

## ELEMENTOS POROSOS CERÂMICOS COMO ALTERNATIVA PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

### Eduardo Gonçalves Reimbrecht

Universidade Federal de Santa Catarina, Depto. de Engenharia Mecânica, Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos, Florianópolis, SC – 88040-900, Brasil.

[eduardo@cet.ufsc.br](mailto:eduardo@cet.ufsc.br)

### Marcelo Nogoseke

Universidade Federal de Santa Catarina, Depto. de Engenharia Mecânica, Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos, Florianópolis, SC – 88040-900, Brasil.

[marcelo@cet.ufsc.br](mailto:marcelo@cet.ufsc.br)

### Alexandre Ryoiti Takahashi

Universidade Federal de Santa Catarina, Depto. de Engenharia Mecânica, Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos, Florianópolis, SC – 88040-900, Brasil.

[takahashi@cet.ufsc.br](mailto:takahashi@cet.ufsc.br)

### Fernando Tabalipa

Universidade Federal de Santa Catarina, Depto. de Engenharia Mecânica, Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos, Florianópolis, SC – 88040-900, Brasil.

[tabalipaufsc@brturbo.com](mailto:tabalipaufsc@brturbo.com)

### Edson Bazzo

Universidade Federal de Santa Catarina, Depto. de Engenharia Mecânica, Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos, Florianópolis, SC – 88040-900, Brasil.

[ebazzo@emc.ufsc.br](mailto:ebazzo@emc.ufsc.br)

**Resumo.** Elementos porosos são utilizados em sistemas de bombeamento capilar como estrutura capilar para movimentação do fluido de trabalho. Seu funcionamento está associado à aplicação de uma carga térmica no evaporador, que promove a evaporação do fluido e a consequente formação de um menisco na interface líquido-vapor. Vários fatores afetam o funcionamento de uma bomba capilar, destacando-se o tipo de fluido de trabalho, a carga térmica aplicada, o material do elemento poroso e as características inerentes à porosidade. Alguns fatores importantes são levados em consideração, tais como: o par material-fluido que determina o ângulo de molhamento e força de bombeamento a capilar; a condutividade térmica do material que influencia diretamente no desempenho da bomba capilar; a compatibilidade entre o material e o fluido abrangendo a estabilidade térmica e química do material. Este trabalho concentra-se na análise de material cerâmico como alternativa para a fabricação do elemento poroso. Resultados relativos à permeabilidade e à distribuição de tamanho de poros são apresentados, dando ênfase à comparação entre amostras de alumina e amostras de níquel. Resultados experimentais sobre o desempenho térmico de uma bomba capilar constituída por elemento poroso cerâmico são também apresentados.

**Palavras chave:** Sistema de bombeamento capilar, elemento poroso cerâmico, análise de imagens, tubo de calor.

### 1. Introdução

Elementos porosos vêm sendo empregados em bombas capilares por apresentarem como principal vantagem uma alta capacidade de bombeamento capilar. Sistemas de bombeamento capilar (CPL – Capillary Pump Loop e LHP – Loop Heat Pipe) são circuitos de transferência de calor de dupla fase, usualmente empregados para controle e gerenciamento térmico de satélites. A fabricação de elementos porosos de níquel, sua caracterização e uso como bombas capilares já vem sendo desenvolvidos e estudados na UFSC desde 1997, Reimbrecht et al (1999). Os avanços no processo de manufatura, contribuíram para uma redução significativa das distorções nas amostras de níquel, assim como a obtenção de peças com porosidade de cerca de 50% com diâmetro de poro crítico inferior a 3  $\mu\text{m}$ , Bazzo et al (1999). Diâmetro crítico da estrutura porosa é o diâmetro efetivo de poro, relativo à diferença de pressão entre as fases líquido e vapor que a estrutura suporta, sem que ocorra o colapso da bomba capilar. A fabricação de elementos porosos cerâmicos na UFSC iniciou-se em 2001 visando o uso como bombas capilares.

CPL's, circuitos de bombas capilares, vem sendo atualmente testados para uso em refrigeração de componentes eletrônicos em terra, como por exemplo de microcomputadores, Chen and Lin (2001). O desempenho de uma bomba capilar com elemento poroso depende do fluido de trabalho, das dimensões e geometria da bomba capilar, do material

do elemento poroso e das propriedades inerentes à porosidade. A caracterização da porosidade e a determinação das propriedades de elementos porosos cerâmicos, demonstrando sua capacitação para uso em bombas capilares, consiste no principal objetivo deste trabalho. O elemento poroso é considerado o componente de maior importância em um CPL, pois nele é gerada a força motriz do sistema. Um desenho esquemático de uma bomba capilar em corte longitudinal pode ser observado na Fig. (1).

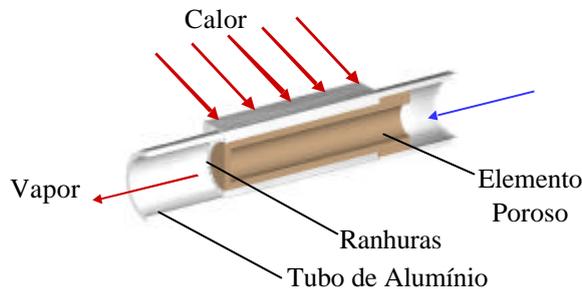


Figura 1. Desenho esquemático de uma bomba capilar em corte longitudinal.

