



UMA CORRELAÇÃO PARA O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM EBULIÇÃO NUCLEADA

Gherhardt Ribatski

José M. Saiz Jabardo

Departamento de Engenharia Mecânica

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo

Cx. P. 61222 – 13560-250 – São Carlos, SP, Brasil

Resumo. *A transferência de calor através do mecanismo de ebulição nucleada é um fenômeno complexo. Assim, devido ao grande número de parâmetros físicos envolvidos, torna-se difícil o desenvolvimento de uma correlação para o coeficiente de transferência de calor. Alguns autores adotaram uma atitude pragmática, determinando o coeficiente de transferência de calor como função, apenas, de propriedades reduzidas primitivas. Entre as correlações propostas segundo essa linha destacam-se as de Gorenflo e Cooper. Estas correlações foram comparadas com resultados experimentais determinados para os seguintes refrigerantes halogenados: R-11, R-113 e R-114, concluindo ser aquela proposta por Cooper a que mais se adequou aos resultados experimentais. A correlação proposta por Gorenflo inclui o problema de um fator numérico específico para cada fluido. Leiner modificou a correlação de Gorenflo determinando este fator como uma função de parâmetros físicos conhecidos do fluido. No presente trabalho, esta função foi analisada para refrigerantes halogenados. A correlação proposta foi determinada como função dos seguintes parâmetros: pressão reduzida, fator acêntrico, fator de compressibilidade crítico e calor específico adimensionalizado do vapor. A correlação apresentou resultados satisfatórios ao ser comparada com os resultados experimentais.*

Palavras chaves: *Ebulição nucleada, transferência de calor, mudança de fase, refrigerantes halogenados*

1. INTRODUÇÃO

Desde o levantamento da curva de ebulição por Nukiyama (1934), a ebulição nucleada tem sido objeto de um elevado número de publicações. Grande parte destes trabalhos dedica-se à determinação de correlações para o coeficiente de transferência de calor. Na literatura constata-se a ocorrência de dois tipos básicos de correlações: as **semi-empíricas**, como as propostas por Rohsenow (1951), Mikic & Rohsenow (1969), Foster & Zuber (1955), Benjamin & Balakrishnan

(1996) e Haider & Webb (1998), e as **empíricas**, destacando-se entre estas as de Cooper (1984), Stephan & Abdelsalan (1979), Gorenflo (1993) e Leiner (1995).

As correlações semi-empíricas consistem em modelos físicos ajustados a resultados experimentais através de coeficientes numéricos. Entre os mecanismos físicos considerados pelos autores encontram-se os seguintes: a **agitação de líquido** junto a parede, resultante do desprendimento das bolhas; **evaporação de uma microcamada** de líquido superaquecido na base das bolhas; **efeitos de termocapilaridade**, resultantes de gradientes de temperatura ao longo da interface das bolhas; **efeitos de micro-convecção**, resultantes do deslocamento de líquido causado pelo crescimento das bolhas, ou devido à micro vórtices gerados no seu desprendimento; **substituição da camada aquecida** junto a parede por líquido frio que se desloca para a região da parede em virtude do desprendimento das bolhas, sendo posteriormente aquecido por um mecanismo de condução transitória; **evaporação na linha de contato triplo**, localizada na base da bolha, correspondendo à região de contato das três fases: sólido, líquido e vapor. A evaporação nesta região tem sido o objetivo de estudos recentes, com seus mecanismos sendo ainda pouco conhecidos. Tais correlações, embora se apresentem como generalizadas, aplicam-se, na maioria dos casos, a situações particulares, características das condições operacionais dos ensaios para os quais foram ajustadas. Como regra geral, os modelos descrevem parcialmente os mecanismos físicos do processo, uma vez que a transferência de calor na ebulição nucleada é resultado da ação concomitante de vários mecanismos. Dependendo de condições tais como a intensidade de fluxo de calor, pressão, ângulo de contato entre a superfície e o líquido em ebulição, sub-resfriamento, etc, um ou mais mecanismos podem ser dominantes. Isto explica porque alguns modelos se ajustam perfeitamente a certas condições, não sendo adequados à outras.

As correlações empíricas podem constituir-se de ajustes de curvas associados a uma análise dimensional, como a de Stephan & Abdelsalan (1978), ou tomarem por base uma extensão da Lei dos Estados Correspondentes aplicada às propriedades dos fluido no estado de saturação. Neste tipo de correlação, o coeficiente de transferência de calor é função apenas de propriedades reduzidas primitivas: pressão, p_r e temperatura, T_r . Embora não incorporem qualquer mecanismo físico, tais correlações caracterizam-se pela simplicidade e relativa precisão.

