

ANÁLISE TEÓRICA DOS LIMITES OPERACIONAIS DE TUBOS DE CALOR COM DIFERENTES ESTRUTURAS CAPILARES

Vivian Machado, vivian_machadoo@yahoo.com.br

Larissa Krambeck, larikrambeck@hotmail.com

Felipe Baptista Nishida, felipenishida@hotmail.com

Paulo Henrique Dias dos Santos, psantos@utfpr.edu.br

Thiago Antonini Alves, thiagoaalves@utfpr.edu.br

Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Ponta Grossa, Ponta Grossa/PR, CEP 84.016-210, Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise teórica dos limites operacionais de tubos de calor contendo diferentes estruturas capilares, sendo elas: pó metálico sinterizado, tela metálica e ranhura axial semicircular. Para realização dos cálculos foi utilizado o software Engineering Equation Solver™ (EES™), que apresenta uma biblioteca completa com propriedades termofísicas dos materiais e fluidos de trabalho utilizados. Os tubos de calor objetos de estudo possuem paredes de cobre, com um de diâmetro interno de 7,75 mm, um diâmetro externo de 9,45 mm e comprimento total de 200 mm. O comprimento dos tubos de calor é dividido em 80 mm de evaporador, 20 mm de seção adiabática e 100 mm de condensador. Os tubos de calor são estudados na posição horizontal. O fluido de trabalho considerado é a água. Os limites operacionais estudados foram: limite de arrasto, limite de ebulição, limite capilar, limite sônico e limite viscoso. Para o limite capilar, considerado o mais restritivo no projeto de tubos de calor, a estrutura capilar que apresenta o melhor desempenho é o meio composto por pó metálico sinterizado.

Palavras-chave: tubos de calor, limites operacionais, análise teórica, estrutura capilar.

1. INTRODUÇÃO

Tubos de calor são dispositivos passivos de transferência de calor altamente eficientes, que operam em um ciclo bifásico fechado e que utilizam do calor latente de vaporização do fluido de trabalho para transferir energia na forma de calor a partir de pequenos gradientes de temperatura (Mantelli, 2009). Os tubos de calor apresentam vantagens como: elevada condutividade térmica, não necessidade de bombeamento, não existência de partes móveis e quedas de pressão relativamente baixas (Krambeck *et al.*, 2017). Suas aplicações vão desde a recuperação de calor em meios industriais até o controle térmico de componentes eletroeletrônicos (Aguiar *et al.*, 2018).

Os tubos de calor podem ser divididos basicamente em três regiões: seção do evaporador (fonte de calor), seção adiabática (região isolada termicamente) e seção do condensador (sumidouro de calor), conforme ilustrado na Fig. 1. Maiores detalhes sobre o princípio de funcionamento de tubos de calor são encontrados em Chi (1976), Groll & Rösler (1992), Peterson (1994) e Reay *et al.* (2014).

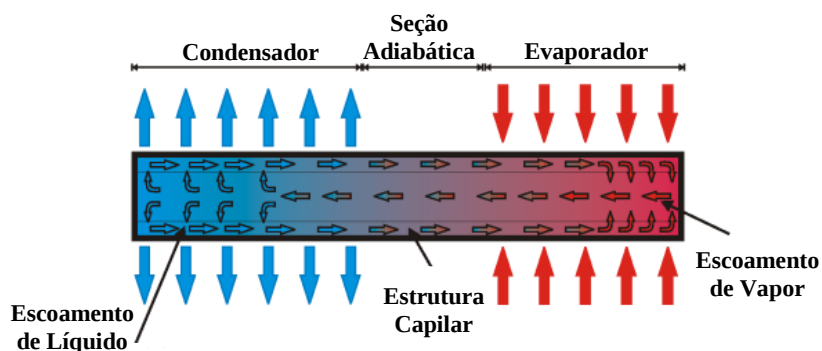


Figura 1. Diagrama esquemático de um tubo de calor.

