

ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DO MECANISMO DE EBULIÇÃO NUCLEADA PARA OS REFRIGERANTES R11 E R113 EM UMA SUPERFÍCIE CILÍNDRICA DE COBRE

Gherhardt Ribatski – ribatski@sc.usp.br

Samuel Freire de Barros – samuel@sc.usp.br

Evandro Fockink da Silva – fockink@usa.net

José M. Saiz Jabardo – mjabardo@sc.usp.br

Laboratório de Refrigeração – Departamento de Engenharia Mecânica

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo

Av. do Trabalhador São-carlense, 500 13560-120 – São Carlos - SP

***Resumo.** O coeficiente de transferência de calor através do mecanismo de ebulição nucleada foi determinado experimentalmente para os refrigerantes R11 e R113. Estes dados foram obtidos em uma superfície cilíndrica de cobre posicionada horizontalmente de 19 mm de diâmetro, imersa em um banho de refrigerante saturado, envolvendo fluxos de calor de no máximo 100 kW/m^2 , na faixa do regime de ebulição nucleada completamente desenvolvida. Constatou-se, a elevação no coeficiente de transferência de calor com a pressão de saturação e a influência da pressão no expoente do termo fluxo de calor, admitido como constante em um grande número de correlações. Os resultados foram comparados a correlações da literatura, verificando-se que a proposta por Cooper foi a mais adequada.*

***Palavras-chave:** Ebulição nucleada, Refrigerantes halogenados, Transferência de calor.*

1. INTRODUÇÃO

O estudo da transferência de calor através do mecanismo de ebulição nucleada foi iniciado a mais de 70 anos, com os trabalhos pioneiros de Fritz e Emde, Bonsjakovic e Nukiyama. A partir daí inúmeros pesquisadores tem se dedicado a este assunto, levantando resultados experimentais, propondo modelos baseados em mecanismos físicos que justificariam a intensificação observada na transferência de calor relativamente a condições correspondentes sem mudança de fase. Apesar das pesquisas realizadas, a ebulição nucleada, ainda é um fenômeno pouco conhecido, devido a sua complexidade e ao número elevado de variáveis que a influenciam, tais como, pressão, propriedades de transporte do refrigerante, condições da superfície, temperatura de ebulição, impurezas, etc. Isto faz com que resultados experimentais determinados por diferentes autores para condições, aparentemente, semelhantes apresentem diferenças consideráveis. Dentro deste contexto, este trabalho apresenta resultados experimentais para a taxa de transferência de calor em ebulição nucleada plenamente desenvolvida em uma superfície cilíndrica de cobre com rugosidade aritmética

média (R_a) igual a $0,52\mu\text{m}$, para os refrigerantes R11 e R113 envolvendo uma faixa de pressões reduzidas (p_r) de 0,011 a 0,1. Estes resultados são comparados com correlações da literatura.

2. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o levantamento dos resultados experimentais foi desenvolvida uma bancada experimental que permite o controle da temperatura de saturação de um banho de refrigerante. Inundada neste banho encontra-se a superfície de testes, constituída de um tubo de cobre de diâmetro externo e espessura de parede respectivamente igual a 19,0 e 3,1 mm. O aquecimento da superfície era proporcionado por uma resistência elétrica tipo cartucho com comprimento de 210 mm e diâmetro de 12,7 mm, instalada no seu interior. A temperatura do banho foi determinada nas regiões inundada e seca por intermédio de termopares blindados do tipo T (cobre-constantan). Os resultados fornecidos por estes termopares (embora possam apresentar pequena diferença devido ao efeito de coluna do refrigerante) podem ser contrastados com a temperatura de saturação, avaliada por intermédio da pressão, determinada por um transdutor. Na medida da temperatura superficial foram utilizados oito termopares tipo T, bitola 30AWG, distribuídos em três seções transversais ao longo da parede do tubo, alojados em canais abertos por eletro-erosão na superfície interna do tubo e fixados com uma resina epoxi condutora térmica, conforme ilustrado na Fig. 1. A medida da potência elétrica e, indiretamente, do fluxo de calor, foi efetuada por um transdutor de potência ativa. Os sinais elétricos resultantes dos transdutores foram processados por um sistema de aquisição de dados.

