



XVI Congresso Nacional dos
Estudantes de Engenharia Mecânica



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA



Associação Brasileira de
Engenharia e Ciências Mecânicas

XVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 17 a 21/08/2009 - Florianópolis - SC
Paper CREEM2009-MF01

CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO BIFÁSICO DO R134A EM MICROCANAIS

Alexandre A. Arcanjo, Juliano O. de Freitas e Gherhardt Ribatski

EESC, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, Universidade de São Paulo, Curso de Engenharia Mecatrônica.
Bairro Arnold Schmidt - CEP 13566-590 - São Carlos - São Paulo
E-mail para correspondência: alexandrearcujo@gmail.com

Introdução

Transições entre padrões de escoamento e suas características como fração de vazio, espessura do filme líquido, ondulações na interface e velocidade dos pistões de vapor têm sido estudadas por inúmeros pesquisadores desde o início dos anos 40. Estes estudos foram motivados pelo fato da transferência de calor, a queda de pressão e a presença de instabilidades estarem relacionadas com a configuração do escoamento. Portanto, a compreensão de suas características é fundamental para a elaboração de métodos confiáveis para a previsão da transferência de calor e da queda de pressão em trocadores de calor.

Existem vários estudos sobre transições entre padrões de escoamento bifásicos em microcanais, como o de Revellin e Thome (2007) e Akbar *et al.* (2003). Porém, não se verifica um modelo para suas previsões que possa ser considerado geral.

Barnea *et al.* (1982) foram os primeiros a implementar um método de predição de padrões de escoamento em canais de diâmetro reduzido. Eles consideraram como referência a análise teórica dos padrões de escoamento para macrocanais desenvolvida por Taitel e Dukler (1976). Em vez de considerar a instabilidade de Kelvin-Helmholz, assumida por Taitel e Dukler (1976), Barnea *et al.* (1983) propuseram que o efeito da tensão superficial é o principal mecanismo para a transição entre escoamento estratificado e intermitente em microcanais. Dessa forma a transição foi modelada a partir de um balanço entre as forças gravitacional e de tensão superficial.

Felcar *et al.* (2007), a fim de prever os padrões de escoamento em microcanais, introduziram uma nova modificação na transição intermitente/anular proposta por Taitel e Dukler (1976) e posteriormente modificada por Barnea *et al.* (1983). Eles adicionaram um novo parâmetro o qual é uma função do número modificado de Eötvös relacionando efeitos de capilaridade e gravidade, e do número de Weber, relacionando efeitos inerciais e de tensão superficial.

Usando um método óptico e o processamento de filmes com captura de imagens em alta velocidade, Thome e seus colaboradores (2008a, 2008b, 2008c) determinaram o comprimento, a velocidade e a frequência de bolhas alongadas durante o escoamento de R134a em microcanais. Seus ensaios foram realizados em tubos de diâmetro de 0,509 mm e 0,709 mm, títulos de vapor de 0,02 a 0,19 e temperatura de saturação de 30°C. De acordo com os resultados, a velocidade relativa das bolhas alongadas aumenta com o aumento do comprimento da bolha até que um limite é alcançado, e também se eleva com o diâmetro do tubo e a velocidade mássica. Eles desenvolveram um modelo semianalítico para a velocidade do vapor, segundo o qual a velocidade das bolhas alongadas é dada como uma função dos seus comprimentos.

Objetivos

No presente estudo, velocidade, comprimento e frequência de bolhas alongadas foram determinados a partir da análise de filmes com captura de imagens em alta velocidade (≈ 8000 imagens/s). Além disso, mapas foram elaborados caracterizando o escoamento bifásico segundo os seguintes padrões: bolhas alongadas, agitante e anular. Os ensaios foram realizados para o R134a evaporando em um tubo de aço inoxidável de diâmetro de 2,32 mm, velocidades mássicas de 50 a 600 kg/m²s e temperaturas de saturação de 22, 31 e 41°C. As imagens do escoamento foram obtidas a partir de um tubo transparente localizado logo após a seção aquecida. Os padrões visualizados foram comparados com os métodos propostos por Barnea *et al.* (1983), Felcar *et al.* (2007) e Revellin e Thome (2007).

