



XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP

Artigo CREEM2012

Uma simples correlação para previsão de transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais

Mateus Fernando Milani, Cristiano Bigonha Tibiriçá, Gherhardt Ribatski

USP, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica
Campus São Carlos - Bairro Pq. Arnold Schmidt - CEP 13566-590 – São Carlos – São Paulo
E-mail para correspondência: mateus.milani@usp.br

Resumo

Este trabalho teve como objetivo otimizar uma correlação para previsão do coeficiente de transferência de calor durante a ebulição convectiva no interior de microcanais utilizando um amplo banco de dados experimentais obtido da literatura, tendo em vista que erros elevados de previsão ainda ocorrem na aplicação de correlações. O banco de dados utilizado contém 7269 pontos experimentais para diversos fluidos escoando em um único canal, com diâmetros entre 0,19 e 3,6 mm, perfis circulares e retangulares, velocidades mássicas entre 23,4 kg/m²s e 1685 kg/m²s, temperaturas de saturação entre -189,7 °C e 105,3 °C, títulos de vapor entre 0,1 e 98% e fluxos de calor de até 391 kW/m². A nova correlação otimizada conseguiu prever o banco de dados com erro médio absoluto de 42%, e aumentou em 16%, em relação à correlação original, a quantidade dos dados previstos com erro médio absoluto inferior a 30%. Recomenda-se a aplicação desta correlação para a previsão do coeficiente de transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais de fluidos halogenados tendo em visto a simplicidade de implementação deste método.

Introdução

Um grande número de aplicações envolvendo a remoção de altas taxas de calor em aplicações de dimensões reduzidas apareceram nas últimas décadas. Microprocessadores cada vez mais potentes exigem uma boa capacidade de dissipação de calor; sistemas de ar condicionado automotivo tem buscado uma redução do material utilizado em sua fabricação e do inventário de fluido refrigerante necessário para a operação, e resfriadores de células combustíveis e de satélites devem ser mais leves e compactos. Uma das tecnologias mais promissoras para suprir estas necessidades é a evaporação convectiva em microcanais. De maneira geral, escoamentos em condições de microescala são considerados a partir de diâmetros inferiores e próximos à 3 mm, conforme descrito em Kandlikar e Grande (2003).

Apesar da disponibilidade de tecnologias que permitam a manufatura de trocadores de calor baseados em microcanais, os métodos de previsão de transferência de calor para os mesmos geralmente são de difícil implementação e com elevados erros de previsão, pois os bancos de dados experimentais usados em seu desenvolvimento são limitados.

Desta forma este trabalho teve como objetivo otimizar uma correlação existente para a cálculo do coeficiente de transferência de calor (CTC) de implementação muito simples, a correlação de Kew e Cornwell (1997), utilizando um extenso banco de dados experimentais obtidos na literatura contendo mais de 7000 pontos provenientes dos principais laboratórios de pesquisa em ebulição convectiva em microcanais, e assim obter uma nova e simples correlação com bom desempenho.

Métodos de previsão do coeficiente de transferência de calor

Métodos para previsão do coeficiente de transferência de calor durante ebulição convectiva em microcanais podem ser classificados em três grupos: modelos fenomenológicos; métodos semi-empíricos e métodos empíricos. O primeiro grupo baseia-se na modelagem física do fenômeno, considerando as leis para conservação da massa, quantidade de movimento e energia, solucionadas segundo condições de contorno adequadas. O segundo grupo utiliza a mesma fundamentação teórica do primeiro, tendo no final os coeficientes ajustados perante um banco de dados experimentais. O terceiro é baseado na observação experimental de quais parâmetros estão relacionados com o processo em questão e, a partir disso, uma correlação envolvendo grupos adimensionais é ajustada aos dados experimentais.

A correlação adotada para otimização neste trabalho é a de Kew e Cornwell (1997), que se encaixa no tipo de correlações empíricas. Esta correlação foi adotada por sua simplicidade de aplicação, sendo muito similar a correlação de Dittus-Boelter (1930) para escoamentos monofásicos, mas com a adição de adimensionais dependentes do fluxo de calor e do título de vapor, já que dados experimentais mostram que o fluxo de calor e o título de vapor são parâmetros importantes em ebulição convectiva. A correlação original de Kew e Cornwell (1997) apesar de utilizar dados na faixa de diâmetros de micro-escala teve um banco de dados muito limitado, contendo somente um fluido, o R141b.