Considerados como dispositivos passivos de transferência de calor, os tubos de calor são confeccionados a partir de um tubo metálico oco, evacuado e com paredes internas revestidas com uma estrutura capilar e são preenchidos com um fluido de trabalho. A escolha da estrutura capilar é de suma importância para o bom desempenho do tubo de calor, pois ela promove o bombeamento capilar (Jiang *et al.*, 2014). As três propriedades mais importantes de estruturas capilares utilizadas em tubos de calor são: o tamanho do raio dos poros, a permeabilidade e a condutividade térmica. O raio do poro deve ser pequeno, se uma grande diferença de pressão capilar é requerida para bombear o líquido do condensador para o evaporador ou em casos onde se necessita uma alta capacidade de transporte de calor. A permeabilidade é inversamente relacionada à resistência da região porosa para com o escoamento de líquido e deve ser grande para se obter uma baixa queda de pressão do líquido na estrutura capilar. Maiores valores de condutividade térmica resultam em menores quedas de temperatura através da estrutura capilar, o que é uma condição favorável no projeto de um tubo de calor (Shabany, 2010).

As estruturas capilares mais utilizadas são de pó metálico sinterizado, telas metálicas e ranhuras axiais. Estruturas de metal sinterizado são feitas pelo processo de sinterização de pequenas partículas de metal entre a parede interna do tubo e um mandril. A tela metálica é o tipo de estrutura capilar mais simples e mais comumente utilizada, ela é conformada em um gabarito e inserida dentro tubo de calor. Estruturas de ranhuras axiais são feitas através de extrusão, brochamento, fresamento, eletroerosão a fio, dentre outros, internamente ao tubo. Existem muitos tipos de ranhuras de seção transversal retangular, triangular, trapezoidal, circular e semicircular, e eles dependem do método de fabricação da ranhura. A Tabela 1 apresenta as principais características das principais estruturas capilares consideradas neste trabalho (Nishida, 2016).

Tabela 1. Estruturas capilares utilizadas em tubos de calor e suas características.

Estrutura Capilar	Bombeamento Capilar	Condutividade Térmica	Permeabilidade	Comentários
 Pó metálico sinterizado	Alto	Média	Média-baixa	Partículas esféricas empacotadas, metal em fibra ou em pó
 Ranhuras axiais	Baixo	Alta	Média-Alta	Ranhuras axiais retangular, circular, semicircular, trapezoidal ou triangular
 Tela metálica	Alto	Alta	Média-baixa	Única ou múltiplas camadas de telas de fios

Embora os tubos de calor sejam dispositivos altamente eficientes de transferência de calor por mudança de fase, eles estão sujeitos a uma série de limitações. Estas restrições determinam a máxima transferência de calor de um tubo de calor sob determinadas condições de operação. Os fenômenos físicos que podem limitar o transporte de calor nos tubos de calor são devido ao limite do fluxo contínuo, de início de operação (*start up*), viscoso, sônico, de arrasto, capilar, do condensador e de ebulição (Mantelli, 2009).

A limitação da transferência de calor de um tubo de calor pode ser dada por uma das restrições citadas anteriormente dependendo do tamanho e formato do tubo, fluido de trabalho, estrutura capilar e temperatura de operação. O mais baixo entre os oito limites operacionais define o limite máximo de transporte de calor de um tubo de calor (Faghri, 2014). Os principais limites operacionais são: limite de arrasto, limite de ebulição, limite capilar, limite sônico e limite viscoso.

Neste contexto, no presente trabalho foram analisados teoricamente os principais limites operacionais de tubos de calor com as mesmas dimensões e geometrias, distintos entre si apenas pelas estruturas capilares. As estruturas capilares consideradas são pó metálico sinterizado, tela metálica com *mesh* #100 e ranhuras axiais semicirculares fabricadas a partir do processo de eletroerosão a fio.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As limitações da capacidade de transporte de energia na forma de calor de um tubo de calor incluem a incapacidade de bombeamento capilar (limite capilar), o arrasto de líquido da interface líquido-vapor pelo escoamento de vapor (limite de arrasto), a insuficiência dos gradientes de pressão devido às forças viscosas na região do vapor (limite viscoso), o entupimento do escoamento vapor (limite sônico) e a interrupção do escoamento de líquido pela ebulição nucleada na estrutura capilar (limite de ebulição). A fundamentação teórica para estes limites operacionais é baseada levando em consideração as informações contidas em Nishida (2016).

