



AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE PREVISÃO DA PERDA DE PRESSÃO DURANTE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS EM PRESSÕES PRÓXIMAS AO PONTO CRÍTICO TERMODINÂMICO

Daniel Borba Marchetto, Escola de Engenharia de São Carlos, daniel.marchetto@usp.br
Gherhardt Ribatski, Escola de Engenharia de São Carlos, ribatski@sc.usp.br

Resumo O presente trabalho apresenta comparações entre resultados experimentais de perda de pressão em escoamentos bifásicos extraídos da literatura, e valores calculados por meio de 21 métodos de previsão, a fim de investigar seus desempenhos em pressões próximas ao ponto crítico. A base de dados levantada é composta por 1486 resultados para escoamentos de 9 fluidos distintos no interior de canais com diâmetros entre 0,53 e 44 mm. Métodos baseados no modelo homogêneo apresentaram razoável precisão para $p_r > 0,2$, e o método empírico de Müller-Steinhagen e Heck (1986) apresentou o menor erro médio absoluto na comparação com o banco de dados completo igual a 27,3%.

Palavras-chave: Perda de pressão, Métodos de previsão, Ponto crítico, Pressão elevada, Temperatura elevada.

1. INTRODUÇÃO

A investigação da perda de pressão durante escoamentos bifásicos é um tema recorrente na literatura, com uma série de estudos experimentais publicados ao longo dos últimos anos, o que resultou no desenvolvimento de uma quantidade significativa de métodos para sua previsão. A maior parcela destes métodos baseou-se em resultados obtidos em temperaturas de saturação (T_{sat}) reduzidas, típicas de aplicações de refrigeração e ar-condicionado. Apesar destas aplicações ainda motivarem diversos estudos, atualmente verifica-se o crescente interesse na investigação de escoamentos bifásicos em condições típicas de aplicação em evaporadores de ciclos Rankine Orgânicos (CROs).

Os ciclos Rankine orgânicos possuem configuração semelhante ao ciclo Rankine tradicional a vapor d'água, porém, utilizam fluidos de trabalho orgânicos, os quais possuem temperaturas e pressões críticas (T_{crit} e p_{crit}) significativamente inferiores. Esta característica permite o uso de calor remanescente de processos e proveniente de fontes de calor com reduzido potencial de degradação ambiental, tais como: solar, geotérmica e biomassa (Zhang *et al.*, 2018). Segundo Zhang *et al.* (2018), estas fontes de calor, em geral, operam com temperaturas entre 100 e 250°C, o que resulta em temperaturas de evaporação de 50 a 150°C, valores significativamente superiores aos de aplicações de refrigeração. Com o incremento da temperatura e, conseqüentemente, da pressão de saturação (p_{sat}), as densidades das fases líquido e vapor se aproximam, e a tensão superficial é reduzida. Isto afeta significativamente as características termohidráulicas do escoamento e, conseqüentemente, a perda de pressão.

Dado o crescente interesse no uso de CROs para geração de energia, é fundamental avaliar se os métodos de previsão propostos para pressões e temperaturas reduzidas são adequados para valores elevados de T_{sat} e p_{sat} (Charnay *et al.*, 2015a). Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo comparar resultados experimentais de perda de pressão da literatura obtidos em elevadas p_{sat} , com valores calculados segundo métodos de previsão, e caracterizar como o incremento da pressão de saturação afeta a precisão destes métodos.

2. MATERIAIS E METODOS

Conforme mencionado anteriormente, a temperatura de evaporação em CROs varia entre 50 e 150°C, o que para a maior parcela dos refrigerantes orgânicos corresponde a pressões reduzidas ($p_r = p_{sat}/p_{crit}$) superiores a 0,5. Sendo assim, foram levantados a partir da literatura, estudos experimentais que apresentassem resultados de perda de pressão devido ao atrito obtidos em $p_r \geq 0,5$. O banco de dados é composto por 1486 resultados, sendo 1351 deles referentes a escoamentos adiabáticos, extraídos de 13 estudos (Zhang e Webb, 2001; Adams *et al.*, 2003; Jeong *et al.*, 2005; Vassallo e Keller, 2006; Wang *et al.*, 2009; Mastrullo *et al.*, 2010; Ducoulombier *et al.*, 2011; Kim e Jeong, 2013; Liu *et al.*, 2013; Grauso *et al.*, 2014; Charnay *et al.*, 2015b; Lillo *et al.*, 2019; Hammer *et al.*, 2021), e 135 correspondentes a escoamentos com transferência de calor, obtidos a partir do estudo de Vijayarangan *et al.* (2007). O programa Engauge Digitizer versão 12.1 (Mitchell *et al.*, 2019) foi utilizado na digitalização de gráficos e extração dos respectivos dados apresentados nestes estudos.

