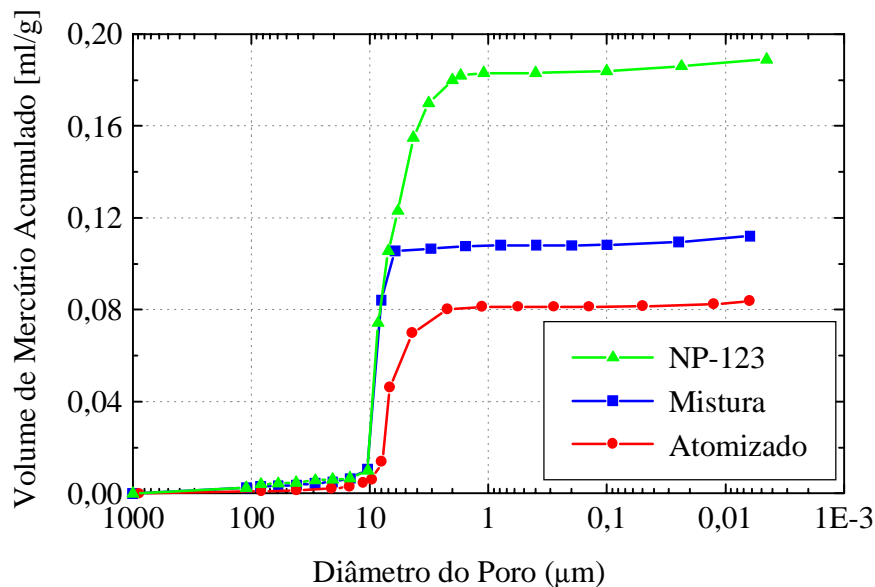


Figura 7 – Porosimetria por intrusão de mercúrio.

A técnica de porosimetria de Hg fornece os valores aproximados de D_c , sendo 10 μm para a mistura de pós e o pó NP-123 e 8 μm para o pó atomizado. Com base nesse parâmetro o pó atomizado parece ser mais apropriado para uso em bombas capilares. O D_c determinado pela porosimetria de Hg se deve não somente ao diâmetro dos poros, mas também ao arranjo de poros formado dentro da estrutura. Poros com diâmetros menores do que 1 μm e maiores do que 11 μm não foram detectados. Estes resultados estão de acordo com os valores encontrados na análise de imagens, mostrando o pó atomizado como o mais indicado por produzir estruturas com D_c menor. De qualquer modo, estudos ainda prosseguem com diferentes tipos de pós, sempre na expectativa de se conseguir boa uniformidade na distribuição de poros e maior capacidade de bombeamento capilar.

3.3. Teste da Bomba Capilar em Bancada

Em função de problemas já descritos anteriormente, optou-se pela montagem de bombas capilares constituídas por elementos porosos de mistura de pós. As bombas capilares foram inicialmente submetidas ao teste das bolhas. Nesse teste, ar é pressurizado no interior da bomba capilar inteiramente mergulhada em acetona, até o limite em que se observa a presença de bolhas no lado oposto do elemento poroso (ver Figura 2). De fato, tais valores podem não corresponder necessariamente ao diâmetro crítico do elemento poroso, uma vez que a presença de interstícios nas interfaces entre elemento poroso e conexões de Teflon contribuem

para que haja uma redução sensível da pressão de bombeamento capilar. No caso das bombas testadas, foram medidas pressões de até 4000 Pa.

Os testes de desempenho foram conduzidos com a bomba capilar montada na bancada experimental mostrada na Figura 4, usando acetona como fluido de trabalho. A Figura 7 mostra resultados correspondentes à carga térmica de 20 W. Tomando-se por base à superfície de contato entre o tubo de alumínio e o elemento poroso (ver Figura 2), tais valores correspondem a taxas de transferência de calor da ordem de $1,2 \text{ W/m}^2$. Os resultados obtidos são equivalentes àqueles indicados na bibliografia (Ku, 1993).

O comportamento térmico da bomba capilar pode ser observado na Figura 8, correspondente a um teste realizado com carga térmica de 20 W, por aproximadamente 2 horas. As temperaturas T_1 , T_3 , T_5 e T_6 mostradas na Figura 8 correspondem às leituras tomadas nos termopares indicados na Figura 3. Pode-se verificar que as temperaturas estabilizam após 15 minutos de operação, indicando um funcionamento regular da bomba capilar. A temperatura de operação do circuito foi fixada em 33°C .

