

Correlação para Resistência Térmica da Seção Adiabática na Posição Assistida pela Gravidade(+90°) em Tubos de Calor Pulsantes Poliméricos-EVR2021-0004

Sabrina dos Santos Ferreira^{1,*}, Fernando Neves Q. dos Santos¹, Fernando Seiti Misina¹, Cristiano Bigonha Tibiriçá¹

¹Universidade São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, Heat Transfer Research Group, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, 13566-590

*Sabrina dos Santos Ferreira, sabrinausp2019@gmail.com

Resumo

O objetivo deste estudo foi apresentar uma correlação para a resistência térmica da seção adiabática em tubos de calor pulsante na posição vertical assistida pela gravidade(+90°), baseado no número de Kutateladze, Ku . Os dados experimentais foram obtidos com tubos poliméricos com 40 e 80 voltas na seção adiabática, diâmetro interno de 1,6 mm, R134a como fluido de trabalho com fração de enchimento igual a 60%. Para tanto, foi montada uma bancada experimental que permitiu a variação dos diversos parâmetros operacionais. Observou-se que o erro absoluto médio entre os valores obtidos experimentalmente e os valores obtidos via correlação proposta, variaram na faixa de 8,5 % a 18 %. A correlação proposta ajustou-se bem aos dados experimentais, obtendo erro médio absoluto de 13% considerando o banco de dados completo.

Palavras-chave: Correlação, Resistência térmica, Vertical assistida pela gravidade(+90°), Tubos de calor pulsantes poliméricos

Introdução

Segundo Ferreira (2020) os tubos de calor pulsantes são dispositivos promissores no que diz respeito ao gerenciamento térmico de componentes miniaturizados. De acordo com Der et al. (2018) utiliza-se tubos poliméricos devido ao seu baixo custo, alta flexibilidade, o peso reduzido sendo vantajoso para aplicações espaciais e em aeronaves.

O primeiro tubo de calor pulsante foi proposto por Aka-chi (1990), o mecanismo de transferência de calor é baseado no movimento oscilatório das bolhas de vapor e dos pistões de líquido. A Fig. 1 apresenta uma estrutura típica de um tubo de calor pulsante.

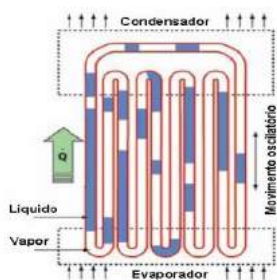


Figura 1: Tubo de calor pulsante, Charoensawan et al. (p. 2011, 2003)

De acordo com Khandekar et al. (2003) para se determinar correlações para a transferência de calor com ampla faixa de aplicabilidade, é conveniente utilizar-se números adimensionais, que dependem das propriedades físicas do fluido de trabalho, da fração de enchimento, do diâmetro interno do tubo, do número de voltas na seção adiabática, do comprimento do evaporador e do condensador e do ângulo de inclinação do tubo.

O objetivo desse estudo é apresentar uma nova correlação para a resistência térmica da seção adiabática em tubos de calor pulsantes na posição vertical assistida pela gravidade(+90°), baseado no número de Kutateladze, Ku .

Revisão Bibliográfica

O número de Kutateladze, Ku , definido de acordo com a Eq. (1) é um adimensional utilizado na determinação da performance de tubos de calor pulsantes.

$$Ku = \frac{q}{h_{lv} \cdot \rho_v^{0.5} \left[\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_v) \right]^{0.25}} \quad (1)$$

onde, q , é o fluxo de calor.

Utilizando tubos de cobre de diâmetros interno iguais a 0,66 mm, 1,06 mm e 2,03 mm, com etanol, água e R123 e fração de enchimento igual a 50%, Katpradit et al. (2005) e Kammuang-Lue et al. (2009) propuseram correlações para posição vertical assistida pela gravidade(+90°) com erro médio absoluto igual a $\pm 31\%$ e $\pm 24\%$, respectivamente.

Shafii et al. (2010) utilizaram tubo de cobre com diâmetro interno igual 1,8 mm e externo igual a 3,0 mm, com etanol, água e R123 e, frações de enchimento iguais a 30%, 40%, 50%, 70% e 80%, propuseram uma correlação para previsão da transferência de calor apresentada com erro médio absoluto aproximadamente igual a 88,6%.