2. CORRELAÇÕES BASEADAS EM PROPRIEDADES REDUZIDAS

Embora uma série de trabalhos envolvendo a correlação do coeficiente de transferência de calor na ebulição nucleada em termos de propriedades reduzidas tenham sido publicados no passado, o de Cooper (1984) foi o primeiro a formalizar essa abordagem. O referido autor observa que, tanto as correlações semi-empíricas como as empíricas, são constituídas, basicamente, pelo produto de propriedades de transporte do fluido, líquido ou vapor, à temperatura de saturação. Uma análise dessas propriedades, realizada para a água, permitiu o estabelecimento de relações para as mesmas em termos de p_r e T_r . Deste modo, através de análise de regressão aplicada à resultados experimentais, Cooper desenvolveu a seguinte correlação para o coeficiente de transferência de calor:

$$\frac{h}{\left(\frac{q}{A}\right)^{0,67}} = 55 \cdot p_r^{0,12-0,2 \log R_p} \cdot (-\log p_r)^{-0,35} \cdot M^{-0,5} \quad (1)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor, q/A o fluxo de calor específico, M a massa molecular e R_p a rugosidade aritmética média da superfície de aquecimento.

Gorenflo et al. (1993) desenvolveram uma correlação para o coeficiente de transferência de calor em termos da pressão de saturação, do fluxo de calor específico, e do superaquecimento da parede, conforme a seguinte equação:

$$\frac{h}{h_0} = \left(1,2 \cdot p_r^{0,27} + 2,5 \cdot p_r + \frac{p_r}{1 - p_r} \right) \cdot \left[\frac{(q/A)}{(q/A)_0} \right]^n \cdot \left(\frac{R_p}{R_{p0}} \right)^{0,133} \cdot \left(\frac{k_p \cdot \rho_p \cdot cp_p}{k_0 \cdot \rho_0 \cdot cp_0} \right)^{0,5} \quad (2)$$

onde: $n = 0,9 - 0,3 \cdot p_r^{0,3}$

O coeficiente de transferência de calor de referência, h_0 , segundo a norma ISO 4287/01, é determinado para um tubo de cobre de $R_{p0} = 0,4 \mu m$, com pressão de referência de $p_{r0} = 0,1$ e fluxo de calor de 20 kW/m^2 . As propriedades de transporte: condutividade térmica, k , densidade, ρ , calor específico à pressão constante, cp , são afetadas dos índices 0 ou p , correspondendo, respectivamente, ao cobre ou ao particular material da parede. Valores de h_0 para alguns refrigerantes halogenados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Valores do coeficiente de transferência de de referência, h_0 , para alguns refrigerantes halogenados, segundo Gorenflo et al (1993).

Fluido	h_0 (W/m ² .K)	Fluido	h_0 (W/m ² .K)	Fluido	h_0 (W/m ² .K)	Fluido	h_0 (W/m ² .K)
R-11	2800	R-22	3900	R-115	4200	R-226	3700
R-12	4000	R-23	4400	R-123	2600	R-227	3800
R-13	3900	R-113	2650	R-134a	4500	RC-318	4200
R-13B1	3500	R-114	3800	R-152a	4000	R-502	3300

A Fig. 1 apresenta os desvios das correlações de Cooper (1984) e Gorenflo et al (1993) em relação aos resultados experimentais de Silva (1989). Estes envolveram os refrigerantes R11,

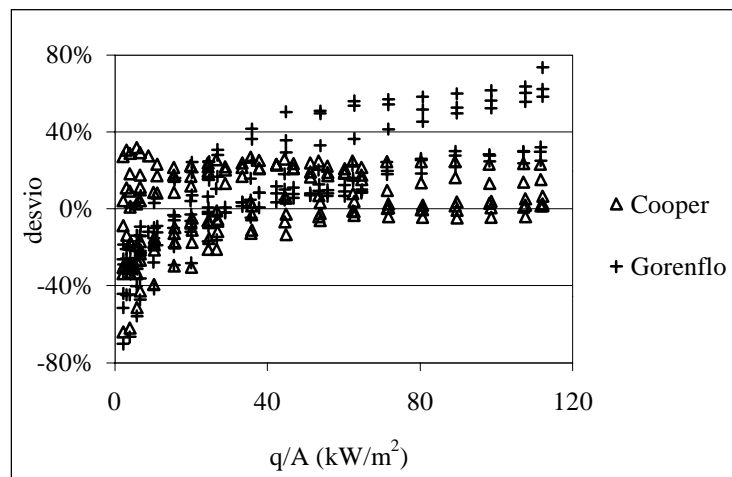


Figura 1 - Comparação das correlações de Cooper e Gorenflo com os resultados experimentais de Silva (1989)

