

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DO ENVELHECIMENTO DA SUPERFÍCIE NO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA EBULIÇÃO NUCLEADA DO R-134a

Elvio Bugança Stelute

stelute@sc.usp.br

Evandro Fockink da Silva

fockink@sc.usp.br

José Maria Saiz Jabardo

mjabardo@sc.usp.br

Laboratório de Refrigeração – Departamento de Engenharia Mecânica

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo

Av. Trabalhador São-carlense, 400 CEP.:13.560-120 - São Carlos - SP

Resumo. O presente trabalho trata da análise experimental do efeito do envelhecimento de superfícies cilíndricas de cobre, latão e aço inoxidável para rugosidades (R_a) entre $0,45 \mu\text{m}$ e $4,6 \mu\text{m}$ na ebulição nucleada do R-134a. Através de resultados experimentais traçaram-se curvas de ebulição ao longo do tempo. Constatou-se que, em superfícies de cobre e latão, o coeficiente de transferência de calor decresceu com o tempo de operação até atingir um mínimo. Já para a superfície de aço inoxidável, o coeficiente de transferência de calor permaneceu constante ao longo do tempo de operação. Este fenômeno pode estar relacionado às propriedades mecânicas dos materiais testados, permitindo a alteração das características superficiais com o tempo de ebulição nos materiais de menor resistência.

Palavras chave: ebulição nucleada, envelhecimento, refrigerantes.

1. Introdução

A ebulição nucleada consiste em um fenômeno de amplo interesse na indústria da refrigeração devido aos elevados coeficientes de transferência de calor que proporciona. Os fatores mais comuns que podem influenciá-la são a pressão, o acabamento superficial, o material da superfície aquecida e o fluido refrigerante. Além destes fatores, é possível verificar que o tempo ao qual a superfície foi submetida à ebulição apresenta influência para determinados materiais, caracterizando um fenômeno conhecido como envelhecimento.

Chaudhri e McDougall (1969) fizeram um estudo envolvendo superfícies de cobre, aço carbono e aço inoxidável e os fluidos percloroetileno e acetato isopropílico. A partir dos resultados experimentais, os autores identificaram as possíveis causas para o envelhecimento da superfície:

- Variações instantâneas na atividade de cavidades, canais e outros pequenos locais secos na superfície;
- Deposição de sujeira na superfície;
- Corrosão da superfície;
- Flutuações de temperatura durante a ebulição;
- Expulsão gradual de gases dissolvidos no líquido;
- Liberação de gases “aprisionados” na superfície aquecida.

Além de verificar as causas do envelhecimento, os autores dividiram este processo em duas etapas. A primeira, de curto período, ocorre principalmente devido à diminuição da concentração do gás dissolvido no líquido ou aprisionado na cavidade. A etapa de longo período corresponde à redução da atividade de algumas cavidades ativas restantes, provavelmente através da condensação do vapor aprisionado na superfície devido a variações locais de temperatura.

Em alguns casos, os autores verificaram que o coeficiente de transferência de calor foi reduzido em até metade do valor inicial, sendo a superfície de cobre mais sensível a este efeito. Além disso, foi verificado que o coeficiente de transferência de calor apresenta uma queda assintótica com o tempo.

Além do envelhecimento propriamente dito, os autores verificaram a ocorrência do envelhecimento reverso, com o coeficiente de transferência de calor aumentando com o tempo. Este fenômeno é possível, segundo os autores, em combinações de fluido/superfície sujeitas à corrosão.

Sterman e Vilemas (1968) estudaram o envelhecimento em superfícies de aço inoxidável em água, verificando a existência deste fenômeno quando a superfície foi limpa com benzol, não ocorrendo quando a superfície foi limpa com álcool etílico. Este fato pode ser explicado pela presença de benzol na superfície durante o começo do processo de ebulição, verificando-se a necessidade de uma cuidadosa preparação da superfície antes de realizar o ensaio de envelhecimento.