A correlação no trabalho de Sakulchangsattajai et al. (2016) apresentou erro médio absoluto igual a $\pm 37\%$. Os dados experimentais foram obtidos com tubo de cobre de diâmetros internos igual a 1,5 mm, 1,78mm e 2,16 mm, R123, R141b, acetona e etanol, com fração de enchimento igual a 50%.

Descrição Experimental

A bancada experimental apresentada na Fig. 2 é constituída pelo reservatório do evaporador contendo água, $m_{a,e} = 3$ kg, aquecida por uma resistência elétrica até a temperatura de 60°C, uma bomba com vazão de 180 l/h e potência igual a 4 W foi instalada com objetivo de realizar a mistura da água evitando a estratificação do perfil de temperatura, para aquisição dos valores da temperaturas da

água foi utilizado o termopar, $T_{a,e}$. No reservatório do condensador há uma mistura de água e gelo fundido a 0°C . Na seção adiabática para aquisição dos valores das temperaturas de entrada e saída do evaporador e do condensador foram utilizados os termopares, T_1 , T_2 , T_3 e T_4 , a distância, L entre o evaporador e o condensador é igual a 0.25 m. O tubo de calor polimérico (PA6 - Nylon 6) testado foi instalado na bancada, fazendo-se a ligação térmica entre o reservatório do evaporador e do condensador.

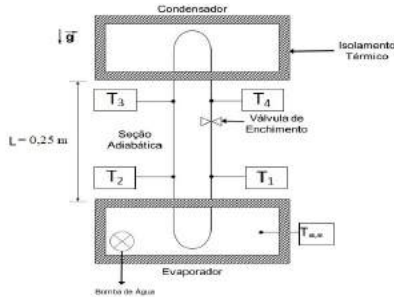


Figura 2: Desenho esquemático da bancada experimental na posição vertical assistida pela gravidade ($+90^\circ$).

O procedimento para obtenção dos dados experimentais é realizado via método transiente, baseado na variação da temperatura da água no reservatório do evaporador ao longo do tempo. Os valores das temperaturas de entrada e saída do condensador e do evaporador obtidas pelos termopares, T_1 , T_2 , T_3 e T_4 instalados na seção adiabática são registradas, assim como o tempo, $\Delta t_{\Delta T_{a,e}}$, necessário para variação $\Delta T_{a,e} = 2^\circ\text{C}$ da temperatura da água no reservatório do evaporador. A maior temperatura obtida pelos termopares T_1 , T_2 , T_3 e T_4 é definida como sendo a temperatura do evaporador, T_e , e a menor temperatura é definida como sendo a temperatura do condensador, T_c , valores esses utilizados para o cálculo da resistência térmica na região adiabática, R_{lvTCP} , apresentada na Eq. (6).

Nesse estudo utilizou-se um tubo de calor polimérico (PA6 - Nylon 6), com diâmetro interno igual a 1,6 mm e diâmetro externo igual a 3,2 mm, com 40 e 80 voltas na seção adiabática, R134a como fluido de trabalho e fração de enchimento igual a 60%. A Fig. 3 representa a foto do experimento.

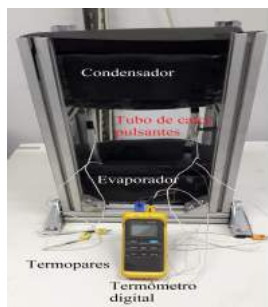


Figura 3: Foto do experimento na posição vertical assistida pela gravidade ($+90^\circ$).

Procedimento de Redução de Dados

O balanço de energia na água do reservatório do evaporador é apresentada na Fig. 4.

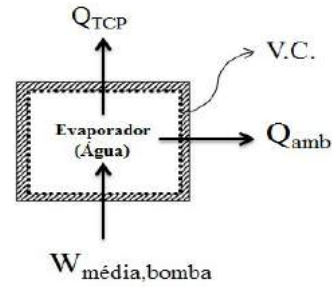


Figura 4: Balanço de energia no reservatório do evaporador.