Metodologia

O aparato experimental é constituído de circuitos de fluido refrigerante e de etilenoglicol. De forma geral, ele contém uma microbomba, para conduzir o fluido refrigerante através do circuito, e duas seções de aquecimento compostas pelo pré-aquecedor e pela seção de testes utilizada para o levantamento de resultados para o coeficiente de transferência de calor e perda de carga. Apresenta ainda uma seção de visualização, um trocador de calor tubo-em-tubo para condensar o vapor gerado na região aquecida e um reservatório de fluido refrigerante. Além disso, há um circuito no qual circula uma solução de água e etilenoglicol que tem como objetivo condensar e sub-resfriar o fluido do circuito refrigerante. No circuito do refrigerante, a partir de um sub-resfriador o fluido de teste escoava através de um filtro até a microbomba. Há, então, um medidor de vazão do tipo Coriolis e outro sub-resfriador para garantir que o fluido entre sub-resfriado na seção de pré-aquecimento. O pré-aquecedor e a seção de testes são tubos horizontais de aço inoxidável de comprimento 464 mm, cada, e diâmetro interno de 2,32 mm. Ambos são aquecidos aplicando-se corrente contínua diretamente a sua superfície. A seção de visualização é um tubo horizontal de vidro com diâmetro de 2,1 mm, comprimento de 85 mm e está localizada a jusante da seção de testes. Informações adicionais sobre o aparato experimental podem ser encontradas em Arcanjo *et al.* (2009).

O título de vapor na seção de visualização é determinado através de um balanço de energia no pré-aquecedor e na seção de testes segundo a seguinte equação:

$$x = \frac{1}{h_{LG,out}} \left[\frac{4(P_1 + P_2)}{G\pi D^2} + (h_{L,in} - h_{L,out}) \right] \quad (1)$$

A entalpia do líquido na entrada do pré-aquecedor, $h_{L,in}$, é estimada através das leituras da temperatura e pressão na entrada da seção de testes. A entalpia do líquido e o calor latente de vaporização na seção de visualização ($h_{L,out}$ e $h_{LG,out}$) são estimados a partir de medidas feitas a jusante da seção de visualização e assumindo-se estado saturado. Na Eq. (1), P_1 e P_2 são as potências fornecidas pelas fontes às seções aquecidas.

Os padrões de escoamento foram caracterizados baseando-se nas imagens obtidas pela câmera. Com a intenção de se usar uma terminologia comum para os padrões de escoamento, as nomenclaturas ilustradas na Fig.1 foram utilizadas.

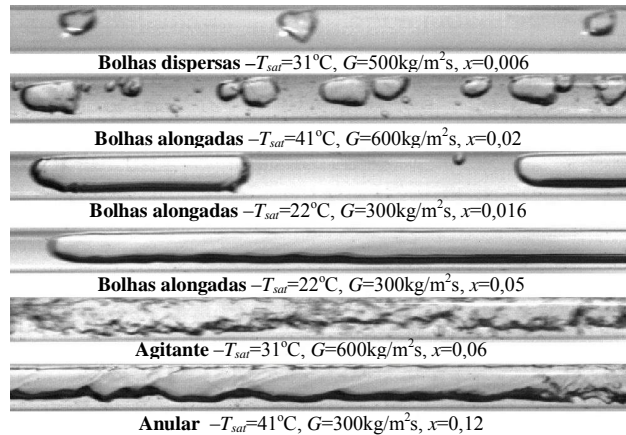


Figura 1 – Imagens e nomenclatura do escoamento, $D=2,32\text{mm}$, R134a.