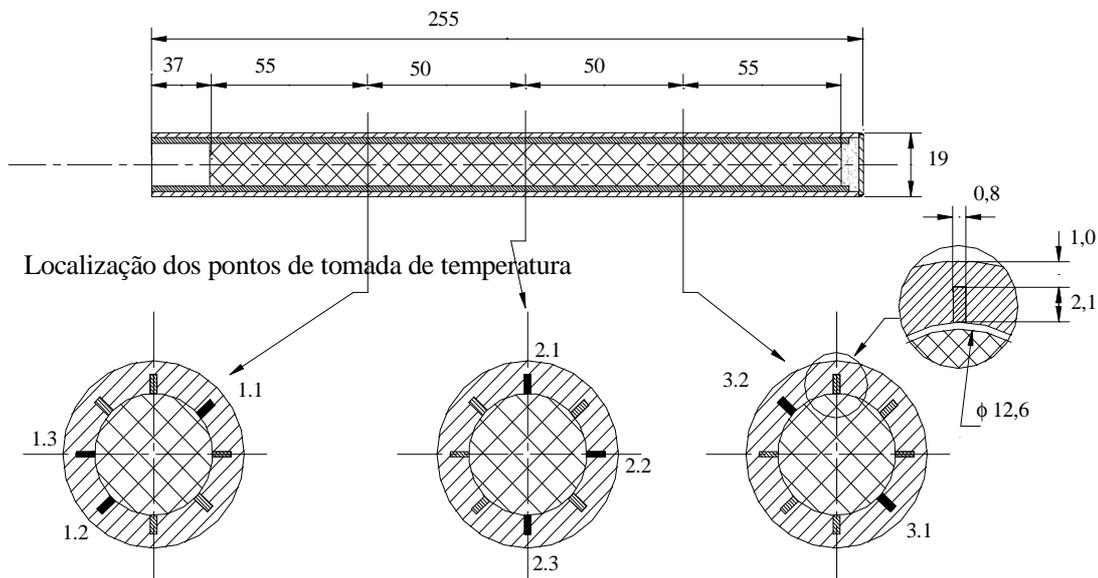


Figura 1 – Superfície de testes

A temperatura de saturação, T_{sat} , foi avaliada como sendo a média aritmética dos valores obtidos nos termopares blindados. A temperatura da parede, T_p , foi avaliada pela média das temperaturas da seção central do tubo. Este valor foi corrigido para considerar o efeito de

resistência térmica da parede do tubo. As temperaturas medidas nas demais seções foram utilizadas na verificação de efeitos de condução longitudinal, considerados desprezíveis na seção central. O fluxo de calor foi referido a área da superfície exterior do tubo. O acabamento superficial foi obtido por intermédio de uma lixa d'água N° 200. Este tratamento superficial forneceu uma rugosidade aritmética média de 0,52µm. Considerando os erros causados pelos procedimentos adotados e instrumentos de medida, foi realizada uma análise de incertezas. Na calibração dos termopares e do sistema de medição de potência foi adotado o procedimento sugerido por Abernethy & Thompson (1973). As medidas de R_a foram tomadas em 10 diferentes locais da superfície de testes, apresentando, para um intervalo de confiança de 95%, uma incerteza de 0,08µm. Na Tabela 1 são indicadas as incertezas dos parâmetros físicos medidos.

Tabela 1 - Incerteza dos parâmetros medidos

Parâmetros	Incertezas
fluxo mínimo de calor $q/A=2,4\text{kW/m}^2$	$\pm 2,61\%$
fluxo máximo de calor $q/A=140\text{kW/m}^2$	$\pm 1,16\%$
superaquecimento da parede, (T_p-T_{sat}) , para o fluxo mínimo de calor	$\pm 0,2\text{ K}$
superaquecimento da parede, (T_p-T_{sat}) , para o fluxo máximo de calor	$\pm 0,3\text{ K}$
temperatura de saturação	$\pm 0,15\text{K}$
área de transferência de calor	$\pm 0,26\%$

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais foram levantados para as pressões reduzidas especificadas na Tabela 2. Esta tabela também apresenta o coeficiente, c , o expoente, n , da regressão dos dados experimentais desenvolvida para uma equação do tipo: $h = c \cdot \phi^n$, com coeficiente de correlação, R^2 , superior a 99,9%, onde h é o coeficiente de transferência de calor definido como: $h = \phi / (T_p - T_{sat})$ e ϕ o fluxo específico de calor.