A correlação de Kew e Cornwell original é mostrada na Eq. (1):

$$h = 30 \cdot Re_{lo}^{0,857} \cdot Bo^{0,714} \cdot (1 - x)^{-0,143} \cdot \frac{k_l}{D} \quad (1)$$

$$Re_{lo} = \frac{G \cdot D}{\mu_l}$$

$$Bo = \frac{q}{G \cdot (h_v - h_l)}$$

$$We_l = \frac{G \cdot (1 - x) \cdot D}{\sigma \cdot \rho_l}$$

Para obtenção da nova correlação os coeficientes numéricos desta correlação foram recalculados a partir do novo banco de dados obtido neste trabalho.

Banco de dados experimental

O banco de dados utilizado para ajustar os coeficientes consiste num banco de dados geral que contém ao todo 7269 pontos experimentais, obtidos em diversos laboratórios, para velocidades mássicas variando entre 23,4 e 1685 kg/m²s e fluxo de calor variando entre 3 e 391 kW/m². Os microcanais utilizados nos experimentos continham diâmetros hidráulicos situados entre 0,19 mm e 3,6 mm, com seções transversais circulares ou retangulares e com as direções das seções de testes tanto verticais como horizontais. Os pontos foram obtidos para um total de 13 fluidos: água, dióxido de carbono, nitrogênio, propano, R11, R113, R12, R123, R134a, R141b, R22, R236fa e R245fa, com predominância do refrigerante R134a (49,3% do banco de dados). Detalhes deste banco de dados podem ser vistos nos trabalhos de Tibiriçá e Ribatski (2008) e Tibiriçá (2011).

Nova correlação

A nova correlação otimizada a partir da Equação (1), utilizando o banco de dados deste trabalho, é a apresentada a seguir, Eq. (2). Repara-se que os coeficientes numéricos sofreram considerável mudança.

$$h = 49,2725 \cdot Re_{lo}^{0,7090} \cdot Bo^{0,5906} \cdot (1 - x)^{-0,0709} \cdot \frac{k_l}{D} \quad (2)$$

$$Re_{lo} = \frac{G \cdot D}{\mu_l}$$

$$Bo = \frac{q}{G \cdot (h_v - h_l)}$$

$$We_l = \frac{G \cdot (1 - x) \cdot D}{\sigma \cdot \rho_l}$$

Resultados

Para avaliar os resultados proporcionados pela nova correlação, foram comparados o erro médio absoluto, ε , e a fração de dados com erro médio absoluto inferior a 30%, λ , segundo o mesmo banco de dados anteriormente citado. A Tabela 1 mostra os resultados para a correlação original e para a modificada:

Tabela 1 – Avaliação estatística da nova correlação contra o banco de dados usado em seu ajuste

| | Método de previsão de CTC | |
|----------------------------|--|---|
| | Correlação original de Kew e Cornwell (1997) | Correlação modificada de Kew e Cornwell |
| Nº de pontos experimentais | 7269 | 7269 |
| ε (%) | 46,4 | 42,7 |
| $\lambda_{(\pm 30\%)}$ | 29,2 | 45,3 |

Como mostrado na Tabela 1, a porcentagem de dados previstos com erro inferior a 30% aumentou da correlação original para a modificada. A correlação modificada conseguiu prever 45% do banco de dados com um erro inferior à 30%, com um erro médio relativo de 42%, um pouco menor do que o erro médio relativo observado para a correlação original. A figura 1 apresenta a relação entre o coeficiente de transferência de calor (CTC) calculado (teórico) e o CTC experimental para a correlação modificada. A distribuição dos dados em torno da linha central de simetria indica uma melhor previsão.