A partir das imagens obtidas do vídeo de alta velocidade, a frequência das bolhas foi determinada pela contagem do número de bolhas com diâmetro maior do que o diâmetro do tubo, N_b . Sabendo-se o número total de imagens gravadas, N_i , e a taxa de gravação *IPS* (imagens/s), a frequência das bolhas foi obtida a partir da seguinte equação:

$$f_b = \frac{N_b}{N_i} \text{IPS} \quad (2)$$

A velocidade das bolhas alongadas foi estimada a partir do número de imagens necessárias para que a bolha percorresse uma distância conhecida ΔL . Dessa forma, a velocidade de cada bolha foi calculada como:

$$U_G = \frac{\Delta L \cdot IPS}{N_i} \quad (3)$$

Para determinar o comprimento da bolha uma escala, EI , foi definida dada pela razão entre o comprimento da imagem (ΔL) e o número total de pixels segundo a direção horizontal (1280 pixels). Se o comprimento da bolha é inferior a largura da imagem, e sendo N_p o número de pixels na direção do escoamento, o comprimento é dado por:

$$L_G = EI \cdot N_p \quad (4)$$

Caso o comprimento da bolha alongada é superior a largura da imagem, L_G foi calculado segundo a seguinte equação:

$$L_G = U_G \cdot \frac{N_i}{IPS} \quad (5)$$

Ensaio com escoamento monofásico foram realizados para assegurar o título de vapor estimado e avaliar a taxa de calor efetiva transferida para o fluido. Foi observado que as perdas de calor diminuem com o aumento da velocidade mássica, sendo o calor perdido para o ambiente inferior a 10% para $G > 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e a 5% para $G > 400 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Perdas de calor expressivas foram observadas para $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

Os termopares foram calibrados e a incerteza na medição foi avaliada de acordo com o procedimento sugerido por Abernethy e Thompson (1973). Considerando-se todos os erros dos instrumentos de medição, as incertezas para os parâmetros foram estimadas usando-se o método de perturbação seqüencial de acordo com Moffat (1988). As incertezas experimentais estão listadas na Tab. 1.

Tabela 1– Incertezas dos parâmetros medidos e calculados.

Parâmetros	Incertezas	Parâmetros	Incertezas
D	$\pm 20 \mu\text{m}$	Δp	$\pm 0.15 \text{ kPa}$
f_b	2 bolhas	P_1, P_2	$\pm 0.8\%$
G	$\pm 0.88\%$	T	$\pm 0.15 \text{ }^\circ\text{C}$
L	$\pm 1 \text{ mm}$	U_G	2%
L_b	$\pm 1 \text{ mm}$	x	$< 5\%$
p	$\pm 4.5 \text{ kPa}$		

Resultados

As Figs. 2 e 3 ilustram comparações entre métodos de previsão de padrões de escoamento e os resultados obtidos no presente estudo. Escoamentos em bolhas dispersas não são mostrados nestas figuras desde que foram observados apenas para títulos de vapor próximos a zero, e, nestas condições, não é possível assegurar que o escoamento está saturado, devido às incertezas no título de vapor estimado. Escoamentos em bolhas dispersas também são esperados para velocidades mássicas superiores a $700 \text{ kg/m}^2\text{s}$, entretanto, tais valores não são possíveis com o presente aparato experimental.

De acordo com a Fig. 2a, o método de Barnea *et al.* (1983), prevê adequadamente a inexistência de escoamento estratificado nas condições avaliadas. Embora não tenha sido ilustrado, este fato também foi observado para as temperaturas de saturação de 31 e 41°C. Além disso, a Fig. 2a mostra que segundo os resultados experimentais deste estudo, o método de Barnea *et al.* (1983) é incapaz de representar satisfatoriamente a transição entre escoamento anular e intermitente, compreendendo segundo a terminologia adotada por Barnea *et al.* (1983) os escoamentos segundo bolhas alongadas e agitante. O método não prevê a redução do título de vapor de transição com o aumento da velocidade mássica, ao contrário adota um título de vapor constante. Esse resultado vem da suposição de uma relação linear entre as velocidades superficiais do vapor e do líquido e de uma fração de vazão fixa para a transição. Estas duas hipóteses resultam em um título de vapor de transição constante. A elevação da temperatura de saturação de 22 para 41°C faz com que o método apresente resultados inferiores, uma vez que a variação do título de vapor de transição se intensifica.