Os resultados foram obtidos para o escoamento de nove fluidos distintos (água, amônia, CO₂, R134a, R22, R245fa, R404A, R410A e R448A) no interior de canais com diâmetros entre 0,53 e 44 mm. Optou-se por incluir também parcela de dados a pressões reduzidas inferiores a 0,5, com o objetivo de comparar a aplicação dos métodos de previsão



em ambos os intervalos, identificando possíveis perdas de precisão. A distribuição de dados para cada grupo de fluidos em função da pressão reduzida é apresentada na Fig. (1). Apesar do foco do presente estudo ser a avaliação de métodos de previsão para aplicação em projetos de evaporadores em CROs, dados para CO₂ e água em elevadas pressões foram incluídos no banco de dados, uma vez que, conforme verificado por Grauso *et al.* (2014), os gradientes de pressão para diferentes fluidos se aproximam quando avaliados na mesma p_r .

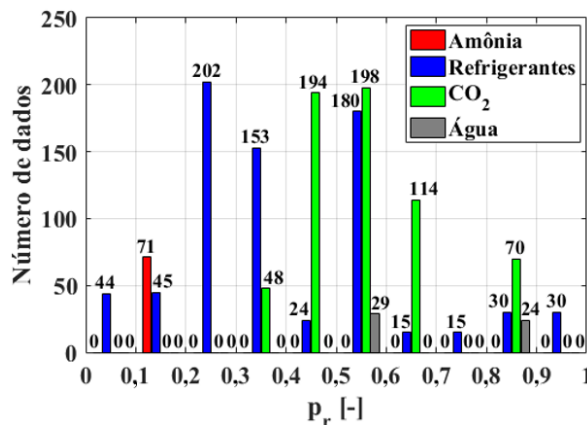


Figura 1. Distribuição de dados experimentais de perda de pressão em função da pressão reduzida.

3. RESULTADOS

Os resultados experimentais extraídos da literatura foram comparados com 21 métodos de previsão da perda de pressão devido ao atrito em escoamentos bifásicos, os quais são classificados da seguinte maneira: métodos baseados no modelo homogêneo, estritamente empíricos, e baseados em multiplicadores bifásicos. As propriedades termofísicas dos fluidos foram obtidas por meio do programa *CoolProp* (Bell *et al.*, 2014), exceto as do R448A, as quais foram extraídas do *Engineering Equation Solver* (Klein e Alvarado, 2002). É importante ressaltar que 192 resultados do banco de dados foram excluídos na comparação com o método de Ducoulombier *et al.* (2011) baseado no modelo homogêneo, pois apresentavam gradientes de pressão negativos. Isto está associado ao formato da correlação proposta por estes autores para o cálculo da viscosidade da mistura bifásica, a qual pode apresentar valores negativos para $p_r > 0,675$, conforme verificado a seguir:

$$\mu_{2\phi} = x \cdot \mu_v + [(1-x) \cdot \mu_l \cdot (6,195 - 9,178 \cdot p_r)] \quad (1)$$

onde x é o título de vapor e μ_l e μ_v são as viscosidades dinâmicas das fases líquido e vapor, respectivamente.