Holland e Winterton (1973) desenvolveram um modelo de difusão de gás inerte em cavidades ativas, ocasionando um aumento do superaquecimento da superfície com o tempo, à medida que o gás é expulso das cavidades. O modelo é baseado na condição de equilíbrio mecânico de uma bolha em uma cavidade com gás inerte em seu interior e a difusão deste gás em um meio semi-infinito, resultando em:

$$p_v - p_l = \frac{2\sigma}{r_{eq}} - p_{gas}^0 \frac{T_n}{T_{gas}^0} e^{\alpha^2 Dt} \operatorname{erf}(\alpha\sqrt{Dt}) \quad (1)$$

Onde D é o coeficiente de difusão do gás no líquido e $\alpha = \frac{ART}{HV_c}$, com A sendo a área do menisco, R a constante

do gás e $H = \frac{p_{gas}}{S}$, com a solubilidade S . Substituindo a equação de Clausius-Clapeyron na Eq. (1) é possível obter o superaquecimento necessário para a ativação de uma determinada cavidade com gás inerte.

$$\Delta T \cong \frac{T_{sat}}{\rho_v h_{lv}} \left[\frac{2\sigma}{r_{eq}} - p_{gas}^0 \frac{T_n}{T_{gas}^0} e^{\alpha^2 Dt} \operatorname{erf}(\alpha\sqrt{Dt}) \right] \quad (2)$$

Como a segunda parcela do segundo termo da Eq. (2) é sempre negativa, com o passar do tempo, o superaquecimento aumenta, acarretando o processo de envelhecimento da superfície. Deve ser observado que este efeito se deve exclusivamente à presença de gás inerte na cavidade.

Como pode ser verificado ao analisar as bibliografias citadas, o envelhecimento da superfície pode ter várias causas que vão desde a presença de substâncias estranhas na superfície até alterações da própria superfície, como nos casos de corrosão. Além das causas citadas acima, é possível que mais fatores possam influenciar este fenômeno. Para isso, é necessária a realização de ensaios que eliminem esses efeitos. Assim, o presente trabalho busca investigar a ocorrência do envelhecimento em situações onde os fatores citados acima não apresentam qualquer efeito.

2. Aparato experimental

O aparato experimental é composto pelos circuitos do refrigerante ensaiado e de rejeição de calor. O refrigerante a ser ensaiado se encontra dentro de uma cuba de ebulição de modo que o nível de líquido seja mantido a uma determinada altura acima da superfície de testes (tubo), de modo que o peso de coluna não afete significativamente a pressão de saturação. A função do circuito de rejeição de calor é controlar a pressão de saturação da cuba de ebulição através da condensação do refrigerante em teste. Uma solução de 60% de etileno-glicol atua como fluido intermediário entre o condensador e o sistema de refrigeração. Esta solução pode ser refrigerada tanto pelo circuito frigorífico quanto pela água proveniente de uma torre de resfriamento cobrindo a faixa de -26°C a 90°C.

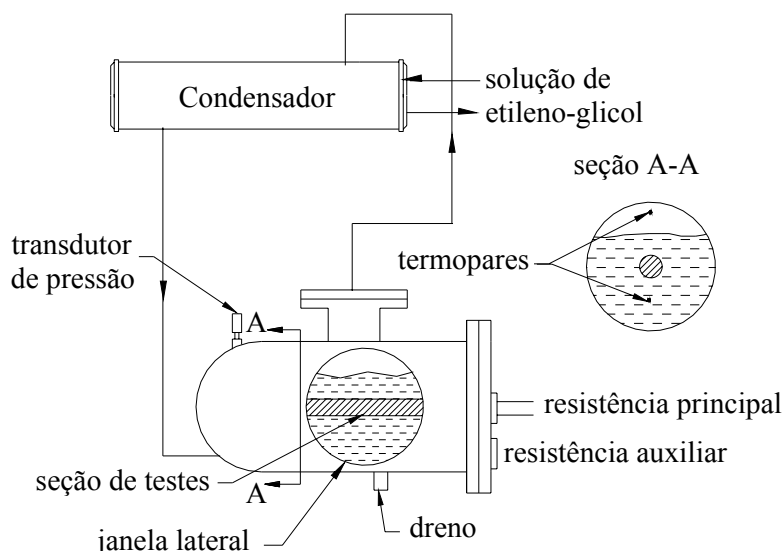


Figura 1. Representação esquemática do aparato experimental.