O fluido entra na bomba capilar na fase líquida, preenche a estrutura porosa, recebe calor e sai na outra extremidade na fase vapor. Um dos principais limites de funcionamento da bomba capilar está relacionado com a diferença de pressão entre as fases líquida e vapor que o elemento poroso suporta, sendo esta limitação chamada de limite de bombeamento capilar. A relação entre o limite de bombeamento capilar da estrutura porosa e o raio crítico do poro é ilustrada pela Eq. (1).

$$P_v - P_l = \frac{2 * \sigma * \cos \theta}{r_c} \quad (1)$$

Onde,  $P_v$  representa a pressão do vapor,  $P_l$  a pressão na fase líquida,  $\sigma$  a tensão superficial entre o sólido e o fluido,  $\theta$  o ângulo de contato entre o sólido e o líquido e  $r_c$  o raio crítico do poro.

Os parâmetros, porosidade, permeabilidade e distribuição de tamanho de poros são determinados na caracterização do elemento poroso. Estes parâmetros podem ser determinados via análise de imagens. A análise de imagens é uma técnica que vem sendo empregada em diversas áreas da engenharia, Reimbrecht et al (2000) e Fernandes (1994).

## 2. Procedimento experimental

Diversas peças foram fabricadas através de colagem por barbotina, utilizando alumina como matéria-prima. Para a formação da porosidade requerida foi misturada matéria orgânica celulósica moída e misturada à alumina. Esta matéria orgânica foi posteriormente retirada em uma etapa de queima a 600°C/1h que precede a sinterização a 1400°C/1h.

A porosidade foi inicialmente determinada utilizando o princípio de Arquimedes, segundo a norma MPIF-42. Esta determinação é rápida e confiável, conforme apresentado em trabalhos anteriores, Reimbrecht et al (1999).

A análise de imagens é a técnica utilizada que fornece uma maior quantidade de informações a respeito da estrutura. Foram inicialmente tomadas 60 imagens de diferentes amostras fabricadas sobre as mesmas condições. Foram coletadas amostras dos elementos porosos cerâmicos que vem sendo testados em bancada experimental. Estas amostras foram seccionadas, embutidas a vácuo em resina polimérica, lixadas e polidas para a posterior aquisição das imagens via microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foi necessário o recobrimento das amostras com material condutor para posterior aquisição das imagens. O número de imagens utilizadas garante estabilidade estatística à amostragem, estabilidade esta obtida a partir de 20 imagens, onde a adição de novas imagens não altera o valor dos parâmetros medidos. Na microscopia eletrônica de varredura foi utilizada a captação de elétrons retro-espalhados, tendo em vista a necessidade de aumento do contraste entre as fases poro e sólido e sendo desnecessária a idéia de profundidade. Desta forma, foram obtidas imagens em níveis de cinza. A caracterização via análise de imagens foi realizada aplicando-se o programa computacional IMAGO no caso em estudo, dividindo-se o trabalho em caracterização geométrica e caracterização física, Daminani et al (2000). Na caracterização geométrica foi determinada a porosidade e a distribuição de tamanho de poros e na caracterização física foi determinada a permeabilidade. A comparação dos resultados foi realizada com dados correspondentes às peças metálicas, obtidas por sinterização de pó de níquel, Reimbrecht et al (1999) e Reimbrecht et al (2000). Um exemplo de imagem, obtida de uma peça sinterizada com material cerâmico, com aumento de 200x, pode ser observado na Fig. (2).

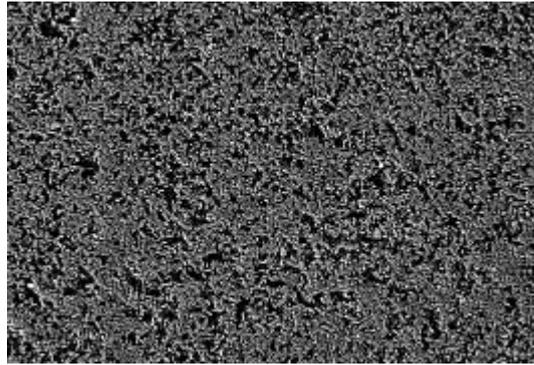


Figura 2. Imagem obtida via MEV com aumento de 200x.

Uma bomba capilar foi montada e testada em laboratório, utilizando elemento poroso cerâmico e acetona como fluido de trabalho. Na Fig. (3) é mostrado um esquema da bomba capilar utilizada em corte transversal. O elemento poroso de material cerâmico foi inserido no interior de um tubo de alumínio internamente ranhurado, de forma a promover o bombeamento de fluido térmico da região do condensador para o evaporador.