R113 e R114, para diferentes valores de p_{sat} , mudando de fase em uma superfície tubular de latão, cuja rugosidade média foi estimada como sendo igual a $2,3\mu\text{m}$. Verifica-se que a correlação de Cooper correlaciona melhor os resultados experimentais. Deve-se notar, ainda, que os desvios para fluxos de calor reduzidos são excessivos, resultado de efeitos de convecção natural, não considerados pelas correlações. As correlações de Cooper (1984), Gorenflo et al (1994) e Stephan & Abdelsalan (1979) proporcionaram, respectivamente, os seguintes desvios médios relativos aos resultados experimentais de Silva (1989): 15,76%, 23,57% e 50%.

O desvio aritmético médio foi definido neste trabalho como:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(\text{valor experimental})_i - (\text{valor calculado})_i}{(\text{valor experimental})_i} \right| \quad (3)$$

Leiner (1994), com base na Eq. (2), determinou uma correlação na qual a constante experimental, h_0 , é função de parâmetros adimensionais específicos do líquido. Os parâmetros adotados foram os seguintes: **fator de compressibilidade crítico**, z_c ; **calor específico adimensional**, $Cp_l = cp_l/R$; **parâmetro de “pressão do vapor”**, caracterizando o coeficiente angular da curva de pressão de saturação em função da temperatura (Clausius-Clapeyron);

$K \equiv \left[\frac{h_{lv}}{R \cdot T_c} \right]_{p_r \ll 1}$. Admitindo que a adimensionalização dos parâmetros proporciona uma “similaridade termodinâmica”, os termos q/A , h e Rp da Eq.(2) foram individualmente adimensionalizados e os restantes, excluindo o fator relativo a p_r , foram escritos como uma função de Cp_l , z_c e K , resultando a seguinte equação:

$$\frac{h}{p_c \cdot \left(\frac{R}{T_c} \right)^{1/2}} = 0,4368 \cdot Cp_l^{0,2113} \cdot K^{-0,0521} \cdot z_c^{-0,9166} \cdot 43000^{n-n_0} \cdot \left(1,2 \cdot p_r^{0,27} + 2,5 \cdot p_r + \frac{p_r}{1-p_r} \right) \cdot \left[\frac{q/A}{p_c \cdot (R \cdot T_c)^{1/2}} \right]^n \cdot \left[\frac{R_p}{\frac{R \cdot T_c \cdot M}{N \cdot p_c}} \right]^{0,133} \quad (4)$$

onde :

$$n - n_0 = 0,15 - 0,3 \cdot p_r^{0,3}$$

Na adimensionalização, foram utilizadas as seguintes propriedades: temperatura crítica, T_c , pressão crítica, p_c , constante do gás, R , constante de Avogadro, N , e a massa molecular, M . Segundo o autor, a Eq.(4) apresentou desvio aritmético médio igual à $\pm 13,6\%$ quando comparada aos resultados determinados pela Eq. (2), para 45 fluidos, cujo valor de h_0 foram tabelados por Gorenflo et al.

3. DESENVOLVIMENTO DA CORRELAÇÃO

3.1. Descrição dos resultados experimentais

Os resultados experimentais obtidos por Silva (1989) foram utilizados como referência no presente estudo. As condições operacionais relativas àqueles ensaios estão apresentadas de forma

sumária na Tabela 2. A superfície era constituída de um cilindro de latão de 14,2 mm de diâmetro e 7 mm de espessura, sendo aquecida eletricamente por resistências de cartucho inseridas no interior. Segundo o autor, considerando o tratamento superficial aplicado, a rugosidade aritmética média apresentava valores entre 0,4 e 4,6 μm . Para efeitos de análise adotou-se o valor de 2,3 μm . Os dados experimentais relativos ao coeficiente de transferência de calor são limitados e não permitem uma análise do efeito do diâmetro e material do tubo, razão pela qual tais parâmetros não serão incluídos na presente análise.