A partir da 1ª lei da termodinâmica, Eq. (2) a taxa de calor transferida pelo tubo de calor pulsante, Q_{TCP} , pode ser determinada, Eq. (3).

$$Q - W = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{a,e} \quad (2)$$

$$Q_{TCP} = m_{a,e} \cdot c_{p,a} \left(\Delta T_{a,e} / \Delta t \right) + W_{média, bomba} - Q_{amb} \quad (3)$$

onde, $(dE/dt)_{a,e}$ é a taxa de variação de energia interna que ocorre na água do reservatório do evaporador e Q_{amb} é apresentada na Eq. (4) e $W_{média, bomba}$, é apresentado na Eq. (5).

$$Q_{amb} = (T_{a,e} - T_\infty) / R_\infty \quad (4)$$

onde, $R_\infty = 2,245^\circ\text{C/W}$, é a resistência térmica média entre a água no reservatório do evaporador e o ambiente externo, esse valor foi obtido para temperatura ambiente próxima de 25°C .

$$W_{média, bomba} = \frac{W_{bomba} \cdot \Delta t_{bomba, ligada}}{\Delta t_{\Delta T_{a,e} = 2^\circ\text{C}}} \quad (5)$$

adotando-se $W_{bomba} = 4 \text{ W}$ e $\Delta t_{bomba, ligada} = 45 \text{ s}$.

Resistência Térmica na Seção Adiabática

A resistência térmica da região adiabática de tubo de calor pulsante, R_{lvTCP} , é definida de acordo com a Eq. (6).

$$R_{lvTCP} = \frac{T_e - T_c}{Q_{TCP}} \quad (6)$$

onde, T_e , é a temperatura do evaporador e T_c é a temperatura do condensador e a potência de entrada, Q_{TCP} , é definido de acordo com a Eq. (3).

Correlação para Resistência Térmica da Seção Adiabática na Posição Assistida pela Gravidade ($+90^\circ$)

Utilizando um banco de dados com 56 pontos experimentais, foi proposto uma nova correlação, $Ku_{+90^\circ, nova}$, na posição vertical assistida pela gravidade ($+90^\circ$), baseado na análise adimensional. A nova correlação apresenta a seguinte forma, Eq. (7),

$$Ku_{+90^\circ} = a \left(D_i / L_e \right)^b \left(L_t / L_e \right)^c N^d \left(\rho_v / \rho_l \right)^e F R^f J a^g P r^h B d^i \quad (7)$$

O número de Jakob, Ja , é definido de acordo com a Eq. (8),

$$Ja = \frac{c_p \cdot \Delta T}{h_{lv}} \quad (8)$$

O número de Prandtl do líquido, Pr_l , é definido de acordo com a Eq. (9),

$$Pr_l = \left(\frac{\mu \cdot c_p}{k} \right)_l \quad (9)$$

O número de Bond, Bd , pode ser definido de acordo com a Eq. (10),

$$Bd = \frac{g \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot D_i^2}{\sigma} \quad (10)$$

Para o cálculo dos adimensionais, Eq. (8), Eq. (9) e Eq. (10), os valores das propriedades físicas do fluido de trabalho, foram obtidas a partir da temperatura de operação, T_{op} , Eq. (11), calculados no EES (*Engineering Equation Solver*).

$$T_{op} = (T_e + T_c) / 2 \quad (11)$$

onde T_e e T_c são as temperaturas de saída do evaporador e do condensador, respectivamente. Os coeficientes e expoentes da correlação para a posição vertical assistida pela gravidade(+90°), Eq. (12), foram obtidos utilizando regressão de dados no Matlab.

$$Ku_{+90^\circ} = 200,2257 \left(D_i / L_e \right)^{-0,5528} \left(L_t / L_e \right)^{7,9831} N^{1,3302} \left(\rho_v / \rho_l \right)^{-0,2931} FR^{-21,6664} Ja^{3,6481} Pr^{-31,3558} Bd^{3,1690} \quad (12)$$

A correlação para a resistência térmica da seção adiabática em tubos de calor pulsante na posição vertical assistida pela gravidade(+90°) é apresentada na Eq. (13).

$$R_{lvTCP,cor} = \frac{(T_e - T_c)}{N \cdot (\pi \cdot D_i \cdot L_e) \cdot h_{lv} \cdot \rho_v^{0,5} \cdot Ku_{+90^\circ} \cdot \left[\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_v) \right]^{0,25}} \quad (13)$$

onde, N , é o número de voltas da seção adiabática e L_e é o comprimento do evaporador, nesse estudo apresenta valor igual a 0,25 m. A Tab. 1 apresenta a faixa de valores dos adimensionais usados para gerar a correlação na posição vertical assistida pela gravidade(+90°), apresentada na Eq. (12).