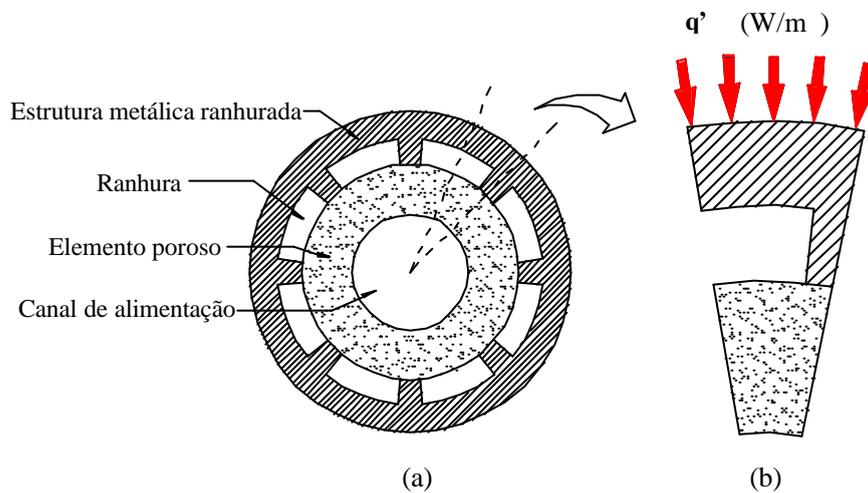


Figura 3. Secção transversal do evaporador de uma bomba capilar (a) e domínio de solução (b).

Na Fig. (4) pode-se observar a bancada experimental onde foram realizados os testes com a bomba cerâmica. O elemento poroso foi colocado por interferência dentro de um tubo ranhurado de alumínio formando assim a bomba capilar. O restante do sistema é composto por tubulação de aço e algumas conexões de Teflon. A aquisição da temperatura é feita por termopares localizados ao longo do circuito. Um CPL é basicamente constituído de linhas de líquido e vapor, uma bomba capilar associada a uma placa absorvedora, um condensador associado a uma placa irradiadora e um reservatório. A pressão e a temperatura de trabalho do CPL são definidas através do controle de temperatura realizado no reservatório. A refrigeração da placa irradiadora foi feita com um banho termostático Lauda modelo E200. Resistências elétricas foram utilizadas para o aquecimento da bomba capilar, e o calor transferido pela bomba foi controlado pela potência aplicada. Foi utilizado um sistema de aquisição de sinais HP modelo agilent34970a.



Figura 4. Bancada experimental para teste da bomba capilar.

Inicialmente, foram realizados testes com diferentes níveis de potencia aplicada, visando determinar o limite de bombeamento capilar em um teste prático, assim como o funcionamento da bomba capilar. Foram aplicados progressivamente 10, 20, 30, 40, 50 e 60 W. Na Fig. (5) pode-se observar um desenho esquemático do CPL onde os pontos de tomada de temperatura são mostrados.

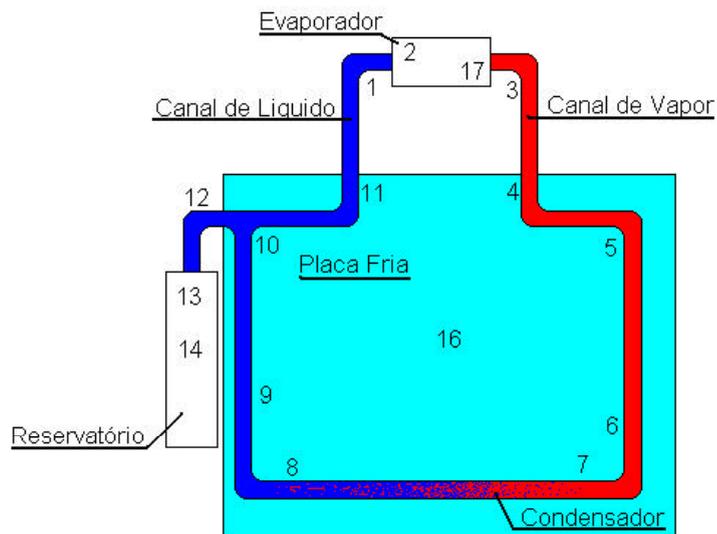


Figura 5. Desenho esquemático do CPL com os pontos de tomada de temperatura.

### 3. Resultados

#### 3.1. Caracterização microestrutural do elemento poroso

Inicialmente são mostrados os resultados relativos a caracterização dos elementos porosos cerâmicos. Em uma segunda etapa, estes resultados são comparados e analisados com relação aos dados existentes sobre elementos porosos de níquel. Na Fig. (6) pode-se observar uma foto dos elementos porosos cerâmicos produzidos, (a), assim como um detalhamento da superfície de uma amostra, (b). Foram produzidos elementos porosos com diferentes espessuras de parede visando futuros testes de funcionamento em bancada experimental.



Figura 6. (a) Elementos porosos cerâmicos, (b) detalhe da superfície de uma amostra.

Porosidade média de 50,9%, com desvio padrão de  $\pm 0,8\%$ , foi obtida experimentalmente de acordo com a norma MPIF-42. Também foi verificado experimentalmente que as peças produzidas apresentam baixa distorção geométrica, não sendo necessárias operações complementares para correção da geometria.