A Fig. 2b compara os resultados deste estudo com as linhas de transição determinadas através do método proposto por Revellin e Thome (2007). A figura mostra que a transição entre escoamentos

intermitente (agitante e bolhas alongadas) e anular ocorre em títulos de vapor bastante inferiores aos previstos pelo método. Além disso, de acordo com os resultados experimentais do presente estudo, a secagem de parede foi observada apenas para títulos de vapor acima de 90%, enquanto segundo Revellin e Thome (2007), a região de secagem de parede abrange basicamente todo o canto superior direito do gráfico. Embora o método de Revellin e Thome (2007) falhe ao prever os resultados deste estudo, ele se aproxima do resultado experimental com o aumento da temperatura de saturação.

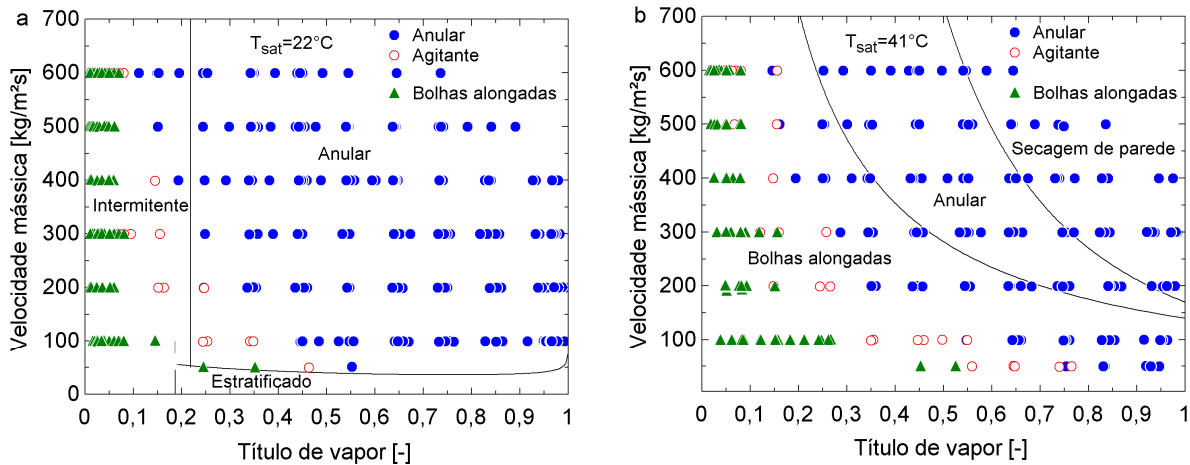


Figura 2 – Comparação entre os métodos de predição (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). (a) Barnea *et al.* (1983). (b) Revellin e Thome (2007). R134a, $D=2,32\text{mm}$.

A Fig. 3 compara os resultados deste estudo com o método proposto por Felcar *et al.* (2007). No geral, o método prevê razoavelmente os resultados experimentais. Entretanto, ele não captura adequadamente, com o incremento da temperatura de saturação, o deslocamento para a direita da curva de transição entre os escoamentos intermitente e anular. Para títulos de vapor elevados e vazões mássicas inferiores a $100\text{ kg/m}^2\text{s}$ o método não prevê adequadamente o escoamento anular.