2.1. Limite Capilar

O limite capilar, Eq. (1), foi baseado no cálculo da pressão máxima capilar, $\Delta p_{c,máx}$, a qual deve ser maior que a queda de pressão total no tubo de calor. A queda de pressão total é composta pela pressão necessária para retornar o líquido do condensador para o evaporador, a queda de pressão necessária para que o vapor escoe entre o evaporador e o condensador e a queda de pressão devido à aceleração da gravidade (Reay *et al.*, 2014). O cálculo das diferenças de pressões utiliza além de parâmetros geométricos do tubo de calor e propriedades termofísicas do fluido de trabalho, o valor da área de vapor, raio de vapor e raio capilar efetivo (Peterson, 1994).

$$q_{capilar} = \Delta p_{c,máx} = \frac{2\sigma_l}{r_{c,eff}}, \quad (1)$$

sendo que, σ_l é a tensão superficial do fluido de trabalho no estado líquido [N/m] e $r_{c,eff}$ é o raio capilar efetivo da estrutura capilar [m]. A Tabela 2 define o raio capilar efetivo para as diferentes estruturas capilares abordadas neste trabalho.

Tabela 2. Raio capilar efetivo, $r_{c,eff}$, para diferentes estruturas capilares.

Tipo de Estrutura Capilar	$r_{c,eff}$	Descrição
Pó metálico sinterizado	$0,41 r_s$	r_s = raio médio do pó metálico [m]
Ranhurax axiais semicirculares*	w	w = largura da ranhura [m]
Tela metálica	$\frac{w + D_{fio}}{2} = \frac{1}{2N}$	w = espaçamento entre os fios [m] D_{fio} = diâmetro do fio da tela metálica [m] N = número de malha da tela (<i>mesh</i>) [1/pol]

* adaptado em Nishida (2016).

2.2. Limite de Arrasto

O limite de arrasto, Eq. (2), está relacionado com as forças de cisalhamento na interface líquido-vapor. Quando atingido o valor limite, o arrasto das partículas líquidas pelo vapor que escoar no condensador, pode acarretar na secagem do tubo de calor e consequente falha na operação (Chi, 1976).

$$q_{arrasto} = A_v h_{lv} \left(\frac{\sigma_l \rho_v}{2r_{h,ec}} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

sendo que, A_v é a área do vapor [m²], h_{lv} é o calor latente de vaporização [J/kg], ρ_v é a massa específica do fluido de trabalho no estado vapor [kg/m³] e $r_{h,ec}$ é o raio hidráulico do poro da superfície da estrutura capilar [m], definido na Tab. 3.

Tabela 3. Raio hidráulico do poro da superfície da estrutura capilar, $r_{h,ec}$.

Tipo de Estrutura Capilar	$r_{c,eff}$
Ranhurax axiais semicirculares*	w
Tela metálica	$\frac{1}{2N} - \frac{D_{fio}}{2}$

* adaptado em Nishida (2016).

2.3. Limite Viscoso

O limite viscoso, Eq. (3), é atingido, quando há insuficiência dos gradientes de pressão no interior do tubo, devido às forças viscosas na região do vapor. Como consequência, o escoamento de vapor cessa. Uma propriedade importante do fluido de trabalho, utilizada no cálculo deste limite, é a pressão de saturação, p_{sat} (Reay *et al.*, 2014).

$$q_{viscoso} = \frac{A_v r_v^2 h_{lv} \rho_v p_{sat}}{16 \mu_v l_{eff}}, \quad (3)$$

sendo que, r_v é o raio do vapor [m], μ_v é a viscosidade dinâmica do fluido de trabalho no estado vapor [Pa.s] e l_{eff} é o comprimento efetivo do tubo de calor [m], que é relacionado com os comprimentos do evaporador (l_{evap}), condensador (l_{cond}) e seção adiabática (l_{adiab}) pela Eq. (4).

$$l_{eff} = l_{adiab} + \frac{(l_{evap} + l_{cond})}{2}. \quad (4)$$

2.4. Limite Sônico

O limite sônico, Eq. (5), está relacionado com a velocidade de vapor na região final ao evaporador. Ao ultrapassar a velocidade do som, este limite é atingido. Considerando diferentes estruturas capilares, o limite sônico possui relação com a área de vapor, calculada a partir do diâmetro de vapor (Faghri, 2014).

$$q_{sônico} = 0,474 h_{lv} A_v (\rho_v p_v)^{1/2}, \quad (5)$$

sendo que, p_v é pressão de vapor do fluido de trabalho [Pa].