Na análise de imagens foi realizada inicialmente a binarização das imagens. Um exemplo da binarização pode ser observado na Fig. (7), onde se apresenta a imagem original (a) e a imagem binarizada (b). A binarização foi realizada manualmente no histograma de tons de cinza apresentado pela imagem original e foi escolhido o ponto de corte 115 entre 0 e 255. O ponto de corte é selecionado visando a melhor representatividade da imagem original.

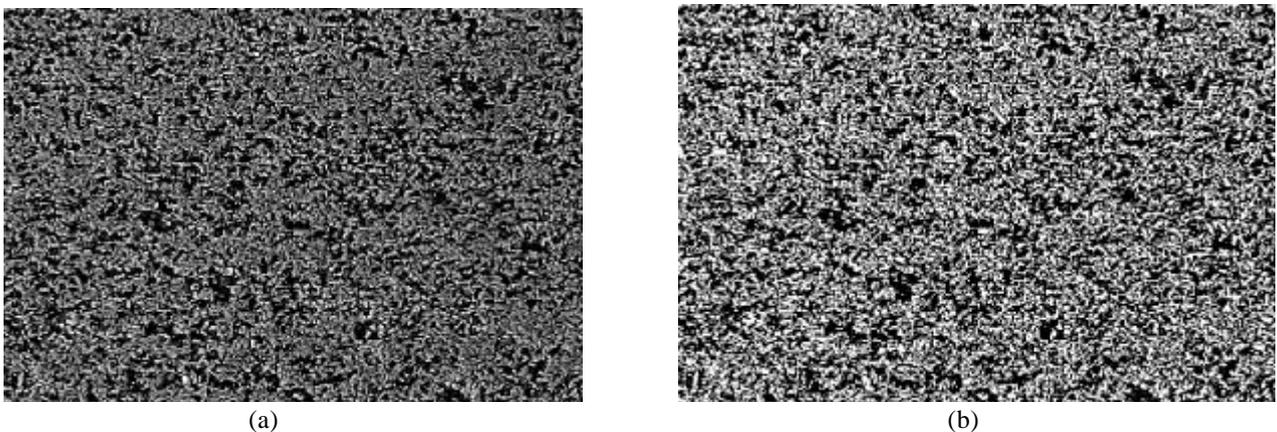


Figura 7. Imagem obtida via MEV com aumento de 200x, (a) original e (b) imagem binarizada.

Com a análise de imagens obteve-se porosidade de 53,9%. A distribuição de tamanho de poros pode ser observada na Fig. (8).

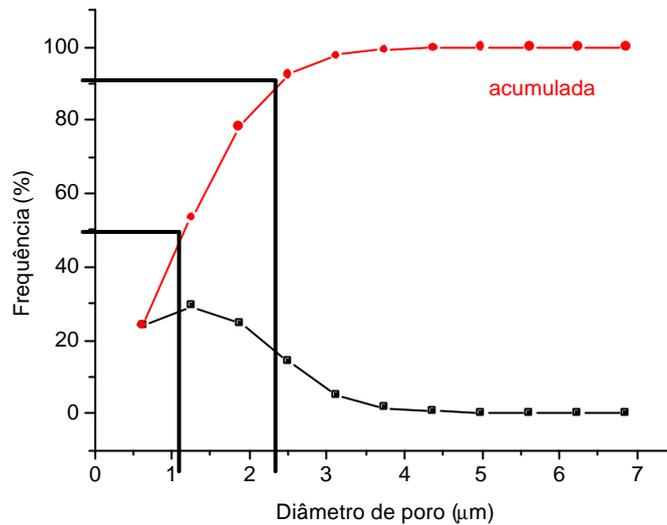


Figura 8. Distribuição de tamanho de poros para as amostras cerâmicas.

Na Fig. (8) pode-se observar que 50% dos poros são menores do que 1,2 µm, e que 90% dos poros são menores do que 2,4 µm. O diâmetro médio é de 1,6 µm e o diâmetro crítico é provavelmente menor do que 2,4 µm.

A permeabilidade média determinada a partir da distribuição de tamanho de poros foi de 26,4 mD e a porosidade média, obtida por análise de imagens, de 53,9 %. Existe uma pequena diferença entre valores de porosidade apresentados experimentalmente e por análise de imagens. Isso se deve a prováveis erros associados com o uso de análise de imagens para determinação de porosidade. Essa diferença normalmente se deve a algum erro ocorrido no processamento, seja na preparação da amostra, na aquisição da imagem e/ou na binarização da mesma.

### 3.2. Comparação com elementos porosos de níquel

Com relação à porosidade total, não existe uma diferença significativa do ponto de vista de bombeamento capilar entre a amostra cerâmica e a metálica. A comparação entre a distribuição de tamanho de poros pode ser observada na Fig. (9). Na Figura 9 pode-se observar que a distribuição de tamanho de poros da peça de níquel é mais aberta e que tem maior diâmetro médio. Ainda de acordo com a Fig. (9), pode-se concluir que a amostra cerâmica possui um menor diâmetro de percolação. Um menor diâmetro de percolação implica em um menor diâmetro crítico, o que indica um maior limite de bombeamento capilar.