Tabela 1: Faixa de valores dos adimensionais.

Adimensional	Faixa de valores
D_i / L_e	0,00008 - 0,0064
L_t / L_e	4
N	1 - 80
FR	0,6
Ja	0,1 - 0,2
Pr	3,153 - 3,276
Bd	2,036 - 2,74

O erro médio absoluto, ϵ , é definido de acordo com a Eq. (14),

$$\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Ku_{exp} - Ku_{+90^\circ}|}{|Ku_{+90^\circ}|} \quad (14)$$

Resultados

A Fig. 5 apresenta a comparação entre o número de Kutateladze com os dados experimentais, Ku_{exp} , Eq. (1) e o número de Kutateladze, Ku_{+90° , baseado na correlação, Eq. (12). O erro médio absoluto foi igual a 29,0% e $\lambda_{30\%} = 62,5\%$. Os dados com maior erro fora da região de $\pm 30\%$ são os dados de baixa potência que são associados com maiores incertezas experimentais.

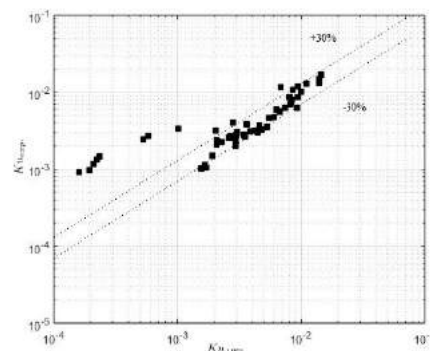


Figura 5: Comparação entre o Kutateladze experimental, Ku_{exp} , e o número de Kutateladze, Ku_{+90° , baseado na correlação Eq. (12), na posição vertical assistida pela gravidade(+90°).

A Fig. 6 apresenta os resultados da resistência térmica com 40 voltas na seção adiabática utilizando R134a com fração de enchimento igual a 60%, o erro absoluto obtido, Eq. 14, foi igual a 19%.

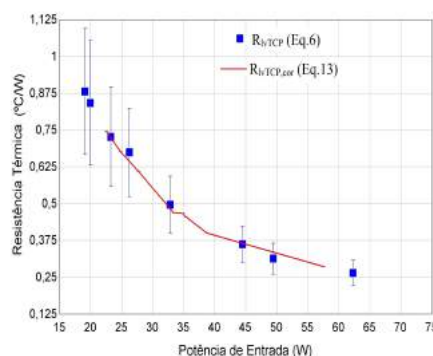


Figura 6 : Comparação das resistências térmicas com 40 voltas na seção adiabática.

A Fig. 7 apresenta os resultados da resistência térmica com 80 voltas na seção adiabática, o erro absoluto, Eq. 14, foi igual a 10%.

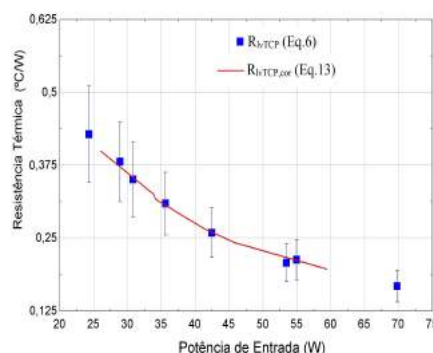


Figura 7: Comparação das resistências térmicas com 80 voltas na seção adiabática.

Os valores experimentais obtidos para a resistência térmica na região adiabática, R_{lvTCP} , Eq. (6) foram comparados com as correlações da literatura apresentadas nesse trabalho e com a correlação proposta, Eq. (13), os resultados são apresentados nas Fig. 8 e Fig. 9.

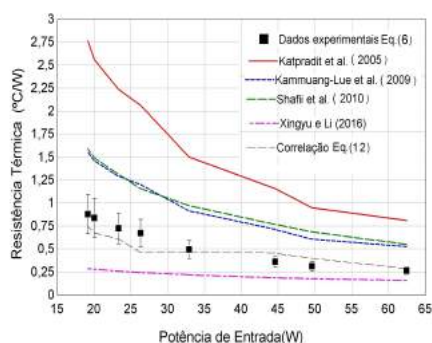


Figura 8: Comparação entre as resistências térmicas para o caso com 40 volts na seção adiabática.