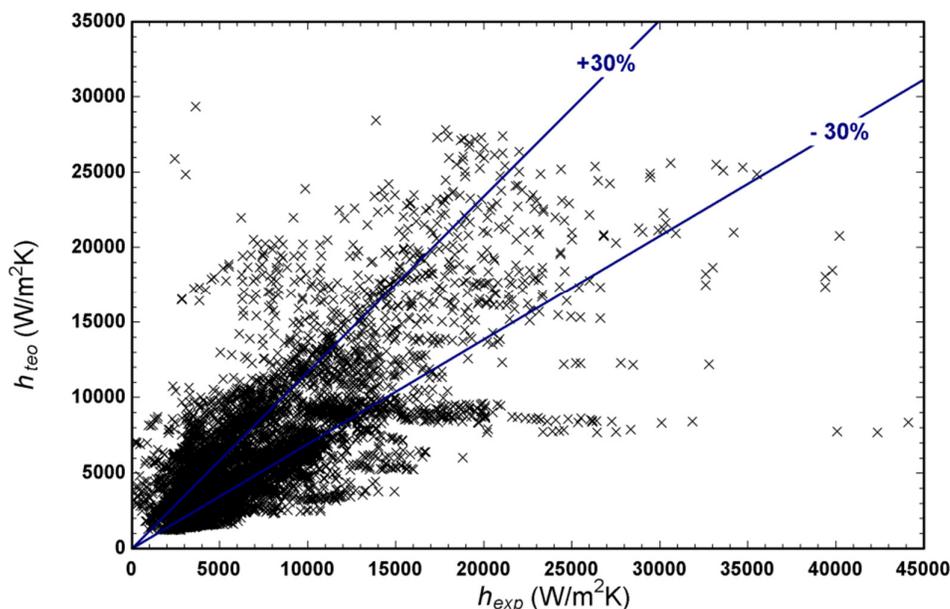


Figura 1 - Otimização da correlação de Kew e Cornwell (1997)

As Figs. 2 a 5 mostram o efeito dos parâmetros de entrada da nova correlação, Eq. (2), no coeficiente de transferência de calor, ou seja, os efeitos do título de vapor, velocidades mássica, fluxo de calor, temperatura de saturação e do diâmetro do canal.

A Figura 2 mostra o comportamento em relação a velocidade mássica. Notamos que um aumento na velocidade mássica é seguido de um aumento no CTC, como observado na literatura como em Tibiriçá e Ribatski (2010). O aumento do título de vapor também proporciona um aumento no coeficiente de transferência de calor, comportamento também observado em trabalhos como Ong e Thome (2010).

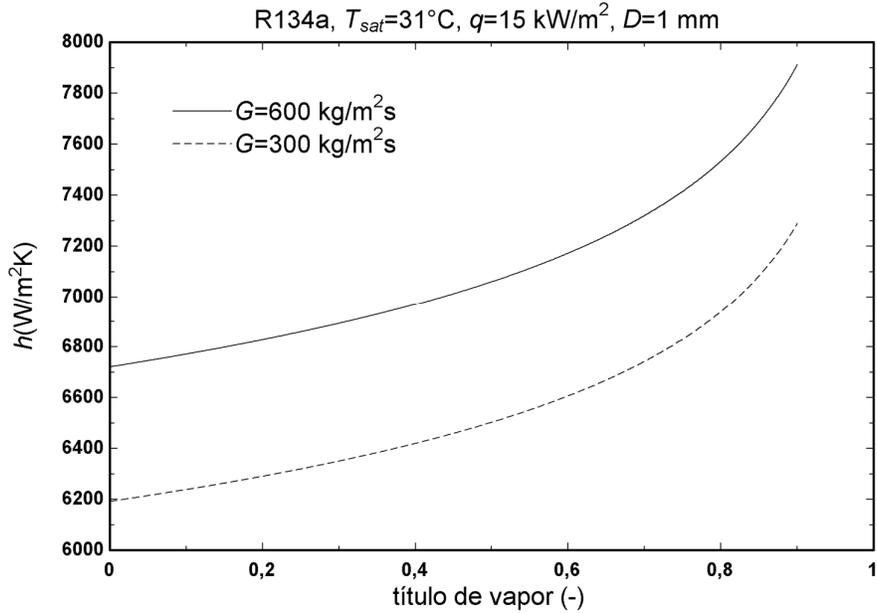


Figura 2 - Efeito da velocidade mássica na correlação modificada de Kew e Cornwell (1997)

Na Figura 3 podemos observar o aumento considerável do coeficiente de transferência de calor com o aumento do fluxo de calor, mantendo-se de forma relativamente constante com o aumento do título de vapor. Resultados experimentais como os vistos em Tibiriçá et al. (2012) indicam a mesma tendência.