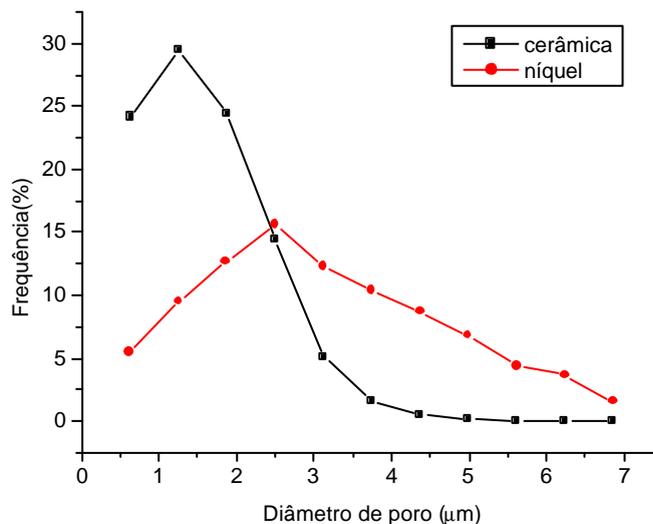


Figura 9. Comparação da distribuição de tamanho de poros entre a peça de níquel e a peça de alumina.

### 3.3 Caracterização térmica do elemento poroso

A transferência de calor e massa com mudança de fase em elementos porosos utilizados em bombas capilares vêm sendo estudada com o objetivo de determinar as condições de operação para máximo calor aplicado em regime permanente. As equações conservativas da continuidade, momento e energia para meios porosos são empregadas em conjunto com descrições fenomenológicas das propriedades térmicas e fluido-dinâmicas para estruturas porosas cerâmicas ou metálicas.

O domínio de cálculo no elemento poroso é definido pela simetria da secção transversal do evaporador, como mostrado na Fig. (3-b). O sistema de coordenadas cartesianas bidimensional é empregado no domínio de cálculo, com fluxo de calor sendo aplicado na secção da superfície superior equivalente a superfície de contato entre a aleta metálica e o elemento poroso. A troca de calor por convecção ocorre na superfície inferior com o líquido que chega do condensador. A condição de simetria prescreve as condições de contorno nos contornos laterais. As pressões fora do elemento poroso são assumidas prescritas pelas condições de operação de circuito.

Utiliza-se um método de procura da interface líquido-vapor para encontrar a posição da frente de evaporação em condição de regime permanente. A posição estacionária da interface líquido-vapor é encontrada para um fluxo de calor aplicado quando se alcança o equilíbrio de calor e massa local na interface. Um aumento no fluxo de calor aplicado provoca um acréscimo na área da frente de evaporação. A frente se desloca para a posição de equilíbrio referente à nova condição de fluxo de calor aplicado. O fluxo de calor limite de operação é alcançado quando a taxa de evaporação do fluido não é suficiente para manter o equilíbrio da frente. Isto ocorre quando a área da interface alcança o limite, que é predito pelas dimensões do domínio de cálculo. Tem-se assim, a secagem do elemento poroso e colapso da bomba capilar. Objetiva-se neste estudo determinar o efeito da geometria do elemento poroso no fluxo de calor máximo de operação, determinar a influência das propriedades térmicas e hidrológicas do elemento poroso, como a condutividade, permeabilidade e pressão capilar, e otimizar a estrutura e geometria do elemento poroso visando maximizar o fluxo de calor máximo em operação contínua. Não há ainda resultados disponíveis para análise.

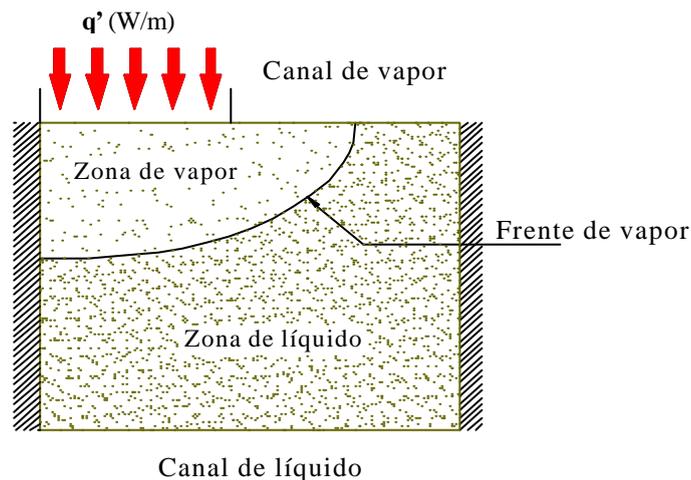


Figura 10. Domínio de cálculo com a frente de evaporação.

### 3.4. Teste da bomba capilar em bancada experimental

Na Fig. (11) são mostrados os resultados relativos a primeira bateria de testes, com potências de 10, 20, 30 e 40 W. A bomba capilar funcionou satisfatoriamente. Para as maiores potências, conforme mostrado na Fig. (12), pode-se observar que a bomba continuou funcionando com 50 W, vindo a colapsar com 60 W. O colapso ocorrido com 60 W é evidenciado na Fig. (12) pela não estabilização da temperatura medida pelo termopar denominado "102(C)" que está posicionado na bomba capilar. Entretanto, não houve repetibilidade nos testes.