2.5. Limite de Ebulição

O limite de ebulição, Eq. (6), é atingido quando bolhas de vapor se formam na estrutura capilar, acarretando na geração de pontos muito quentes ao longo da estrutura, levando até mesmo a secagem do evaporador. Para o cálculo do limite de ebulição, as variáveis que se distinguem com o uso de diferentes estruturas capilares é a altura capilar do fluido, diretamente influenciada pelo raio de vapor (Reay *et al.*, 2014).

$$q_{ebulição} = \frac{2\pi l_{evap} k_{eff} T_v}{h_{lv} \rho_v \ln(r_{int}/r_v)} \left(\frac{2\sigma_l}{r_n} - \Delta p_{c,máx} \right) \quad (6)$$

sendo que, T_v é a temperatura do vapor [K], r_{int} é o raio interno do tubo de calor [m], r_n é o raio das bolhas de vapor, que varia de $2,54 \cdot 10^{-7}$ a $2,54 \cdot 10^{-5}$ [m] e k_{eff} é a condutividade térmica efetiva [W/m^2K] definida na Tab. 4 considerando a teoria de Chi (1976).

Tabela 4. Condutividade térmica efetiva, k_{eff} , para diferentes estruturas capilares.

Tipo de Estrutura Capilar	k_{eff}
Pó metálico sinterizado	$\frac{k_l [(2k_l + k_{ec}) - 2(1 - \varepsilon)(k_l - k_{ec})]}{[2k_l + k_{ec} + (1 - \varepsilon)(k_l - k_{ec})]}$
Ranhuras axiais semicirculares*	$0,8925 \frac{(w_f k_l k_{ec} \delta) + w k_l (0,185 w_f k_{ec} + \delta k_l)}{(w + w_f)(0,185 w_f k_{ec} + \delta k_l)}$
Tela metálica	$\frac{k_l [(k_l + k_{ec}) - (1 - \varepsilon)(k_l - k_{ec})]}{[(k_l + k_{ec}) + (1 - \varepsilon)(k_l - k_{ec})]}$

* adaptado em Nishida (2016).

Na Tabela 4, k_l é a condutividade térmica do líquido [$W/m.K$], k_{ec} é condutividade térmica da estrutura capilar [$W/m.K$], ε representa a porosidade do meio, w_f é espessura da crista da ranhura [m], w é largura da ranhura [m], δ é profundidade da ranhura [m].

3. RESULTADOS & DISCUSSÃO

Para o cálculo dos limites operacionais, o software *Engineering Equation Solver™* (EES™) foi utilizado. Uma rotina de cálculo foi construída, baseada nas equações apresentadas na literatura para os limites operacionais, sendo o limite capilar o mais crítico, independentemente do tipo de estrutura capilar utilizada. Os tubos de calor objetos de estudo possuem paredes de cobre, com um diâmetro interno de 7,75 mm, um diâmetro externo de 9,45 mm e um comprimento total de 200 mm. O comprimento dos tubos de calor são divididos em 80 mm de evaporador, 20 mm de seção adiabática e 100 mm de condensador. Os tubos de calor são estudados na posição horizontal. As estruturas capilares analisadas e suas características são apresentadas na Tab. 5.

Tabela 5. Estruturas capilares utilizadas no estudo.