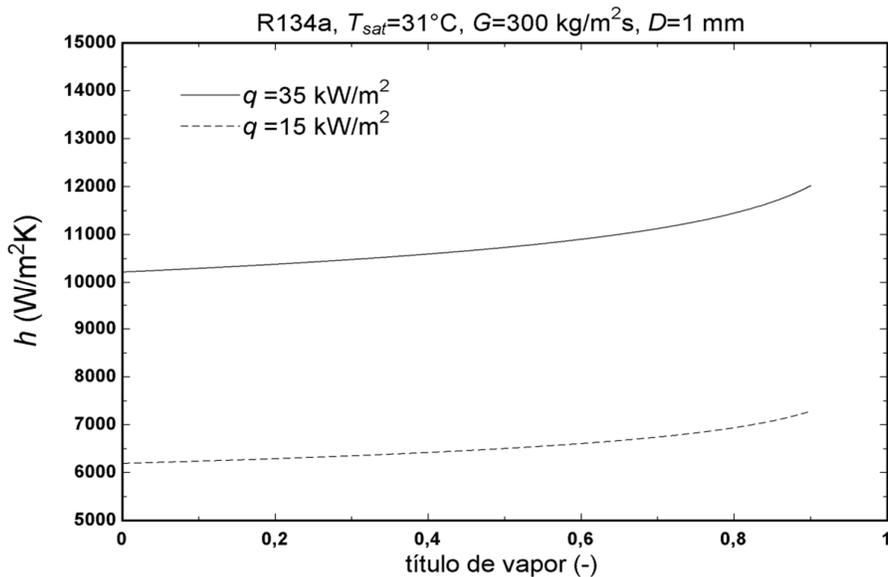


Figura 3 - Efeito do fluxo de calor na correlação modificada de Kew e Cornwell (1997)

A Figura 4 compara o efeito da temperatura de saturação no coeficiente de transferência de calor. Observa-se um comportamento semelhante ao observado para ebulição nucleada, onde o aumento de temperatura proporciona um aumento no CTC.

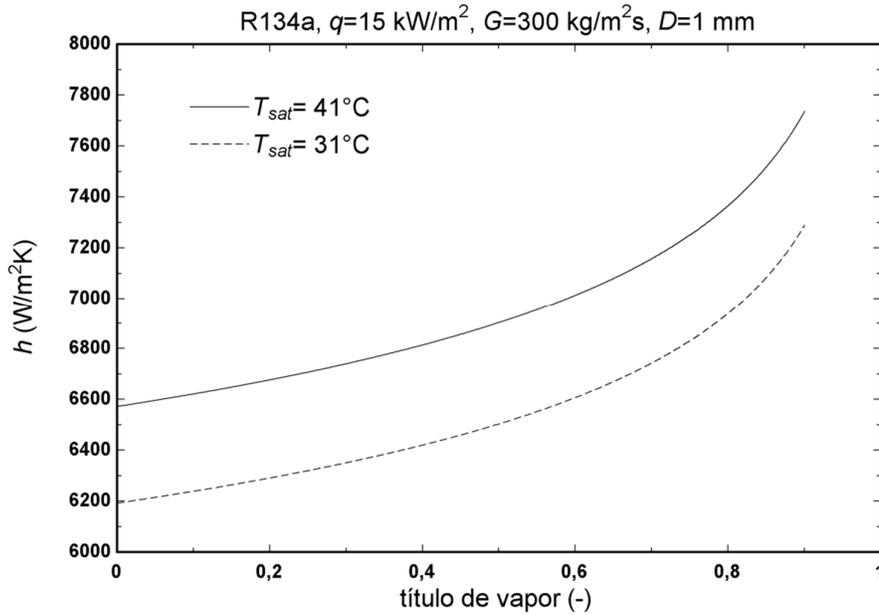


Figura 4 - Efeito da temperatura no coeficiente de transferência de calor

O efeito do diâmetro do canal pode ser visto na Figura 5. Observa-se que maiores coeficientes de transferência de calor são obtidos para canais com menor diâmetro, o que está de acordo com os resultados obtidos experimentalmente.