Na Fig. (13) é mostrado o resultado do segundo teste, com aplicação de apenas 20 W. Pode-se observar a ocorrência de colapso da bomba no ponto onde a temperatura sobe abruptamente.

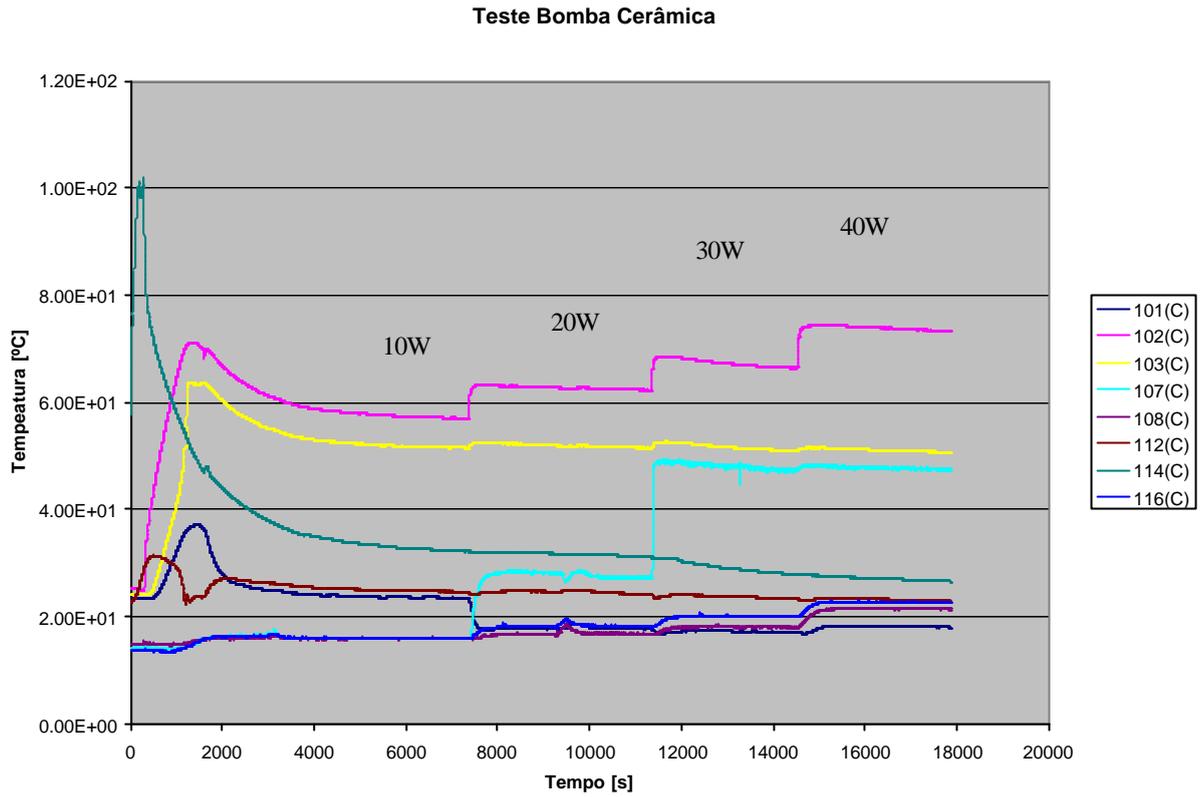


Figura 11. Teste em bancada com potência de 10, 20, 30 e 40 W.