Estrutura Capilar	Características
Pó metálico sinterizado (Krambeck <i>et al.</i> , 2018)	- Pó metálico de cobre sinterizado - Diâmetro médio das esferas 20 μm
Ranhuras axiais semicirculares (Nishida, 2016)	- Ranhuras confeccionadas por eletroerosão a fio - Profundidade das ranhuras 3 μm - Largura das ranhuras 3,5 μm
Tela metálica (Krambeck, 2016)	- 1 camada de malha - Mesh #100 - Crimping fator de 1,05

3.1. Limite Capilar

O limite capilar é, na maioria das vezes, o limite utilizado como máximo em condições de projeto, ele resulta em ordens de grandeza consideravelmente inferiores em comparação aos outros limites, portanto é sempre analisado com mais cuidado. Para os casos estudados, o tubo de calor utilizando estrutura capilar contendo ranhuras axiais semicirculares apresenta pior desempenho, o tubo de calor com tela um desempenho intermediário e o tubo de calor contendo pó sinterizado apresenta o melhor desempenho para um intervalo de temperatura de operação entre 0 e 250°C, como pode ser observado na Fig. 2.

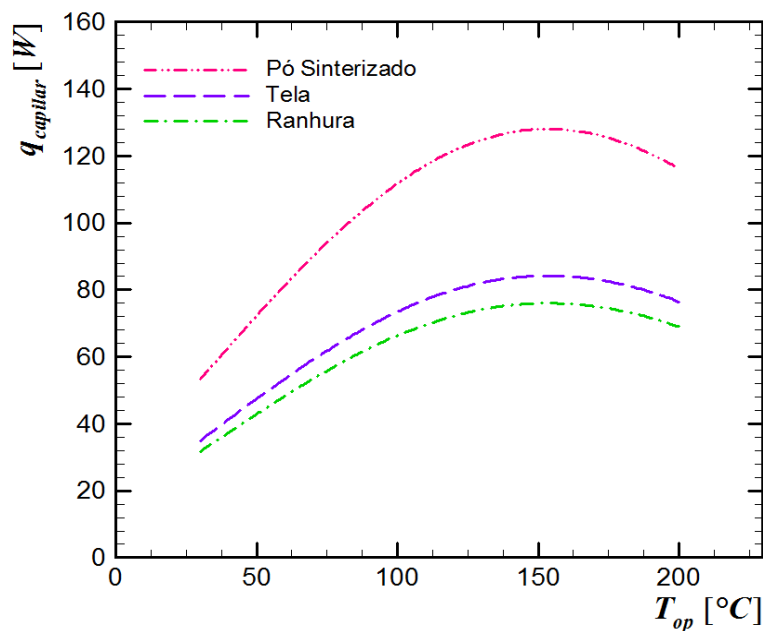


Figura 2. Limite capilar.

O limite capilar para os meios contendo ranhuras e tela, apresentam valores semelhantes, enquanto a potência dissipada considerando tubos com de pó metálico sinterizado, com temperatura de operação de 200°C pode chegar até 120 W, o dobro do valor suportado pelo tubo com telas metálicas.

3.2. Limite de Arrasto

Considerando o limite de arrasto, apresentado na Fig. 3, é possível observar o aumento dos limites com o uso de tubos ranhurados, em contrapartida, a utilização de estruturas capilares de tela ou pó metálico, com temperatura de operação de 200°C reduzem o desempenho em 48%.