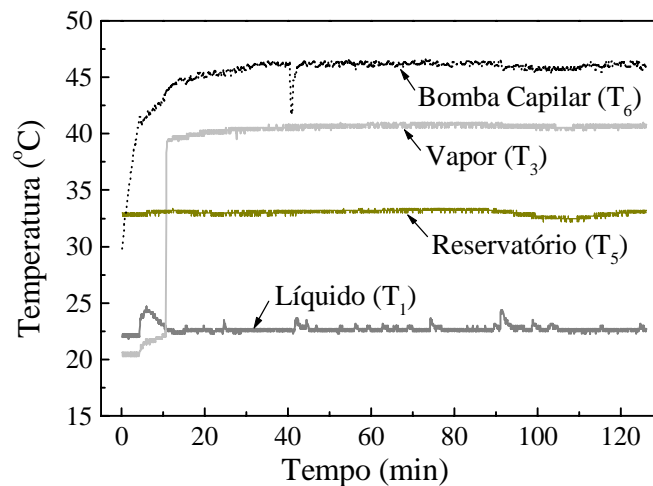


Figura 8 – Teste da bomba capilar em bancada experimental com a aplicação de 20 W.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados na análise morfológica, as peças fabricadas com NP-123 aparentam ter um diâmetro crítico menor, devido aos seus poros serem menores. A análise topológica complementa o trabalho, confirmando que as peças fabricadas com pó atomizado possuem menor diâmetro crítico. Este resultado se deve à menor ordenação dos poros na estrutura das peças fabricadas com pó atomizado. A conclusão de que as peças de pó atomizado possuem menor D_c é confirmada pela porosimetria de intrusão de mercúrio. O desempenho da bomba capilar em bancada experimental com potência de 20 W é considerado satisfatório. Trabalhos prosseguem em laboratório, no sentido de produzir elementos porosos com maior capacidade de bombeamento e melhor desempenho para a bomba capilar.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Celso P. Fernandes, Prof. Paulo C. Philippi e Prof. José A. Bellini da Cunha Neto pelo apoio técnico dispensado na execução dos trabalhos.

5. REFERÊNCIAS

- Bellini, J.A., 1992, Transport d'humidité en matériau poreux en présence d'un gradient de température. Caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire, l'Université Joseph Fourier Grenoble I, pp.35-40, Ph.D. Thesis.
- Cahn, R.W., 1991, Materials science and technology: A comprehensive treatment processing of metals and alloys, VCH Publishers Inc., vol.15, New York.
- Fedorchenko, I.M., 1980, Progress in work in the field of high-porosity materials from metal powders and fibers, Plenum Publishing Corporation, pp.615-622.
- Fernandes, C.P., 1994, Caracterização morfológica de espaços porosos: Reconstituição multiescala e simulação de processos de invasão de fluidos não-molhantes, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, Ph.D. Thesis.
- Goncharov, K. and Nikitkin, M., 1995, Loop heat pipes in thermal control system for "OBZOR" spacecraft, Paper 951555, 25th. International Conference on Environmental Systems, San Diego, July 10-13.
- Ku, Jentung, 1993, Overview of capillary pumped loop technology, 29th National Heat Transfer Conference, Atlanta, Georgia, August 8-11, HTD-vol. 236.
- Maidanik, Yu.F., Fershtater, Yu.G., Goncharov, K., 1991, Capillary-pump loop for systems of thermal regulation of spacecraft, 4th European Symposium on Space Environmental and Control Systems, Florence, October 21-24.
- Reimbrecht, E.G., Fredel, M.C., Bazzo, E., Pereira, F.M., 1998, Manufacturing and microstructural characterization of sintered nickel wicks for capillary pumps. Primeiro Simpósio Brasileiro de Estruturologia, NADCEM-UFMF, Belo Horizonte, 19-20 de outubro.
- Thümmler, F. & Oberacker, R., 1993, Introduction to powder metallurgy, The Institute of Materials, Carlton House Terrace, London.

Title: Porous wick qualification for capillary pump application

Abstract: In this work the microstructure characterization of tubular wicks for capillary pump application is discussed. The porosity, the pore size distribution and the ordering of these pores in the microstructure is analyzed. An image analysis technique and the mercury intrusion porosimetry (MIP) technique are used to characterize the wick. The image analysis technique is used to determine the pore size distribution in 2-D binary images. The MIP technique is used to determine the breakthrough diameter, as the critical diameter related to the capillary pumping limit of the wick. Preliminary testing have demonstrated a satisfactory performance of the wick in a two-phase heat transfer loop.

Key words: Wick, Capillary pump, Microstructure characterization.