Entre os 8 métodos avaliados baseados no modelo homogêneo, sete deles foram capazes de prever os resultados experimentais do banco de dados com erros médios absolutos (EMAs) inferiores a 33%. A única exceção foi a correlação de Ducoulombier *et al.* (2011), para a qual o EMA foi de 57,2%, ainda que, considerando os 21 métodos avaliados, esta correlação apresente a maior parcela dos dados experimentais previstos com desvios entre $\pm 30\%$ ($\lambda_{30\%}$), 69,5%. O elevado valor de EMA verificado para este método está associado à sua limitação na previsão de dados em $p_r < 0,2$, evidente na Fig. (2a), que apresenta o efeito da pressão reduzida nos desvios médios absolutos obtidos por esta correlação.

Os desvios mais acentuados do método homogêneo de Ducoulombier *et al.* (2011) foram verificados para os dados de amônia e R245fa de Adams *et al.* (2003), obtidos em pressões reduzidas de 0,12 e 0,07, respectivamente. Em p_r reduzidas, os valores de $\mu_{2\phi}$ calculados segundo a Eq. (1) são significativamente elevados, ocasionando a superestimação dos resultados experimentais, conforme verificado na Fig. (3a). Em comparação, para p_r superiores, a viscosidade segundo a correlação de Ducoulombier *et al.* (2011) se aproxima dos valores calculados segundo Cicchitti *et al.* (1960), conforme verificado na Fig. (3b).

Os métodos de Cicchitti *et al.* (1960) e Awad e Muzychka (2008) v.1 também subestimaram significativamente os dados experimentais de Adams *et al.* (2003) para R245fa a $p_r = 0,07$, conforme verificado na Fig. (3a). Isto justifica os elevados EMAs para estas correlações em $p_r < 0,1$, apresentados nas Figs. (2b) e (2c), respectivamente. Já os valores previstos pelos métodos de McAdams *et al.* (1942), Dukler *et al.* (1964), Beattie e Whalley (1982), Lin (1991) e Awad e Muzychka (2008) v.2, apresentaram razoável proximidade em relação a estes dados experimentais, no entanto, o efeito de x em $\mu_{2\phi}$ não foi previsto corretamente (Fig. 3a).

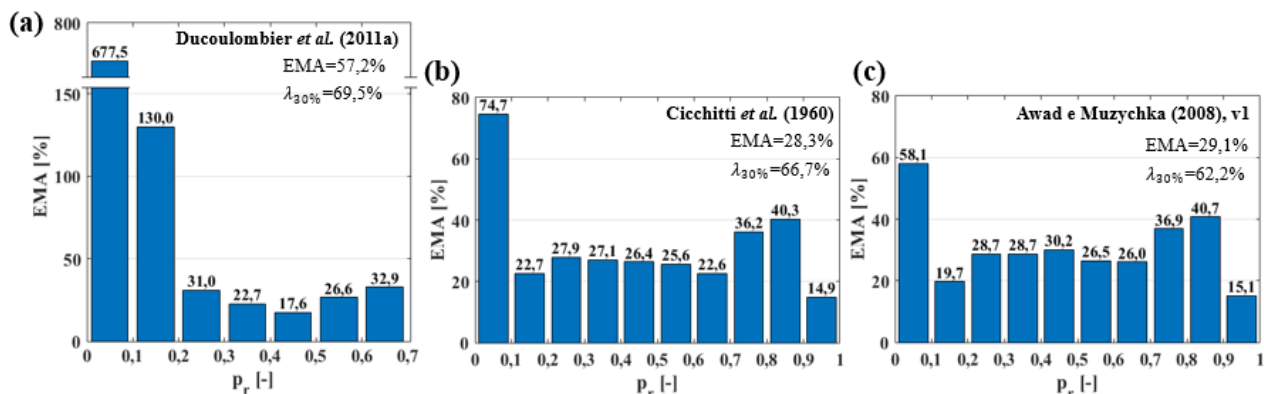


Figura 2: Efeito da pressão reduzida no erro médio absoluto associado às previsões por meio dos métodos baseados no modelo homogêneo de (a) Ducoulombier *et al.* (2011), (b) Cicchitti *et al.* (1960) e (c) Awad e Muzychka (2008), v1.