Tabela 2. Condições experimentais que serviram de base para o presente estudo.

Refrigerante	Autor	T_{sat} ($^{\circ}\text{C}$)		
R-11	Silva	30,7	36,1	40,0
R-113	Silva	47,5	60,0	70,0
R-114	Silva	6,0	14,0	24,0

Na seleção dos dados experimentais foram eliminados pontos não representativos do fenômeno caracterizados por efeitos de convecção natural e histerese. Esta consiste em curvas de ebulição diferenciadas entre aquecimento (elevação de fluxo de calor) e resfriamento (redução de fluxo de calor) quando a superfície é aquecida a partir de uma condição de inatividade. Tal histerese ocorre em virtude da maior “energia” de ativação dos núcleos de vapor durante o aquecimento inicial. Uma vez ativados, os núcleos permanecem nessa condição, razão pela qual, durante o resfriamento, a curva de ebulição se apresenta acima daquela de aquecimento. Como durante a operação normal da superfície aquecida as cavidades permanecem ativas, os pontos experimentais considerados foram aqueles correspondentes à curva de ebulição obtida pela redução do fluxo de calor a partir de um valor máximo. É interessante notar que curvas de ebulição correspondentes a aquecimentos e resfriamentos posteriores, sem desativação da superfície aquecida, não apresentam histerese.

3.2. Apresentação e discussão dos parâmetros

Com o objetivo de caracterizar possíveis diferenças no comportamento relativo de distintos fluidos, como regra geral, as correlações baseadas em propriedades reduzidas incorporam algum fator dependente do particular fluido. Cooper (1984) adotou a massa molecular, embora Ribatski (1998) tenha verificado que, para refrigerantes halogenados, o coeficiente de transferência de calor não é significativamente afetado por tal parâmetro, razão pela qual não será incorporado na presente análise. Gorenflo et al. (1993) definiram, como observado anteriormente, o parâmetro experimental, h_0 . Leiner (1994) obteve resultados satisfatórios ao avaliar h_0 em termos de z_c , Cp_l e K . O autor sugeriu, ainda que, para trabalhos futuros Cp_l fosse substituído por Cp_v .

Considerando h_0 um parâmetro representativo do fluido, a possibilidade de determiná-lo através de uma equação constituída por propriedades específicas do fluido, sugere a obtenção de uma correlação genérica. Desta forma, com base na metodologia de Leiner (1994), foi analisada a validade na determinação de h_0 , para refrigerantes halogenados, como função dos seguintes parâmetros:

- Fator de compressibilidade crítica, z_c caracterizando o fluido.
- Fator acêntrico de Pitzer, ω , determina o afastamento de um campo de forças simetricamente esférico (argônio, neônio e metano), sendo definido como: $\omega = [-\log_{10}(p_r) - 1,000]_{Tr=0,7}$.

- Calores específicos adimensionais do líquido, Cp_l , e do vapor $Cp_v = cp_v/R$. Para gases perfeitos, tanto os calores específicos a pressão como a volume constantes são funções exclusivas da temperatura. Este comportamento não é verificado para líquido e vapor à temperatura de saturação. Desta forma, a introdução destes parâmetros estaria associada ao afastamento do comportamento de gás perfeito.

Considerando estes parâmetros e através de regressão dos dados da Tabela 1 para h_0 , foram determinadas as correlações da Tabela 3 com seus respectivos desvios médios em relação aos valores originais. Como se observa nesta tabela, tais correlações envolvem distintos grupos adimensionais.

Tabela 3. Correlações para determinação de h_0

Eq. (Nº)	Equação	$\bar{\lambda}$
5	$h_0 = 10^{1,94} \cdot z_c^{-2,74}$	15,12%
6	$h_0 = 10^{0,76} \cdot z_c^{-6,57} \cdot \omega^{-0,844}$	9,45%
7	$h_0 = 10^{1,59} \cdot z_c^{-3,97} \cdot \omega^{-0,256} \cdot Cp_v^{-0,495}$	4,58%

A Eq. (7) foi a que apresentou melhores resultados, confirmando a possibilidade de determinação de h_0 como função dos parâmetros mencionados. A utilização do calor específico adimensional do vapor permitiu, no presente estudo, uma melhora significativa na correlação de h_0 , quando comparada a correlação com Cp_l . É interessante destacar que, a introdução do calor específico adimensional do líquido resultou num incremento da precisão desprezível.