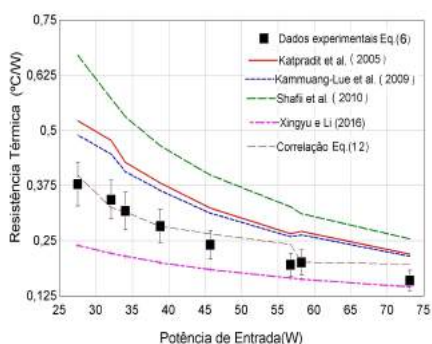


Figura 9: Comparação entre as resistências térmicas para o caso com 80 volts na seção adiabática.

A Tab. 2 apresenta os valores do erro médio absoluto, ϵ , Eq. (14), entre os valores experimentais obtidos para a resistência térmica na região adiabática, R_{lvTCP} , Eq. (6), as correlações da literatura apresentadas nesse trabalho e a correlação proposta, $R_{lvTCP,cor}$, Eq. (13).

Tabela 2: Valores do erro médio absoluto ϵ para os casos estudados.

Nº de vol- tas (N)	Correlações da literatura	Erro médio absoluto (ϵ)
40	Katpradit et al.(2005)	200%
	Kammuang-Lee(2009)	85%
	Shafii et al.(2010)	93%
	Xingyu e Li(2016)	56%
	Correlação Proposta, Eq.(13)	18%
80	Katpradit et al.(2005)	36%
	Kammuang-Lee(2009)	30%
	Shafii et al.(2010)	65%
	Xingyu e Li (2016)	25%
	Correlação Proposta, Eq.(13)	8,5%

Como pode-se observar na Tab. 2 a correlação proposta por Katpradit et al.(2005) apresentou erro na faixa de 36% a 200%, em Kammuang-Lee(2009) a faixa foi de 30% a 85%, em Shafii et al.(2010) a faixa foi igual a 65% a 93% e em Xingyu e Li (2016) na faixa de 25% a 56%. A correlação proposta neste trabalho, $R_{lvTCP,cor}$, Eq. (13), apresentou erro médio absoluto, na faixa de 8,5% a 18%.

Conclusões

Pode-se concluir que a correlação proposta, Eq. (13), ajustou-se bem aos dados experimentais, obtendo-se erro médio absoluto, Eq. (14), igual a 13% considerando-se o banco de dados completo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro.

Referências

- Akachi, H., 1990. Structure of a heat pipe. USA4921041 a, 15 June 1988, 1 May 1990.
- Charoensawan, P., Khandekar S., Groll, M. and Terdtoon P., 2003. Closed Loop Pulsating Heat Pipes – Part A: Parametric Experimental Investigations. Applied Thermal Engineering, Vol. 23, n. 16, p. 2009 - 2020.
- Der, O., Marengo, M., Bertola, V., 2018. Thermal performance of pulsating heat stripes (PHS) built with plastic materials. 19th IHPC and 13th IHPS.
- Ferreira, Sabrina dos Santos., 2020. Investigação Teórica-Experimental do Desempenho Térmico de Tubos de Calor Pulsantes Poliméricos. 2020. 241 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.
- Kammuang-Lue, N. et al. Investigation and prediction of optimum meandering turn number of vertical and horizontal closed-loop pulsating heat pipes. Thermal Science, v. 22, n. 1, pt. A, p. 273 - 284, 2018.
- Katpradit, T. et al. Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed end oscillating heat pipe at critical state. Applied Thermal Engineering, v. 25, p. 2138 – 2151, 2005.
- Khandekar, S. et al. Closed loop pulsating heat pipes part b: visualization and semi-empirical modeling. Applied Thermal Engineering, v. 23, n. 16, p. 2021–2033, 2003.
- Shafii, M. B. et al. Experimental investigation of pulsating heat pipes and a proposed correlation. Heat Transfer Engineering, v. 31, n. 10, p. 854 – 861, 2010.
- Xingyu, W.; LI, J. Experimental study on heat transfer performance of pulsating heat pipe with refrigerants. Journal of Thermal Science, v. 25, n. 5, p. 449 – 453, 2016.

Aviso de responsabilidade

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído neste documento.