O efeito da pressão reduzida na precisão dos métodos baseados no modelo homogêneo foi menos significativo no intervalo de p_r entre 0,2 e 0,7, conforme verificado nas Figs. (2a), (2b) e (2c), para as correlações de Ducoulombier *et al.* (2011), Cicchitti *et al.* (1960) e Awad e Muzychka (2008) v.1, respectivamente. No entanto, foi verificada a perda de precisão destes métodos para $p_r=0,7-0,9$, sendo mais evidente no intervalo de pressões reduzidas entre 0,8-0,9, no qual estão contidos os 70 resultados experimentais para CO₂ extraídos do estudo de Hammer *et al.* (2021), os quais foram significativamente subestimados. É importante ressaltar que, entre os 21 métodos avaliados, somente os de Xu e Fang (2012) e Kim e Mudawar (2013) previram ao menos 50% dos resultados deste estudo com desvios inferiores a $\pm 30\%$. Curiosamente estes métodos foram propostos para microcanais, enquanto o diâmetro do tubo utilizado nos experimentos de Hammer *et al.* (2021) foi de 44 mm.

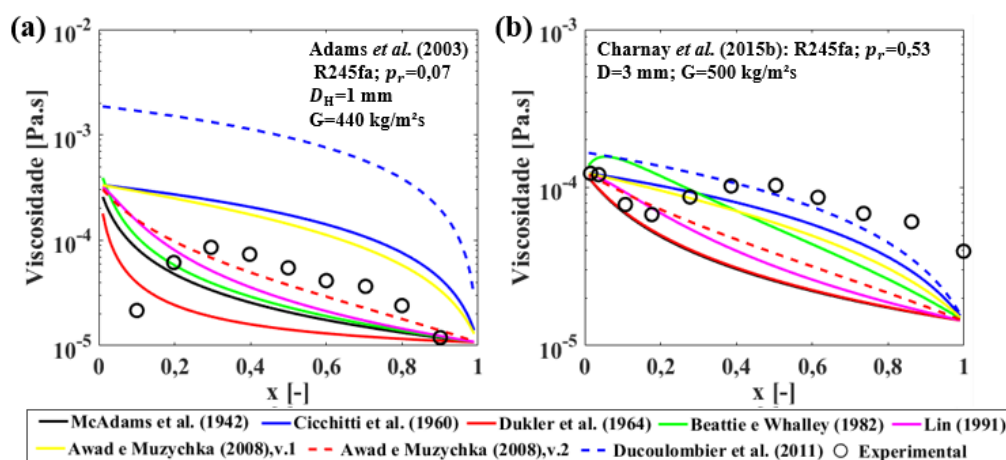


Figura 3: Comparação entre a viscosidade da mistura bifásica calculada segundo métodos homogêneos e os valores extraídos dos dados experimentais de (a) Adams *et al.* (2003) e (b) Charnay *et al.* (2015).

Já para a previsão dos resultados experimentais a $p_r=0,9-1$, exceto o método de Ducoulombier *et al.* (2011), que não se aplica neste intervalo, todos os demais baseados no modelo homogêneo apresentaram significativa precisão (Figs. 2b, 2c), sendo que, o EMA não excedeu 16% para nenhuma das 7 correlações avaliadas. Não é possível aprofundar a discussão a respeito da precisão dos métodos baseados no modelo homogêneo em pressões quase-críticas, definidas segundo Lei *et al.* (2020) como aquelas nas quais as variações da entalpia de vaporização e das densidades das fases são não-lineares. Tipicamente estas condições correspondem a $p_r=0,8-1$, intervalo no qual somente 154 resultados experimentais, extraídos de 3 estudos, constam no banco de dados. No entanto, acredita-se que, os desvios acentuados verificados para os dados de CO₂ de Hammer *et al.* (2021) em $p_r=0,88$, não representam perda de precisão destas correlações, mas sim a incapacidade dos métodos avaliados em preverem os resultados deste estudo específico.

Os métodos baseados em multiplicadores bifásicos avaliados, em geral, apresentaram precisão inferior em relação às correlações baseadas no modelo homogêneo, com somente os métodos de Zhang e Webb (2001) e Kim e Mudawar



(2013), apresentando $\lambda_{30\%}$ superior a 60%. A Figura (4) apresenta os EMAs para estes métodos em função da pressão reduzida.