3.3. Metodologia adotada

Ribatski (1998) através de manipulação algébrica, transformou algumas correlações da literatura de tal forma que resultassem formas em termos de p_r e T_r . Estas versões apresentaram desvios máximos em relação à forma original inferiores a 1%. Embora Cooper tenha optado por uma forma simplificada, envolvendo apenas a pressão reduzida, considerando que, por tratar-se de condições de equilíbrio entre as fases líquido e vapor, p_r e T_r são dependentes, os resultados obtidos por Ribatski (1998) indicaram que os desvios proporcionados por uma correlação envolvendo p_r e T_r são inferiores. Assim, optou-se, inicialmente, por uma correlação envolvendo ambos os termos.

A partir da década de 50, diversos estudos concluíram que a rugosidade altera o número de cavidades ativas, alterando, conseqüentemente, o desempenho térmico da superfície. Bier et al (1979) investigaram a influência da rugosidade no coeficiente de transferência de calor para valores de p_r variando entre 0,004 e 0,91, para os refrigerantes R-11 e R-115. Os autores não conseguiram determinar um parâmetro que descrevesse a relação entre o coeficiente de transferência de calor e a rugosidade, válido para toda a faixa de pressão investigada. Alguns autores, como Stephan & Abdelsalan (1978) e Gorenflo et al.(1993), admitiram o efeito da rugosidade como um simples múltiplo de $h/(q/A)^m$. Conclusão não compartilhada por Cooper (1984) e Nishikawa et al (1984), uma vez que, baseados em resultados experimentais, tais autores concluíram que com a redução de p_r o efeito da rugosidade torna-se mais pronunciado. Para efeito de simplificação, a rugosidade foi considerada como o único parâmetro característico da superfície. Deste modo, considerando que o incremento da rugosidade resulta em uma melhora

do desempenho térmico da superfície, admitindo a relação entre p_r e e a rugosidade na determinação do coeficiente de transferência de calor e considerando que os dados experimentais foram determinados para um único valor de R_p , adotou-se a forma de Cooper (1984), onde a influência deste fator é caracterizada por $p_r^{-0,2 \cdot R_p}$.

Tendo em vista a necessidade de levar em conta as características específicas do fluido, não incorporadas por uma correlação baseada apenas em propriedades primitivas na sua forma reduzida (p_r , T_r), h_0 , dado pela Eq. (7), foi introduzido na correlação. Assim, a correlação proposta assumiria a seguinte forma generalizada:

$$\frac{h}{\left(\frac{q}{A}\right)^m} = Cte \cdot z_c^{-3,97} \cdot \omega^{-0,256} \cdot Cp_v^{0,485} \cdot p_r^{a-0,2 \cdot R_p} \cdot T_r^b \cdot (1-T_r)^c \quad (8)$$

Uma regressão múltipla, com base nos resultados experimentais de Silva (1989), proporcionou os seguintes valores para o coeficiente e os expoentes:

$$\frac{h}{\left(\frac{q}{A}\right)^{0,598}} = 10^{4,851} \cdot z_c^{-3,97} \cdot \omega^{-0,256} \cdot Cp_v^{0,485} \cdot p_r^{-0,289-0,2 \cdot R_p} \cdot T_r^{24,3} \cdot (1-T_r)^{5,57} \quad (9)$$

onde h e q/A possuem respectivamente as seguintes dimensões: $W/m^2 \cdot K$ e W/m^2 .

A correlação proposta apresentou um desvio médio em relação aos dados experimentais de 8,29%. A Fig. 2 apresenta uma comparação entre os dados experimentais e os determinados pela Eq. (9).

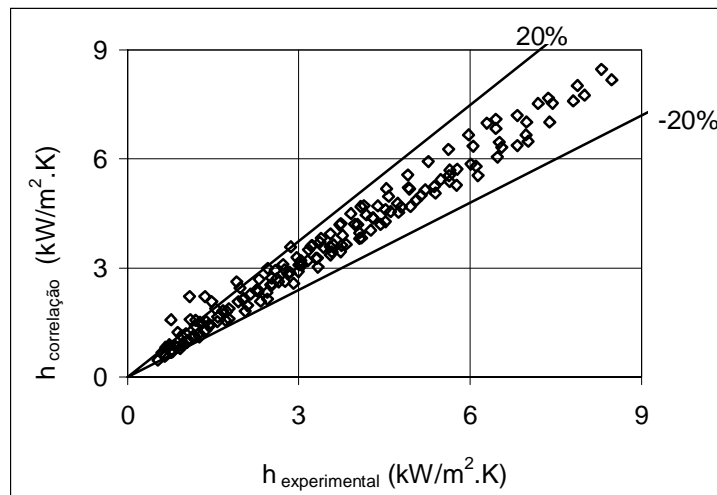


Figura 2 – Comparação da Eq. (9) com resultados experimentais.