A cuba de ebulição é feita de aço carbono, com 40 litros de volume, possuindo janelas laterais para visualização do fenômeno. Em seu interior, encontra-se a superfície de testes, uma resistência elétrica de 1500W/220V e dois termopares blindados. Existem ainda conexões para um transdutor de pressão, uma válvula de segurança e conexões de cobre para o vapor e o retorno de líquido, como pode ser vista na Fig. 1. Os termopares blindados se encontram em tal posição que seja possível medir a temperatura do líquido e do vapor no interior da cuba. Em condições normais de operação, estes termopares indicam temperaturas muito próximas, correspondendo à temperatura de saturação na pressão indicado pelo transdutor de pressão.

A superfície de testes se posiciona de modo a ser facilmente visualizada pelas janelas laterais. Trata-se de um tubo de 19 mm de diâmetro com uma espessura de parede de 3,1 mm. Na Fig. 2 é possível verificar sua vista em corte. Este tubo se encontra fixo a um suporte de latão, preso à cuba de ebulição por meio de um flange. No interior da superfície de testes, encontra-se uma resistência elétrica tipo cartucho de 12,6 mm de diâmetro por 210 mm de comprimento, sendo que sua potência é controlada manualmente por um variador de voltagem. A temperatura superficial é medida por 4 termopares tipo T instalados em ranhuras feitas por eletro-erosão nas paredes internas do tubo, indicadas na Fig. 2. A fixação destes termopares se dá por meio de uma resina epóxi condutora térmica. O sistema de aquisição conta com duas placas conversoras A/D de 12 bits com 8 canais cada e três painéis de conexões, sendo dois destinados aos termopares.