Tabela 2 –Regressão dos resultados experimentais

p_r	R11		R113	
	c	n	c	n
0,011	0,4091	0,8025	0,5783	0,7598
0,023	0,7762	0,7525	3,322	0,6261
0,035	1,064	0,7480	4,229	0,6137
0,063	1,248	0,7401	11,84	0,5401
0,093	2,236	0,6935	17,76	0,5134
0,120	2,392	0,6934	---	---

A Figura 2 ilustra, comparativamente, resultados para o R11 e R113, durante a redução do fluxo de calor, eliminando, desta forma, efeitos de histerese. Verifica-se a redução no superaquecimento da superfície, (T_p-T_{sat}) , para um mesmo nível de ϕ , com o incremento de p_r . Ou seja, a taxa de transferência de calor eleva-se com a pressão. Esta tendência se intensifica para valores reduzidos de p_r , conforme pode ser observado com maior destaque na Fig.3. Na Fig. 2, observa-se, também, que, o refrigerante R11 se caracteriza por uma taxa de

transferência de calor superior a do R113 para o mesmo superaquecimento de parede. Este comportamento coincide com o verificado por Cooper (1984) em seu banco de dados, e incluído em sua correlação, Eq.(1), onde fluidos com maior peso molecular apresentaram menores coeficientes de transferência de calor para condições semelhantes de ϕ e p_r . Este comportamento segundo, Ribatski & Jabardo (2000) no caso de correlações desenvolvidas para refrigerantes halogenados, pode ser substituído por uma função da pressão crítica, variável já incorporada ao modelo de Cooper (1984), através da pressão reduzida.

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

onde M, é a massa molecular, e R_p a máxima altura de pico em relação ao perfil.

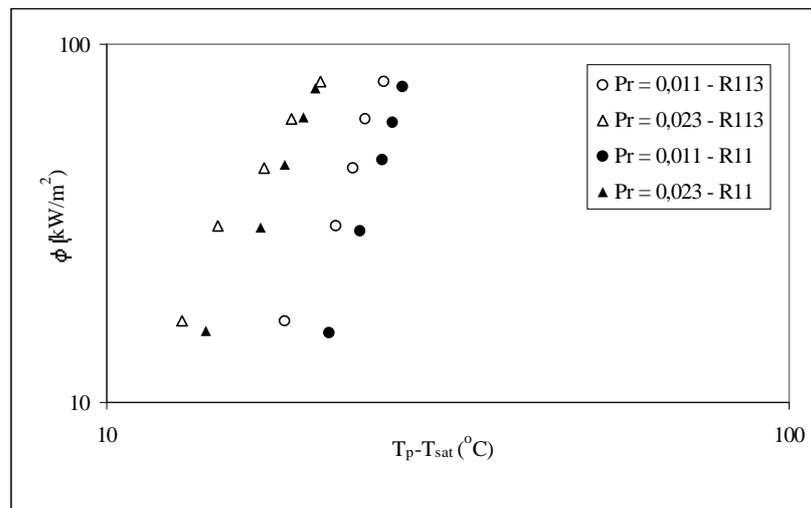


Figura 2 – Comparação da curvas de ebulição para o R11 e R113.