Nessa figura constata-se que os resíduos localizam-se consistentemente dentro de uma faixa de $\pm 20\%$ em torno dos valores experimentais, com exceção na região de reduzidos coeficientes de transferência de calor. Este resultado já era esperado, sendo decorrente de efeitos de convecção

natural, associados a fluxos de calor reduzidos, condições em que ocorre a denominada ebulição nucleada parcial.

4. COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA

Os resultados experimentais de Jensen (1985) foram comparados com os fornecidos pela Eq.(9), apresentando um desvio médio da ordem de 13,2%. A Fig.3 ilustra a referida comparação. Os resultados de Jensen (1985) foram determinados para uma superfície tubular de aço inoxidável, de diâmetro externo igual a 12,7 mm, atuando como resistência elétrica de aquecimento. O refrigerante utilizado foi o R-113, para uma pressão de saturação ao redor de 97 kPa.

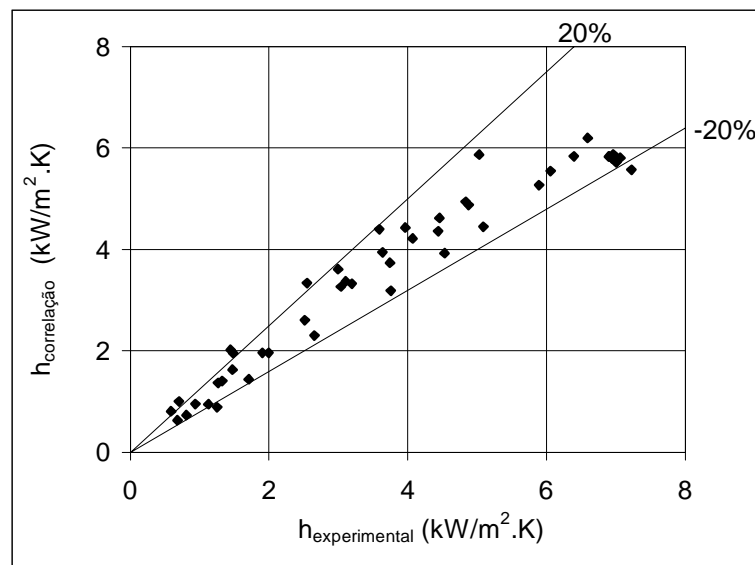


Figura 3- Comparação da Eq. (9) com os resultados experimentais de Jensen (1985).

Para efeito de comparação, a rugosidade média da superfície aquecida foi assumida igual a $R_p = 4.3\mu\text{m}$, valor característico de superfícies consideradas lisas. Caso se adotasse outro valor, a diferença entre os resultados experimentais e os da correlação seria de apenas uma constante multiplicativa, considerando que Jensen (1985) obteve dados experimentais para um único valor de p_r . Finalmente, embora satisfatórios, os resultados obtidos não podem ser reputados de conclusivos, uma vez que os resultados experimentais utilizados não cobrem uma faixa ampla de condições experimentais e de fluidos. Entretanto, sugerem que o procedimento adotado é promissor e merece ser investigado em maior profundidade.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho proporcionou o desenvolvimento de uma correlação para o coeficiente de transferência de calor em ebulição nucleada plenamente desenvolvida de refrigerantes halogenados. Tal correlação incorpora propriedades adimensionais específicas de cada fluido,

propriedades reduzidas primitivas (p_r , T_r) e a rugosidade superficial, tendo apresentado resultados satisfatórios. O estudo, por outro lado, propiciou as seguintes conclusões:

- Foi confirmada a possibilidade de determinação dos coeficientes de transferência de calor de referência, de Gorenflo et al.(1993), em termos de adimensionais característicos do fluido.
- Conforme sugerido por Leiner (1994), foi comprovada a melhor correlação entre h_0 e os adimensionais característicos do fluido, com a utilização de Cp_v ao invés de Cp_l .
- A correlação proposta, apesar de satisfatória, deve ser contrastada com resultados experimentais mais abrangentes, que incluam amplas faixas de pressão e características superficiais, além de um número mais significativo de refrigerantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio concedido ao presente estudo.