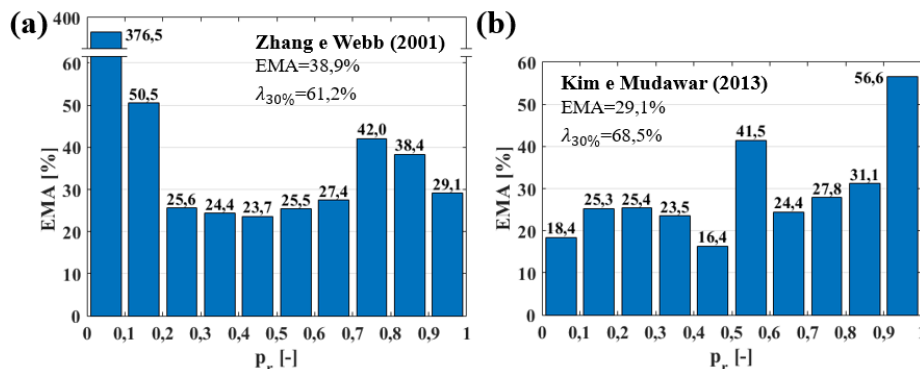


Figura 4: Efeito da pressão reduzida no erro médio absoluto dos métodos baseados em multiplicadores bifásicos de (a) Zhang e Webb (2001) e (b) Kim e Mudawar (2013)

Conforme verificado na Fig. (4a), o método de Zhang e Webb (2001), assim como a correlação baseada no modelo homogêneo proposta por Ducoulombier *et al.* (2011) (Fig. 2a), apresentou significativa imprecisão na previsão dos dados a $p_r < 0,2$, enquanto para pressões reduzidas superiores, o efeito de p_r no EMA foi razoavelmente semelhante ao verificado para as correlações de Cicchitti *et al.* (1960) e Awad e Muzychka (2008) v.1 nas Figs. 2b e 2c, respectivamente. Já o método de Kim e Mudawar (2013) apresentou EMAs relativamente reduzidos em reduzidas p_r , no entanto, significativos desvios foram verificados nos intervalos de pressões reduzidas entre 0,5 e 0,6, e entre 0,9 e 1.

Entre os métodos estritamente empíricos avaliados, os de Müller-Steinhagen e Heck (1986) e de Tibiriçá *et al.* (2017) foram os que previram as maiores parcelas do banco de dados com desvios entre $\pm 30\%$, sendo que o primeiro apresentou o menor EMA entre os 21 métodos avaliados (27,3%). A Figura (5) apresenta o efeito da pressão reduzida nos EMAs associados às previsões por meio destes dois métodos. Para ambos, assim como nas Figs. (2a), (2b), (2c) e (4a), os desvios mais significativos foram verificados em $p_r < 0,1$. Para $p_r < 0,5$, tanto o método de Müller-Steinhagen e Heck (1986), quanto o de Tibiriçá *et al.* (2017), apresentaram progressiva redução do EMA com o incremento da pressão reduzida. Para $p_r \geq 0,5$, o EMA apresentou variações menos significativas para o método de Müller-Steinhagen e Heck (1986). No entanto, para a correlação de Tibiriçá *et al.* (2017) foi verificado notável crescimento dos desvios com o incremento da pressão reduzida no intervalo de p_r entre 0,6 e 1.