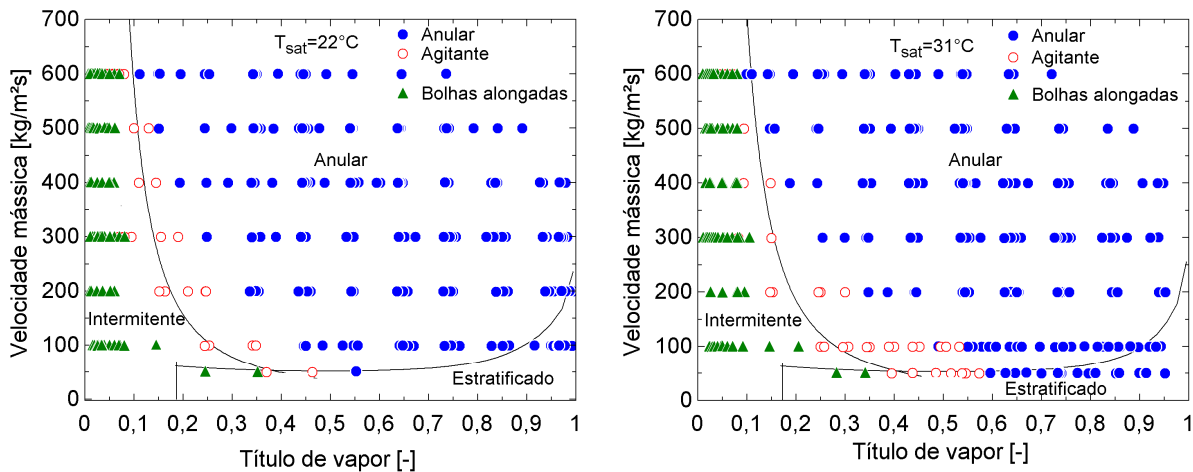


Figura 3 – Comparação entre o métodos de predição proposto por Felcar *et al.* (linhas) e os resultados experimentais (símbolos). R134a, $D=2,32\text{mm}$.

A Fig. 4a ilustra o efeito da velocidade mássica e da temperatura de saturação na velocidade das bolhas alongadas. Como mostrado por Revellin *et al.* (2007) a velocidade das bolhas eleva-se com o incremento do título de vapor e da velocidade mássica. A Fig.4a ilustra, também, a redução da velocidade das bolhas com o incremento da temperatura de saturação. Tal comportamento está relacionado ao fato da razão entre o volume específico do vapor e do líquido e, conseqüentemente, a aceleração do fluido, decrescerem com a elevação da temperatura de saturação.

Segundo o modelo de Zuber e Findler (1965) também conhecido por “*drift flux model*”, a velocidade da fase vapor, U_G , pode ser determinada como uma função linear da velocidade superficial da mistura, J . A Fig.4b apresenta os resultados experimentais para a velocidade da fase vapor em um gráfico U_G vs. J . Na elaboração desta figura assumiu-se a velocidade do vapor igual a velocidade das bolhas alongadas. De acordo com este gráfico, o modelo de Zuber e Findler (1965) com um parâmetro de distribuição igual a 1,88 e velocidade de deslizamento nula prevê razoavelmente os resultados experimentais, já que 82% dos pontos foram previstos dentro de uma margem de erro de $\pm 20\%$.