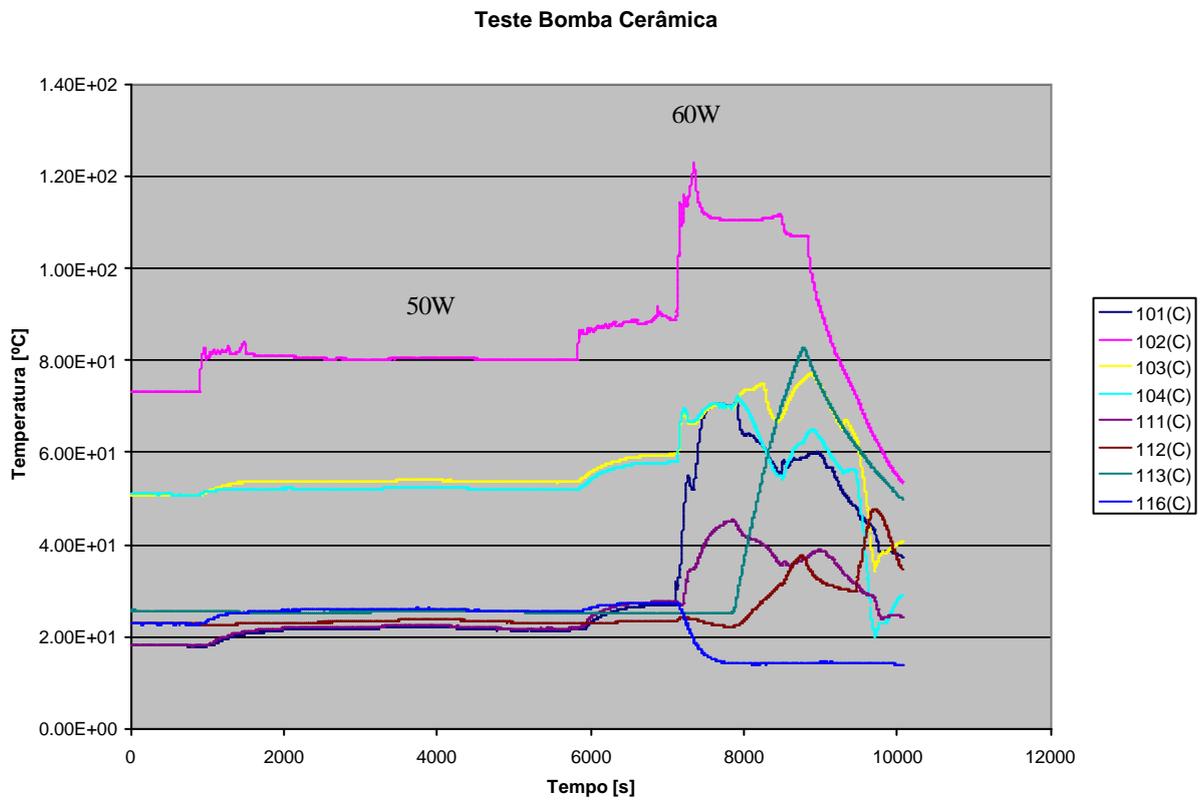


Figura 12. Teste em bancada com potência de 50 e 60 W.

### Teste Bomba Cerâmica

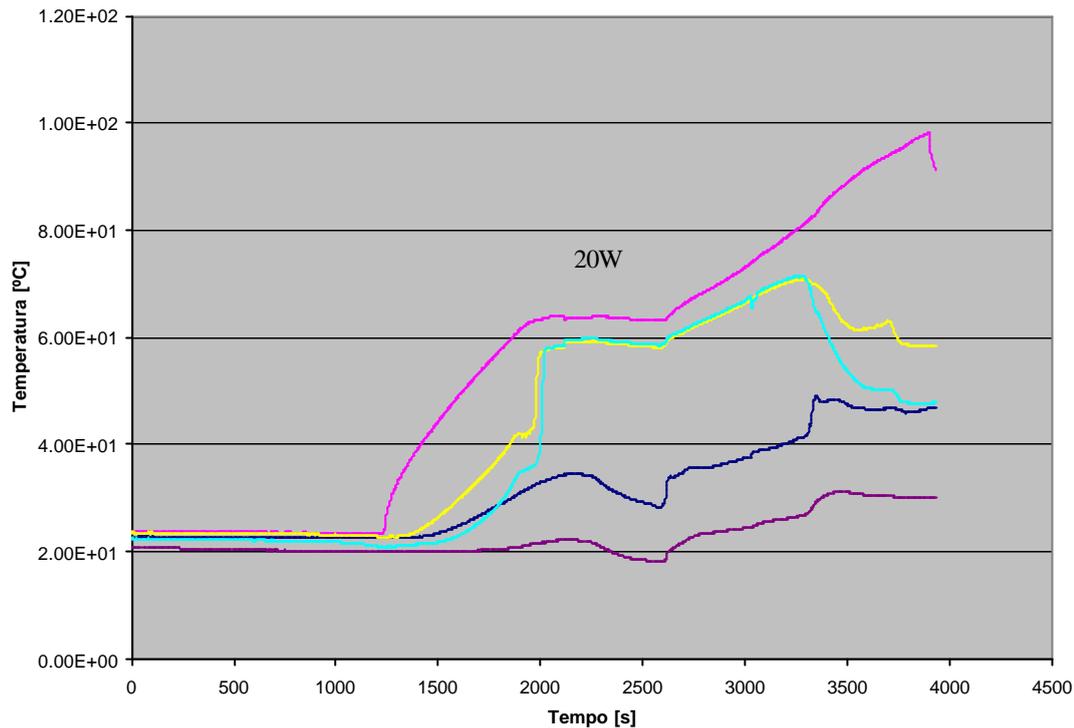


Figura 13. Teste em bancada com potência de 20 W.

No segundo teste, mostrado na Fig. (13), ocorreu o colapso da bomba capilar cerâmica a 20 W mesmo não havendo um motivo aparente par tal, pois a bomba havia funcionado anteriormente com potências maiores. Na Fig. (13), o colapso é novamente evidenciado pelo aumento contínuo da temperatura medida pelo termopar “102(C)” posicionado na bomba capilar. Inicialmente o CPL e a bomba foram desmontados e os componentes avaliados. Nesta etapa de determinação da causa do colapso, verificou-se a presença de matéria residual depositada no interior da bomba e nos poros. Sendo o circuito composto de aço inoxidável e de teflon, a fonte provável de contaminação passou a ser o elemento poroso. A acetona utilizada nos ensaios é de alta pureza, cerca de 99,95%. Após alguns testes com o elemento poroso imerso em acetona foi possível determinar que a fonte da contaminação era realmente o elemento poroso. Resíduos orgânicos, provenientes do material celulósico utilizado na fabricação, acabavam por ser extraídos quimicamente pela acetona, se depositando na região do elemento poroso, provocando a obstrução dos poros e posterior colapso da bomba capilar. Extrações químicas vêm sendo testadas para a correção deste problema.