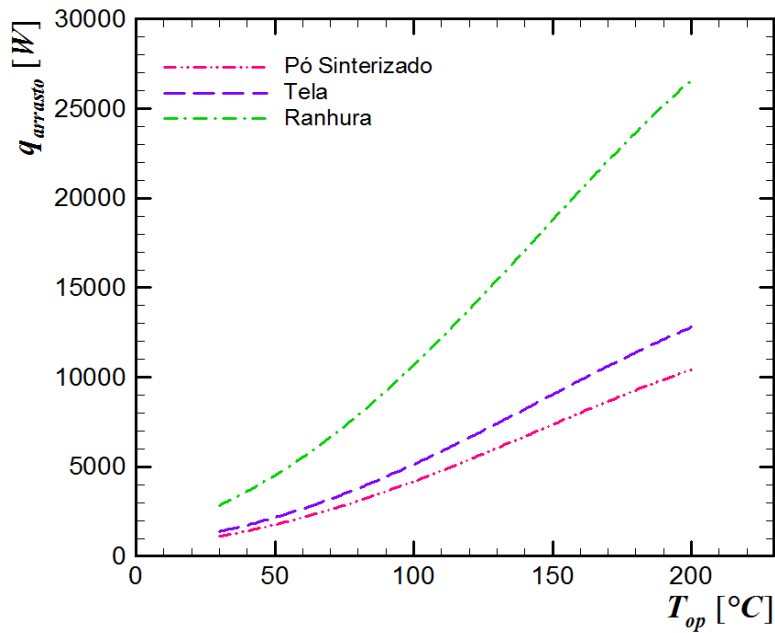


Figura 3. Limite de arrasto.

3.3. Limite Viscoso

Para o limite viscoso, os valores limitantes são da ordem de 10^3 até 10^8 . O uso das estruturas capilares de ranhura axial apresentou melhor desempenho para este limite, como é possível observar na Fig. 4.

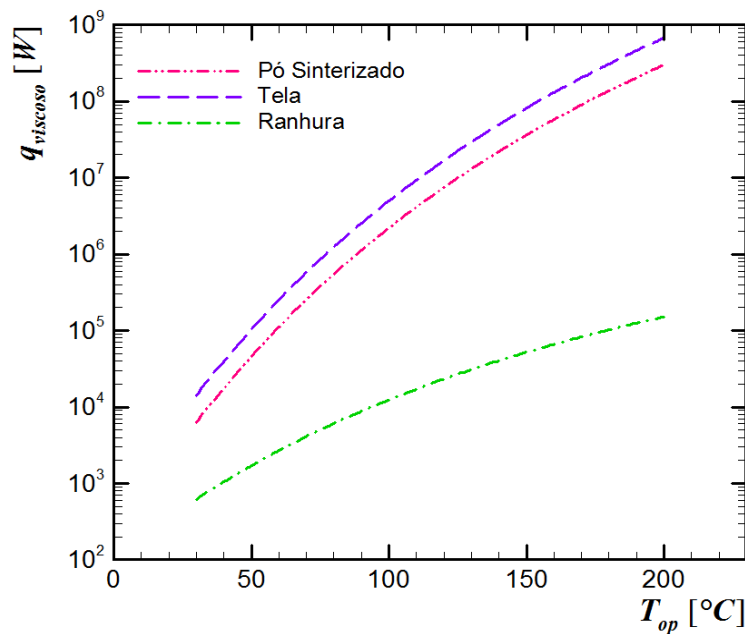


Figura 4. Limite viscoso.

3.4. Limite Sônico

Conforme apresentado na Fig. 5, até atingir o limite sônico, é possível operar em potências elevadas. Diretamente ligado com a ultrapassagem da velocidade do som, por meio da velocidade do vapor no interior do evaporador do tubo de calor, a utilização dos três tipos de meios porosos avaliados apresentam comportamentos semelhantes, sendo o tubo de calor sinterizado o que possibilita a utilização em potências menores, embora essas potências apresentem valores bem altos da ordem de 10^5 .

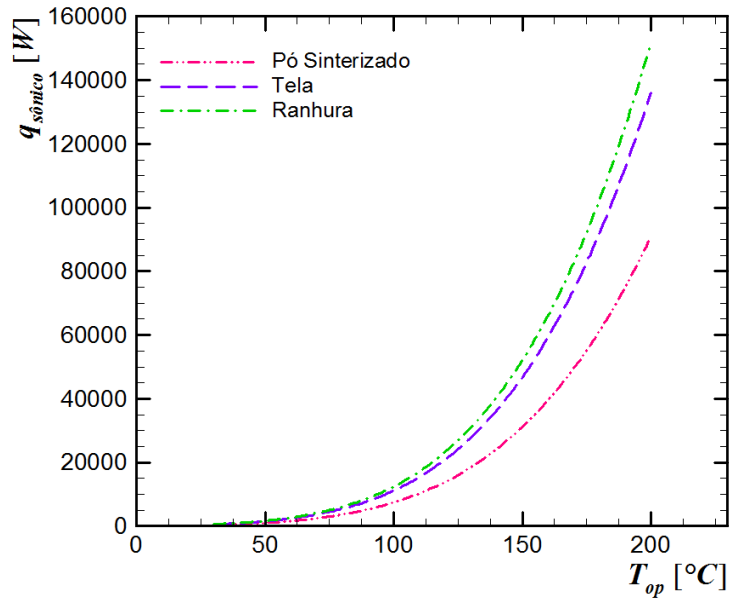


Figura 5. Limite sônico.