REFERÊNCIAS

- Benjamin, R. J. & Balakrishnan, A. R.,1996, Nucleate pool boiling heat transfer of pure liquids at low to moderate heat fluxes, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 39 , n.12, pp. 2495-2504.
- Bier, K., Gorenflo, D., Salem, M. e Tames, Y.,1978, Pool boiling heat transfer and size of active nucleate centres for horizontal plates with different roughnesses, Proceedings of the 6th Int. Heat Transfer Conf., vol. 1, pp.151-156.
- Cooper, M. G.,1984, Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling - A wide ranging examination using reduced properties, Advances in Heat Transfer, vol. 16, pp.157-238.
- Foster, H. K. & Zuber, N.,1955, Bubble dynamics and boiling heat transfer, AIChE Journal, vol.1, n. 4, pp. 531-535.
- Gorenflo, D., Caplanis, S. e Künstler, W.,1993, Enhanced pool boiling heat transfer to new refrigerants, Proceedings of the International Conference Energy Efficiency in Refrigeration and Global Warming Impact. Commission B1/2. International Institute of Refrigeration. University of Ghent, Belgium. pp. 327-334.
- Haider, S.I. & Webb, R.L.,1998, A transient micro-convection model of nucleate pool boiling, Journal of Heat Mass Transfer, vol.40, n.15, pp. 3675-3688.
- Jensen, M. K.,1985, Resultados experimentais em ebulição nucleada, Comunicação pessoal. College of Engineering and Applied Science, The University of Wisconsin- Milwaukee, Milwaukee, Wisconsin.
- Leiner, W.,1994, Heat transfer by nucleate pool boiling- general correlation based on thermodynamic similarity, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 20, pp.233-245
- Mikic, B. B. & Rohsenow, W. M.,1969, A new correlation of pool-boiling data including the effect of heating surface characteristics, Journal of Heat Transfer , vol.91, pp.245-250.
- Nishikawa, K. & Fujita, Y.,1977, Correlation of nucleate boiling heat transfer based on bubble population density, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 20, pp.61-66.
- Nishikawa, K., Fujita, Y., Uchida, S. e Ohta, H.,1984, Effect of surface configuration on nucleate boiling heat transfer, vol. 27, pp. 1559-1571.
- Nukiyama, S.,1934, reeditado em 1966, The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure, Int. J. Heat Mass Transfer, vol.9, pp.1419-1433.

- Ribatski, G.,1998, Estudo da transferência de calor em ebulição nucleada de refrigerantes halogenados, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- Rohsenow, W.M., 1951, A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids, Transactions of the ASME , n. 48, aug., pp.969-976.
- Silva, C. L.,1989, Investigação experimental da ebulição de misturas refrigerante-óleo, São Paulo, Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- Stephan, K. & Abdelsalam, M.,1978, Heat-transfer correlations for natural convective boiling, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 23, pp.73-87.

A CORRELATION TO THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN NUCLEATE BOILING

***Abstract.** Nucleate boiling heat transfer is a complex phenomenon, making the development of a correlation for the heat transfer coefficient rather cumbersome due to the number of physical parameters involved in it. Some authors have followed a pragmatic approach to the problem by correlating the heat transfer coefficient in terms of reduced primitive properties. Two of the most knowledgeable authors who have followed this approach are Gorenflo and Cooper. Comparisons have been performed among results from the correlations proposed by these researchers and experimental results obtained elsewhere for refrigerants R-11, R-113 and R-114. These comparisons have shown that Cooper's correlation is best fitted for halocarbon refrigerants. The correlation proposed by Gorenflo adds the difficulty of including a numerical factor specific for each fluid. Leiner modified Gorenflo's correlation to determine the numerical factor as a function of known physical parameters of the fluid. In present study, the form of this function has been investigated for halocarbon refrigerants. The obtained correlation is written in terms of the following parameters: reduced pressure, eccentric and compressibility factors at the critical state, and a dimensionless specific heat of the vapor phase. The correlation compares well with experimental results.*

***Key-words:** Nucleate boiling, heat transfer, phase change, halocarbon refrigerant.*