#### 4. Conclusões

Elementos porosos cerâmicos apresentam porosidade de cerca de 50% com diâmetro crítico de poro de 2,4  $\mu\text{m}$ , valores adequados para uso em bombas capilares e equivalentes aos apresentados pelos elementos porosos de níquel. O material cerâmico possui baixa condutividade térmica e alta estabilidade química em comparação ao níquel, o que o torna mais atrativo para o uso em bombas capilares.

Embora os testes iniciais tenham comprovado um desempenho satisfatório da bomba capilar em bancada experimental, os resultados não são suficientes para qualificar o elemento cerâmico como estrutura capilar. Estudos complementares são necessários no sentido de resolver problemas críticos relacionados com a fabricação de peças, tornando-as compatíveis com o fluido de trabalho. Testes em bancada experimental prosseguem visando uma avaliação completa do comportamento da bomba capilar com elemento poroso cerâmico. Uma análise da resistência mecânica também está em andamento visando aumentar a confiabilidade dos elementos porosos cerâmicos.

#### 5. Referências

- Bazzo, E., Reimbrecht, E.G., Fernandes, C.P., 1999, “Manufacturing Procedure and Porous Structure Characterization of Tubular Wicks”. 12<sup>o</sup> IHPC - International Heat Pipe Conference.
- Chen, P.C. and Lin, W.K., 2001, “The Application of Capillary Pumped Loop for Cooling of Electronic Components”, Applied Thermal Engineering 21, pp.1739-1754.
- Damiani, M.C., Fernandes, C.P., Philippi, P.C., Reimbrecht, E.G., 2000, “Ímago - Um software de análise de imagens”. 1<sup>o</sup> Sulmat – Primeiro Congresso em Ciência de Materiais da Região Sul.

- Fredel, M.C. , Reimbrecht, E.G., Bazzo, E. Wendhausen, P.A.P., 2000, “Manufacturing of tubular porous structures for capillary pumps”, PM<sup>2</sup>TEC2000 - International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials.
- Fernandes, C.P., 1994, “Caracterização Morfológica de Espaços Porosos: Reconstituição Multiescala e Simulação de Processos de Invasão de Fluidos Não-molhantes”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Reimbrecht, E.G., Pereira, F.M., Bazzo, E., Fredel, M., 1999, “Manufacturing and Microstructural Characterization of Sintered Nickel Wicks for Capillary Pumps”. Materials Research, vol.2, n°3, pp. 225-229.
- Reimbrecht, E.G., Maliska, A.M., Bazzo, E., 2000, “Análise comparativa entre métodos utilizados na caracterização de estruturas porosas aplicadas em bombas capilares”. CONEN-2000 - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.

## CERAMIC POROUS WICK LIKE ALTERNATIVE TO CAPILLARY PUMPING SYSTEMS

### **Eduardo Gonçalves Reimbrecht**

Federal University of Santa Catarina, Mechanical Engineering Department, LABCET, Florianópolis, SC – 88040900, Brazil.

[eduardo@cet.ufsc.br](mailto:eduardo@cet.ufsc.br)

### **Marcelo Nogoseke**

Federal University of Santa Catarina, Mechanical Engineering Department, LABCET, Florianópolis, SC – 88040900, Brazil.

[marcelo@cet.ufsc.br](mailto:marcelo@cet.ufsc.br)

### **Fernando Tabalipa**

Federal University of Santa Catarina, Mechanical Engineering Department, LABCET, Florianópolis, SC – 88040900, Brazil.

[tabalipaufsc@brturbo.com](mailto:tabalipaufsc@brturbo.com)

### **Alexandre Ryoiti Takahashi**

Federal University of Santa Catarina, Mechanical Engineering Department, LABCET, Florianópolis, SC – 88040900, Brazil.

[takahashi@cet.ufsc.br](mailto:takahashi@cet.ufsc.br)

### **Edson Bazzo**

Federal University of Santa Catarina, Mechanical Engineering Department, LABCET, Florianópolis, SC – 88040900, Brazil.

[ebazzo@emc.ufsc.br](mailto:ebazzo@emc.ufsc.br)

***Abstract.** Porous wicks are applied to displace the working fluid in capillary pump loops (CPL) and loop heat pipes (LHP). The heat load starts to evaporate the working fluid and create a meniscus into the porous structure that manages the system work. Several parameters are important to capillary pumps, the working fluid, the heat load, the wick material and the characteristics of the porosity. The wick conductivity, the wick material and the working fluid change the capillary pump capacity. The explanation is that the choice of the wick material and the working fluid change the wetting angle. The wick conductivity and the material – fluid combination that change the wetting angle alter hardly the capillary pump capacity. The compatibility between the material and the fluid is another important parameter, thermal and chemical stability are necessary. The main objective of this work is analyze the ceramic material as an alternative for capillary evaporator application. Porosity, pore size distribution and permeability were the parameters determined and used to compare ceramic and metallic wicks. Experimental results of a ceramic wick in a test bed are showed too.*

***Keywords .** Capillary pumping system, ceramic porous wick, image analysis.*