3.5. Limite de Ebulição

O limite de ebulição resulta nos mais elevados valores de dissipação de potência, que na prática não são atingidos devido aos limites operacionais dos equipamentos/sistemas envolvidos e não necessariamente do tubo de calor. Conforme apresentado na Fig. 6, a utilização de ambos as estruturas capilares apresenta características semelhantes na ordem de 10^{21} .

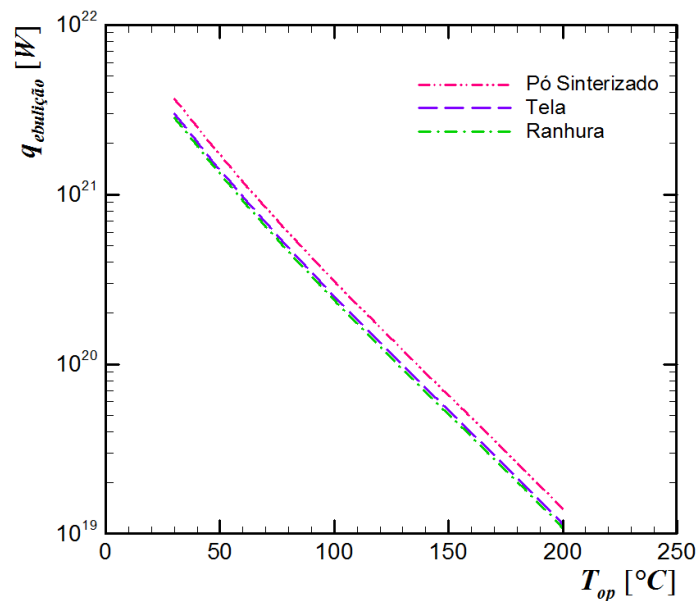


Figura 6. Limite de ebulição.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisados teoricamente os principais limites operacionais de tubos de calor com as mesmas dimensões e geometrias, distintos entre si apenas pelas estruturas capilares. As estruturas capilares consideradas são pó metálico sinterizado, tela metálica com *mesh* #100 e ranhuras axiais semicirculares fabricadas a partir do processo de eletroerosão a fio. Estas diferentes estruturas capilares são utilizadas em tubos de calor, visando dissipar maiores potências e devido a limitação dos recursos disponíveis no momento da construção do dispositivo passivo de transferência de calor. Variáveis importantes que diferenciam as estruturas capilares são, principalmente, a área de vapor, calculada a partir do diâmetro de vapor, o raio capilar efetivo e a porosidade do meio. Para o caso do pó metálico, a alteração no diâmetro dos grãos pode melhorar os limites operacionais. Na utilização das telas metálicas, a

distância entre os fios da malha bem como o diâmetro do fio, ou seja o *mesh* da malha, são parâmetros que alteram os limites. Além disso, a geometria das ranhuras, quantidade e distância entre elas são os parâmetros alterados para obtenção de melhores limites operacionais. O limite mais importante e restrito no projeto de um tubo de calor é o limite capilar. Considerando os três tipos de estruturas capilares utilizadas, o qual apresenta o melhor desempenho e maior faixa de aplicação de potência é a estrutura capilar com pó metálico sinterizado, pois chega a operar em até 128 W com 150°C, sem atingir o limite capilar. Porém, para os demais limites operacionais, o pó metálico apresenta um desempenho inferior as outras estruturas capilares.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsas de mestrado às acadêmicas *Vivian Machado* e *Larissa Krambeck*, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste projeto de desenvolvimento tecnológico e de inovação. Agradecimentos também são externados à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPPG) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação (DIRPPG), ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR/Câmpus Ponta Grossa.