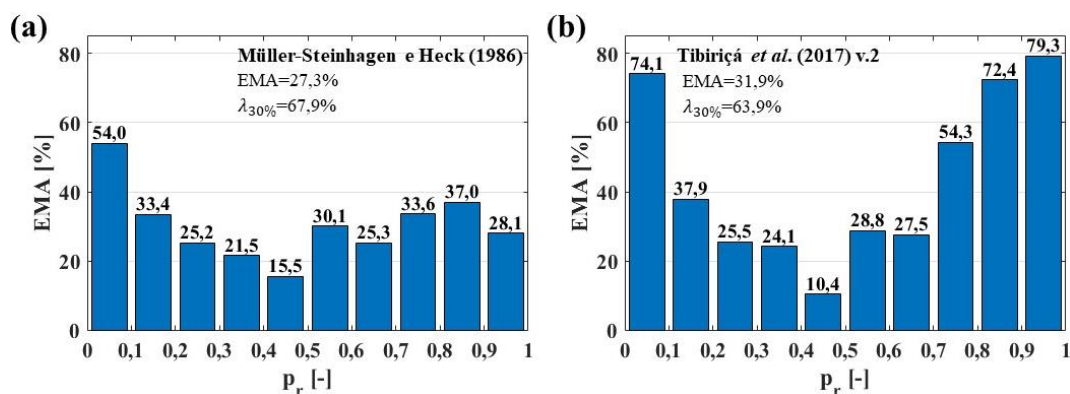


Figura 5: Efeito da pressão reduzida no erro médio absoluto dos métodos empíricos de (a) Müller-Steinhagen e Heck (1986) e (b) Tibiriçá *et al.* (2017).

4. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

A partir das comparações realizadas no presente estudo, são extraídas as seguintes conclusões:

- O método de Müller-Steinhagen e Heck (1986) apresentou EMA inferior aos demais considerando a previsão do banco de dados levantado. Este método apresentou redução significativa do EMA com o incremento da pressão reduzida para $p_r < 0,5$. Após este valor, o efeito de p_r em sua precisão foi não monotônico, alternando crescimentos e reduções do EMA com o incremento da pressão, porém mantendo-se sempre inferior a 40%;



- Métodos baseados no modelo homogêneo também apresentaram razoável precisão na previsão dos dados de perda de pressão, com destaque para os de Cicchitti *et al.* (1960) e Awad e Muzychka (2008) v.1. Para alguns intervalos de pressão reduzida, estas correlações apresentaram EMAs inferiores aos de Müller-Steinhagen e Heck (1986), especialmente em $p_r=0,9-1$;
- A escassez de dados experimentais impede o aprofundamento da discussão a respeito da precisão dos métodos avaliados em pressões quase-críticas ($p_r=0,8-1$).
- A correlação proposta por Ducoulombier *et al.* (2011) apresentou a maior parcela dos dados experimentais previstos com desvios entre $\pm 30\%$. No entanto, este método não é aplicável em p_r superiores a 0,675, além de apresentar significativa superestimação dos resultados a $p_r=0-0,2$. A fim de desenvolver um método de previsão com precisão em um amplo intervalo de pressões reduzidas, recomenda-se o ajuste de uma nova correlação baseada no método de Ducoulombier *et al.* (2011) eliminando suas inconsistências;

5. REFERÊNCIAS

Adams, DC *et al.* Pressure drop and void fraction in microchannels using carbon dioxide, ammonia, and R245fa as refrigerants. University of Illinois at Urbana-Champaign (2003).

Awad MM., Muzychka YS. Effective property models for homogeneous two-phase flows. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008 (33), 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.07.006>.

Beattie DRH., Whalley PB. A simple two-phase frictional pressure drop calculation method. International journal of multiphase flow, 1982(8): 83-87. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(82\)90009-X](https://doi.org/10.1016/0301-9322(82)90009-X).

Bell IH. *et al.* Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp. Industrial & engineering chemistry research, 2014(53): 2498-2508. <https://doi.org/10.1021/ie4033999>.

Charnay R, Revellin R, Bonjour J. Discussion on the validity of prediction tools for two-phase flow pressure drops from experimental data obtained at high saturation temperatures. International Journal of Refrigeration, 2015b (54): 98-125. <https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2015.02.014>.

Charnay R, Revellin R, Bonjour J. Flow boiling heat transfer in minichannels at high saturation temperatures: Part II—assessment of predictive methods and impact of flow regimes. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015a(7): 653-672. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.080>.

Cicchitti A *et al.* Two-phase cooling experiments—pressure drop, heat transfer and burnout measurements, Energia Nucleare 1960(7): 407–425.

Ducoulombier M *et al.* Carbon dioxide flow boiling in a single microchannel—Part I: Pressure drops. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011(35): 581-596. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.12.010>.

Dukler AE., Wicks III M., Cleveland RG. Frictional pressure drop in two-phase flow: B. An approach through similarity analysis. AIChE Journal, 1984(10): 44-51. <https://doi.org/10.1002/aic.690100118>.