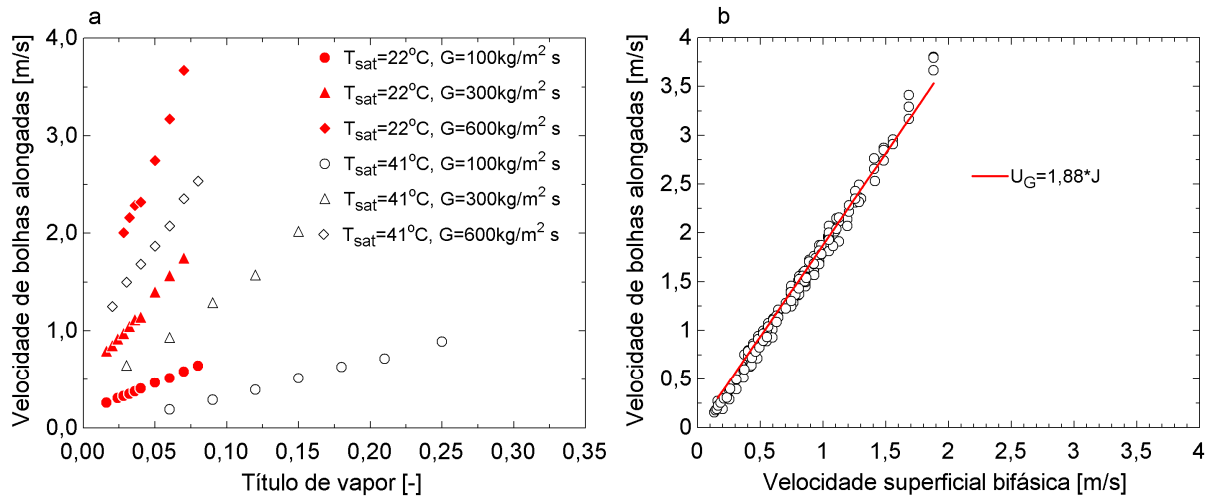


Figura 4 – (a) Influência da velocidade mássica e da temperatura de saturação na velocidade das bolhas alongadas. (b) Ajuste de uma curva relacionando a velocidade das bolhas alongadas com a velocidade superficial do escoamento bifásico. R134a, $D=2,32\text{mm}$.

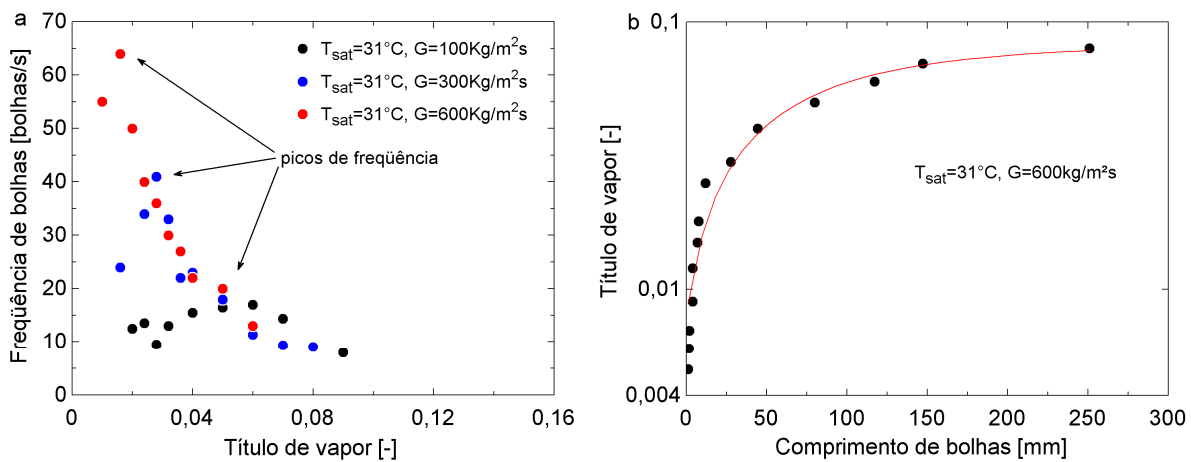


Figura 5 – (a) Influência da velocidade mássica na frequência de bolhas alongadas. (b) Variação do comprimento de bolhas alongadas com o título de vapor. R134a, $D=2,32\text{mm}$.

De acordo com a Fig. 5a a frequência de bolhas passa por um pico, quando se eleva o título de vapor a partir de zero. Este comportamento foi anteriormente indicado por Thome *et al.* (2007, 2008). De acordo com a Fig. 5a o valor máximo da frequência eleva-se com o incremento da velocidade mássica, o que, aparentemente, se relaciona ao incremento de efeitos de turbulência. Também é ilustrado que com o incremento da velocidade mássica os picos de frequência passam a ocorrer para títulos de vapor inferiores. Além disso, observa-se que a frequência de bolhas alongadas eleva-se com o incremento da temperatura de saturação, comportamento não ilustrado nesta figura e que pode estar relacionado à redução da viscosidade dinâmica bifásica com o conseqüente incremento do número de Reynolds bifásico e assim também de efeitos de turbulência. Soma-se a isto a redução da tensão superficial com o aumento da temperatura de saturação, com ambos efeitos atuando de forma a favorecer o processo de quebra de bolhas.

Para uma determinada velocidade mássica e temperatura de saturação, a Fig. 5b mostra que o título de vapor converge assintoticamente para um valor fixo, enquanto o comprimento das bolhas eleva-se. Este fato

indica um título de vapor no qual a transição para escoamento anular ocorre. Comportamento e conclusão similares também foram indicados por Agostini *et al.* (2008).