6. REFERÊNCIAS

- Aguiar, V.M., Bartmeyer, G.A., Krambeck, L., Santos, P.H.D., Antonini Alves, T., 2018, “Thermal Analysis of a Finned Thermosyphon for Heat Exchanger Applications”, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 18-21.
- Chi, S.W., 1976, “Heat Pipe Theory and Practice: A Sourcebook. Washington”, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, D.C., USA. 272 p.
- Faghri, A., 2014, “Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges”, *Frontiers in Heat Pipes*, Vol. 5, No. 1, pp. 01-48.
- Groll, M., Rösler, S., 1992, “Operation Principles and Performance of Heat Pipes and Closed Two-Phase Thermosyphons”, *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, Vol. 17, pp. 091-151.
- Jiang, L., Ling, J., Jiang, L., Tang, Y., Li, Y., Zhou, W., Gao, J., 2014, “Thermal Performance of a Novel Porous Crack Composite Wick Heat Pipe”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 81, pp. 10-18.
- Krambeck, L., 2016, “Investigação experimental do desempenho térmico de telas metálicas em tubos de calor”, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa/PR, Brasil.
- Krambeck, L., Bartmeyer, G.A., Fusão, D., Santos, P.H.D., Antonini Alves, T., 2018, “Desempenho Térmico de um Tubo de Calor Utilizando Pó de Cobre Sinterizado como Estrutura Capilar”, *Anais do X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2018)*, Salvador/BA, Brasil, CONEM2018-1074.
- Krambeck, L., Nishida, F.B., Aguiar, V.M., Santos, P.H.D., Antonini Alves, T., 2017, “Thermal Performance Evaluation of Different Passive Devices for Electronics Cooling”, *Thermal Science*, OnLine-First Issue 00, pp. 300.
- Mantelli, M.B.H., 2009, *Tubos de Calor e Termossifões*, Notas de Aula, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brasil.
- Nishida, F.B., 2016, “Desenvolvimento de tubos de calor com microranhuras fabricadas por eletroerosão a fio”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa/PR, Brasil.
- Peterson, G.P., 1994, “An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Applications”, (Thermal Management of Microelectronic and Electronic System Series), Wiley-Interscience, New York, USA, 368 p.
- Reay, D. A., Kew, P. A., Mcglen, R. J., 2014, “Theory, Design and Applications”, Elsevier, Waltham, MA, USA, 251p.
- Shabany, Y., 2010, “Heat Transfer: Thermal Management of Electronics”, CRC Press, Boca Raton, USA, 523p.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

THEORETICAL ANALYSIS OF THE OPERATIONAL LIMITS OF HEAT PIPES WITH DIFFERENT CAPILLARY STRUCTURES

Vivian Machado, vivian_machadoo@yahoo.com.br

Larissa Krambeck, larikrambeck@hotmail.com

Felipe Baptista Nishida, felipenishida@hotmail.com

Paulo Henrique Dias dos Santos, psantos@utfpr.edu.br

Thiago Antonini Alves, thiagooalves@utfpr.edu.br

Federal University of Technology – Paraná/UTFPR, Câmpus Ponta Grossa, Ponta Grossa/PR, Brazil

Abstract. *This work presents a theoretical analysis of the operational limits of heat pipes containing different capillary structures, being: sintered metal powder, metal screen mesh, and semicircular axial grooves. In order to perform the calculations, the Engineering Equation Solver™ (EES™) software was used, which presents a complete library with thermophysical properties of the materials and working fluids used. The heat pipe under study has copper walls, internal diameters of 7.75 mm and external of 9.45 mm and the total length of 200 mm. The length of the heat pipes is divided into 80 mm of the evaporator, 20 mm of the adiabatic section and 100 mm of the condenser. The heat pipes are studied in the horizontal position. The considered working fluid is water. The operating limits studied are drag limit, boiling limit, capillary limit, sonic limit, and viscous limit. For the capillary limit, considered the most restrictive in the heat pipe design, the capillary structure that presents the best performance is the structure composed of sintered metal powder.*

Keywords: *heat pipes, operational limits, theoretical analysis, capillary structure.*