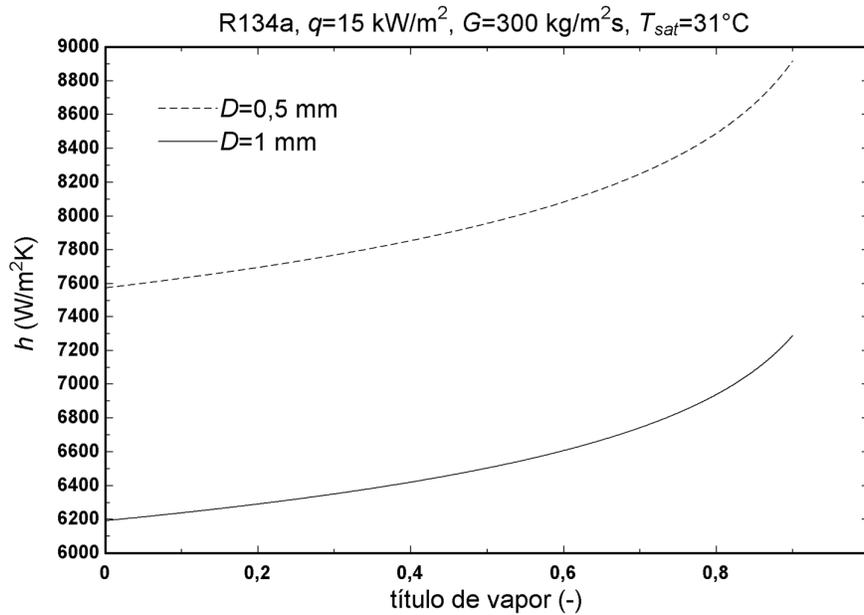


Figura 5 - Efeito do diâmetro do canal no coeficiente de transferência de calor

A Tabela 2 a seguir mostra o erro médio absoluto, ϵ , e a fração de dados com erro médio absoluto inferior a 30%, λ , para cada fluido contido no banco de dados. Podemos observar que a correlação modificada conseguiu prever com melhor precisão o coeficiente de transferência de calor dos fluidos halogenados.

Tabela 2 – Avaliação estatística da nova correlação para os diferentes fluidos do banco de dados

| | Fluido utilizado | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------------------|-----------------|----------------|---------|------|------|------|------|------|-------|-------|--------|--------|
| | Água | CO ₂ | N ₂ | Propano | R11 | R12 | R22 | R113 | R123 | R134a | R141b | R236fa | R245fa |
| ϵ (%) | 60,4 | 112,5 | 251,9 | 117,8 | 22,1 | 11,8 | 93,2 | 54,6 | 34,2 | 36,2 | 159,7 | 63,3 | 47,5 |
| $\lambda_{(\pm 30\%)}$ | 39,0 | 48,1 | 3,8 | 38,1 | 72,1 | 97,7 | 30,3 | 53,4 | 54,7 | 60,5 | 0 | 12,0 | 37,1 |

Conclusão

Uma correlação modificada para a correlação de Kew e Cornwell (1997) para previsão do coeficiente de transferência de calor durante ebulição convectiva foi desenvolvida. O banco de dados experimentais utilizado para ajustar os coeficientes continha um total de 7269 pontos. As principais conclusões foram:

- A nova correlação mostrou desempenho superior à correlação original, conseguindo aumentar em 16% a quantidade de dados previstos com erro inferior a 30%. Mesmo assim apresentou um erro médio absoluto de 42%. Um próximo passo deste trabalho será filtrar o banco de dados para permitir previsões específicas de certas tendências observadas nos dados experimentais.
- A nova correlação se mostra mais adequada para utilização com fluidos halogenados, pois para água, propano, dióxido de carbono e nitrogênio os resultados da previsão foram pouco satisfatórios.
- Esta nova correlação conseguiu prever adequadamente tendências experimentais, tal como o aumento do coeficiente de transferência de calor com o aumento da vazão mássica, com o fluxo de calor e com o título de vapor, assim como previu o aumento do CTC com a redução do diâmetro.

Referências

- Dittus, F.W.; Boelter, L.M.K, Heat transfer in automobile radiators of the tubular type. Publications in engineering, University of California, v. 2, p. 443-461, 1930.
- Kandlikar, S.G.; Grande, W.J., “Evolution of microchannel flow passages - Thermohydraulic performance and fabrication technology”, Heat Transfer Engineering, v. 24, p. 3-17, 2003.
- Kew, Peter A.; Cornwell, Keith. “Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels”. Applied Thermal Engineering, UK, v. 17, n. , p.705-715, 1997.
- Thome, J.R.; Ong, C.L.. “Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: Part 2 – Flow boiling heat transfer and critical heat flux”. Experimental Thermal And Fluid Science, Lausanne, Suíça, v. 35, n. , p.873-886, 2011.
- Tibiriçá, C. B, Ribatski, G., “Flow boiling heat transfer of R134a and R245fa in 2.3 mm tube”. Int. J. of Heat and Mass Transfer, v.53, p2459-2469., 2010
- Tibiriçá, C. B.. Estudo teórico-experimental da transferência de calor e do fluxo crítico durante a ebulição convectiva no interior de microcanais, 224p. Tese de Doutorado. USP, São Carlos, Brasil. Universidade de São Paulo, São Carlos., 2011
- Tibiriçá, C. B.; Ribatski, G.. “Análise de dados experimentais e métodos para previsão do coeficiente de transferência de calor em micro-canais”. In: Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e escoamento Multifásico Líquido-Gás, 1., 2008, Florianópolis. 2008. 8 páginas.
- Tibiriçá, C. B, Ribatski, G., and Thome, J. R.. Flow boiling characteristics for R1234ze(E) in 1.0 and 2.2 mm circular channels. Journal of Heat Transfer, v. 134, p. 020906., 2012