Conclusões

As seguintes conclusões foram obtidas a partir da análise do banco de dados levantado e descrito neste estudo:

- a) O método proposto por Felcar *et al.* (2007) apresenta um bom resultado, porém necessita ser aperfeiçoado para melhor prever a transição e velocidades mássicas reduzidas e em condições de títulos de vapor elevados. Destaca-se o fato do padrão estratificado ser improvável para o escoamento do R134a em um tubo de 2,3 mm de diâmetro.
- b) A velocidade das bolhas alongadas eleva-se com a redução da temperatura de saturação, e com o incremento do título de vapor e da velocidade mássica. Através de uma função linear da velocidade superficial bifásica foi possível prever satisfatoriamente a velocidade das bolhas alongadas.
- c) A frequência das bolhas alongadas passa por um pico aumentando-se o título de vapor a partir de zero e esse pico desloca-se para títulos de vapor inferiores com o incremento da velocidade mássica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro sobre números de contrato 05/60031-0, 06/52089-1 e 07/53950-5 dados pela FAPESP (Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado de São Paulo, Brasil). O apoio técnico dado ao presente estudo pelo Sr. José Roberto Bogni é também apreciado e profundamente reconhecido.

Referências bibliográficas

- Abernethy, R.B., hompson, J.W., “Handbook Uncertainty in Gas Turbine Measurements”, Arnold Engineering Development Center, Arnold Air Force Station, Tennessee, 1973.
- Agostini, B., Revellin, R., Thome, J.R., “Elongated Bubbles in Microchannels. Part I: Experimental Study and Modeling of Elongated Bubble Velocity”, *Int. J. Mult. Flow*, vol. 34, pp. 590-601, 2008a.
- Akbar, M.K., Plummer, D.A., Ghiaasiaan, S.M., “On Gas-Liquid Two-Phase Flow Regimes in Microchannels”, *Int. J. Mult. Flow*, Vol. 29, pp. 855-865, 2003.
- Aranjo, A.A., Freitas, J.O., Tibiriçá, C.B., Ribatski, G., “Two-Phase Flow Characteristics During Flow Boiling of Halocarbon Refrigerants in Micro-scale Channels, ECI International Conference on Boiling Heat Transfer”, Florianópolis, Brazil, 2009.
- Barnea, D., Luninski, Y., Taitel, Y., “Flow Pattern in Horizontal and Vertical Two Phase Flow in Small Diameter Pipes”, *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 61, pp. 617-620, 1983.
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y., “Flow Pattern Transition for Downward Inclined Two Phase Flow; Horizontal to Vertical”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 37, pp. 735-740, 1982.
- Felcar, H.O.M., Ribatski, G., Saiz-Jabardo, J.M., “A Gas-Liquid Flow Pattern Predictive Method for Macro- and Mini-Scale Round Channels”, *Proc. 10th UK Heat Transfer Conference*, Edinburgh, Scotland, 2007.
- Moffat, R.J., “Describing the Uncertainties in Experimental Results”, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 1, pp. 3-17, 1988.
- Revellin, R., Thome, J.R., “A New Type of Diabatic Flow Pattern Map for Boiling Heat Transfer in Microchannels”, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 17, pp. 788-796, 2007.
- Revellin, R., Agostini, B., Thome, J.R., “Elongated Bubbles in Microchannels. Part II: Experimental Study and Modeling of Bubble Collisions”, *Int. J. Mult. Flow*, vol. 34, pp. 602-613, 2008b
- Revellin, R., Agostini, B., Ursenbacher, T., Thome, J.R., “Experimental Investigation of Velocity and Length of Elongated Bubbles for Flow of R-134a in a 0.5 mm Microchannel”, *Exp. Thermal Fluid Science*, Vol. 32, pp. 870-881, 2008c.
- Taitel, Y., Dukler, A.E., “A Model for Predicting Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow”, *AIChE Journal*, Vol. 22, pp. 47-55, 1976.
- Zuber, N., Findlay, J.A., “Average Volumetric Concentration in Two Phase Flow Systems”, *J. Heat Transfer*, Vol. 87, pp. 458-463, 1965.