Hammer M *et al.* Upward and downward two-phase flow of CO₂ in a pipe: Comparison between experimental data and model predictions. International Journal of Multiphase Flow, 2021(138): 103590. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103590>

Jeong S *et al.* Evaporative heat transfer and pressure drop of CO₂ in a microchannel tube. Proceedings of the ASME 3rd International Conference on Microchannels and Minichannels. Toronto, Ontario, Canada, 2005: 103-108.

Kim DH, Jeong S. Effect of micro-grooves on the two-phase pressure drop of CO₂ in a mini-channel tube. International journal of refrigeration, 2013 (36): 2040-2047. <https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2013.05.019>.

Kim SM., Mudawar I. Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for mini/micro-channel saturated flow boiling. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013(58): 718-734. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.045>.



Klein S, Alvarado F. Engineering Equation Solver. F-Chart Software, Box (2002).

Lei X *et al.* Experimental comparison of the heat transfer of carbon dioxide under subcritical and supercritical pressures. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020(152): 119562. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119562>.

Lillo G *et al.* Experimental thermal and hydraulic characterization of R448A and comparison with R404A during flow boiling. Applied Thermal Engineering, 2019(161): 114146. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114146>.

Lin S *et al.* Local frictional pressure drop during vaporization of R-12 through capillary tubes. International Journal of Multiphase Flow, 1991 (17): 95-102. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(91\)90072-B](https://doi.org/10.1016/0301-9322(91)90072-B).

Liu W, Tamai H, Takase K. Pressure drop and void fraction in steam-water two-phase flow at high pressure. Journal of heat transfer, 2013(35). <https://doi.org/10.1115/1.4023678>.

Grauso S *et al.* Two-phase adiabatic frictional pressure gradients for R410A and CO₂ in a macro channel: Experiments and a simplified predictive method for annular flow from low to medium reduced pressures. Experimental thermal and fluid science. 2014 (52): 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.08.024>.

Mastrullo R *et al.* Carbon dioxide heat transfer coefficients and pressure drops during flow boiling: Assessment of predictive methods. international journal of refrigeration, 2010(33): 1068-5. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.04.005>

McAdams W *et al.* Vaporization inside horizontal tubes II: Benzene-oil mixtures. Trans. ASME 1942(64): 193-200.

Mitchell M *et al.* Engauge Digitizer Software (2019). Disponível em: <http://markumitchell.github.io/engauge-digitizer>.

Müller-Steinhagen H, Heck K. A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 1986(20): 297-308. [https://doi.org/10.1016/0255-2701\(86\)80008-3](https://doi.org/10.1016/0255-2701(86)80008-3).

Vassallo P, Keller K. Two-phase frictional pressure drop multipliers for SUVA R-134a flowing in a rectangular duct. International journal of multiphase flow, 2006 (32): 466-482. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.01.004>.

Vijayarangan BR, Jayanti S, Balakrishnan AR. Pressure drop studies on two-phase flow in a uniformly heated vertical tube at pressures up to the critical point. International journal of heat and mass transfer, 2007(50): 1879-1891. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.018>.

Wang J *et al.* Experimental investigation on the frictional pressure drop of high pressure steam-water two-phase flows in an optimized internally-ribbed tube. Proceedings of the International Conference on Power Engineering, Kobe, Japan, 2009: 1-341. <https://doi.org/10.1299/jsmeicope.2009.1.1-341>.

Xu Y, Fang X. A new correlation of two-phase frictional pressure drop for evaporating flow in pipes. international journal of refrigeration, 2012(35): 2039-2050. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.06.011>.

Zhang M, Webb RL. Correlation of two-phase friction for refrigerants in small-diameter tubes. Experimental Thermal and Fluid Science, 2001 (25): 131-139. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(01\)00066-8](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(01)00066-8)

Zhang Y *et al.* Experimental study of R134a flow boiling in a horizontal tube for evaporator design under typical Organic Rankine Cycle pressures. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2018(71):210-219. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.04.008>.

6. AGRADECIMENTOS



Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do doutoramento do primeiro autor (nº2019/09509-01) e do projeto temático nº2016/09509-01.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.