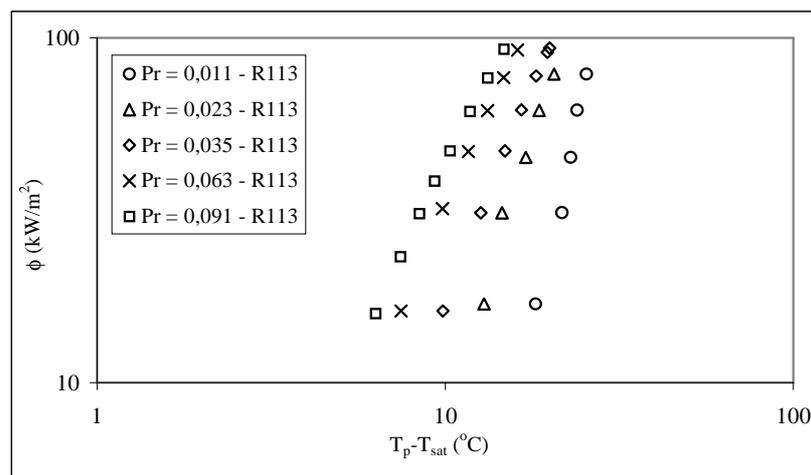


Figura 3 – Curvas ilustrativas do efeito de p_r na inclinação da curva de ebulição.

Na Fig. 3, destaca-se a alteração da inclinação das curvas com a pressão reduzida. Tal comportamento corresponde a influência de p_r no coeficiente angular da curva e, conseqüentemente, no expoente de ϕ . É interessante destacar que, correlações da literatura

usualmente utilizadas, como as de Rohsenow (1951), Stephan & Abdelsalan (1978) e Cooper (1984), adotam um valor constante para o expoente de ϕ . Já, Gorenflo *et al.* (1994), além de incluir o efeito de p_r no expoente, conforme Eq. (2), sugerem o efeito da rugosidade para correlações que envolvam amplas faixas de pressões de saturação e superfícies com grandes diferenças de acabamento. Tais efeitos estariam relacionados ao tamanho das cavidades ativas e a energia de ativação dos núcleos.

$$\frac{h}{h_0} = \left[1,2 \cdot p_r^{0,27} + \left(2,5 + \frac{1}{1-p_r} \right) \cdot p_r^2 \right] \cdot \left(\frac{\phi}{20000} \right)^{0,9-0,3 \cdot p_r^{0,3}} \cdot \left(\frac{R_a}{0,4} \right)^{0,133} \quad (2)$$

Nesta equação, h_0 consiste em um valor de referência para o coeficiente de transferência de calor, definido segundo a norma ISO 4287/01:1984, valendo para os refrigerantes R11 e R113, respectivamente, 2800 e 2650kW/m².

A Fig. 4 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e as correlações de Cooper (1984) e Gorenflo *et al.* (1994). Adotou-se, arbitrariamente, para a Eq.(1), R_p igual a 0,8 μ m, já que o equipamento disponível para determinação da rugosidade permite, apenas, determinar valores de R_a . Este valor foi escolhido por adequar-se melhor aos resultados experimentais. Ambas as correlações reproduzem com razoável precisão os resultados experimentais, apresentando desvios médios, definidos conforme Eq. (3), respectivamente iguais a 10,6 e 12,3%. É interessante destacar que a de Cooper, embora adote um expoente para ϕ constante, resultou a mais adequada, apresentando valores mais próximos aos experimentais.

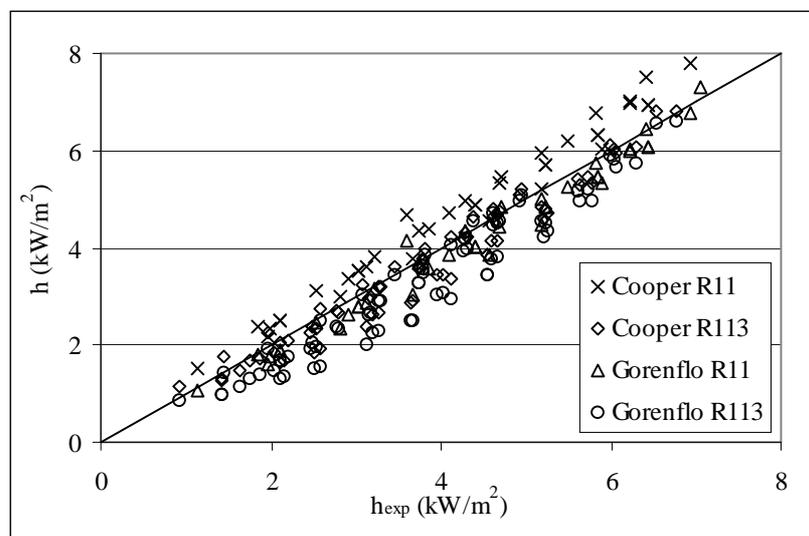


Figura 4 – Comparação dos resultados experimentais com correlações da literatura

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

4. CONCLUSÕES

Os ensaios realizados permitiram levantar as seguintes conclusões:

- ⇒ No regime de ebulição nucleada plenamente desenvolvida, para um mesmo ϕ , ocorre uma redução no superaquecimento com o aumento da pressão. Este comportamento é mais acentuado para baixas pressões reduzidas.
- ⇒ Para um mesmo valor de p_r , o R113 apresenta um coeficiente de transferência de calor inferior ao R11.
- ⇒ O expoente de ϕ é afetado pela a pressão reduzida.
- ⇒ Os resultados obtidos confirmam a afirmação de Thome (1996), segundo o qual a correlação mais precisa na determinação do coeficiente de transferência de calor em ebulição nucleada é a de Cooper (1984).

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo auxílio concedido através de duas bolsas, uma de doutorado e outra de mestrado, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo auxílio concedido através de uma bolsa de doutorado e a empresa Dupont do Brasil pelo apoio dado a presente pesquisa, através da doação de refrigerante. Os autores gostariam de estender seus agradecimentos ao Sr. José Roberto Bogni pela preciosa colaboração no desenvolvimento e construção da bancada experimental. Agradecemos também ao Laboratório de Máquinas Ferramentas (LAMAFE – EESC – USP) pelas medidas de rugosidade superficial.

REFERÊNCIAS

- Abernethy, R. B. & Thompson, J. W., 1973, Handbook, uncertainty in gas turbine measurements, Arnold Engineering Development Center, Arnold Air Force Station, Tennessee.
- 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.
- Gorenflo, D., Luke, A., Künstler, W. e Buschmeier, M., 1994, Prediction of pool boiling heat transfer with new refrigerants, Em : CFC'S THE DAY AFTER, Padova , spt 21-23, pp. 557-563.
- Ribatski, G. & Jabardo, J. M. S., 2000, Nucleate boiling of halocarbon refrigerants: Heat transfer correlations, *Int. Journal of HVAC&R Research*, vol. 6, n.4, pp. 279-297.
- Rohsenow, W.M., 1951, A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids, *Transactions of the ASME*, n. 48, pp. 969-976.
- Stephan, K. & Abdelsalam, M., 1978, Heat-transfer correlations for natural convective boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 23, pp. 73-87.
- Thome, J. R., 1996, Boiling of new refrigerants: a state-of-the-art review, *Int. J. Refrig.*, vol. 19, n. 7, pp. 435-457.
- Webb, R. L. & Pais, C., 1992, Nucleate pool boiling data for five refrigerants on plain, integral-fin and enhanced tube geometries, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 35, n. 8, pp. 1893-1904.

NUCLEATE BOILING HEAT TRANSFER OF REFRIGERANTS R11 E R113 OVER A CYLINDRICAL COPPER SURFACE

Nucleate boiling heat transfer coefficient has been experimentally obtained for refrigerants R-11 and R-113. The boiling surface was a horizontal copper tube of 19 mm diameter immersed in a pool of saturated refrigerant. Operating reduced pressure varied in the range. Heat flux was limited to the range where fully developed nucleate boiling occurs, which in present study was limited to a maximum of 100 kW/m². Results indicate a raising trend of the heat transfer coefficient with pressure e some influence of the pressure in the exponent of the heat flux in the heat transfer correlation. Experimental results have been compared with those from several correlations. Of those considered in present study, the correlation proposed by Cooper is the one that fits better the experimental heat transfer coefficient.