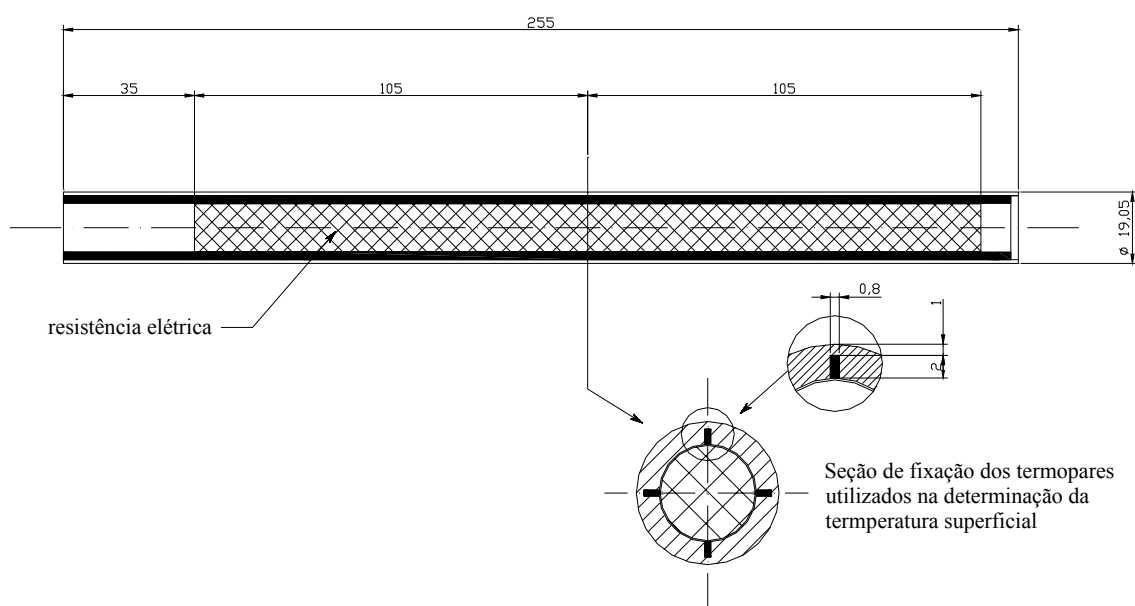


Figura 2. Vista da seção de testes com os canais para fixação dos termopares

A superfície de testes passa por um processo de acabamento superficial antes da ebulição, sendo utilizadas lixas e jateamento com diversas granulometrias. Após o processo de acabamento, a superfície é limpa com R11 e sua rugosidade medida em 10 locais aleatórios, sendo a rugosidade a ser considerada a média destas medidas. O parâmetro de rugosidade utilizado foi o Ra , cobrindo uma faixa ampla de rugosidades.

A superfície interna da cuba de ebulição é limpa e mantida em vácuo (menos de 2 kPa) durante um período de 12 horas antes da introdução do refrigerante a ser testado, conforme descrito por Silva (2002). Todos os ensaios foram realizados na pressão de saturação do fluido, em regime permanente. Cada ponto experimental era armazenado somente quando a leitura dos termopares blindados estivesse próxima o suficiente entre si e da pressão de saturação correspondente à pressão da cuba de ebulição. Para fins de análise, a temperatura de saturação foi admitida como sendo a média das temperaturas obtidas nos termopares blindados. Os ensaios eram realizados aumentando-se gradualmente o fluxo de calor até um valor máximo, sem armazenar os dados. Uma vez que o máximo era atingido, o fluxo de calor era gradualmente reduzido, sendo armazenados os dados.

Um cuidado especial foi tomado para determinar a correção necessária entre a temperatura medida e a temperatura superficial. Para estimar o efeito do canal de fixação do termopar na leitura da temperatura e a condução no sentido longitudinal do tubo foram feitos dois programas baseados no método das diferenças finitas. Destes programas foi possível corrigir a temperatura lida no termopar e, ainda, verificar que a condução no sentido longitudinal do tubo é desprezível. Uma discussão mais aprofundada dos resultados destes programas pode ser encontrada em Stelute (2004).

Os instrumentos foram calibrados e a incerteza das medidas foi calculada de acordo com o procedimento sugerido por Abernethy e Thompson (1973) fornecendo os resultados da Tabela 1.

Tabela 1. Incerteza dos parâmetros medidos e calculados

Parâmetro	Incerteza
Fluxo de calor mínimo, $\phi = 0,60 \text{ kW/m}^2$	$\pm 1,8\%$
Fluxo de calor máximo, $\phi = 120 \text{ kW/m}^2$	$\pm 0,3\%$
Área de transferência de calor	$\pm 0,3\%$
Temperatura superficial	$\pm 0,2\text{K}$
Temperatura de saturação	$\pm 0,2\text{K}$
Superaquecimento	$\pm 0,3\text{K}$
Coefficiente de transferência de calor, mínima incerteza	$\pm 1,3\%$
Coefficiente de transferência de calor, máxima incerteza	$\pm 20,3\%$

3. Resultados experimentais

Na obtenção dos pontos experimentais, foi necessário considerar o tempo de ebulição ao qual a superfície se encontra. Para tanto, optou-se em associar às curvas de ebulição somente o tempo em que a superfície se encontra em ebulição, sem considerar os períodos em que o equipamento estava desligado. Este tempo foi considerado a partir do primeiro ponto armazenado desde a primeira vez que a superfície foi colocada dentro da cuba de ebulição. Esta consideração é válida, uma vez que a superfície imersa em fluido refrigerante, sem a presença de ar, não está sujeita à corrosão, que poderia afetar os resultados.

Após cada curva, a superfície foi mantida em ebulição pelo tempo necessário a um fluxo de 20 kW/m^2 . Este fluxo foi escolhido de modo que já exista a formação de bolhas na superfície, não sendo alto suficiente para chegar ao fluxo crítico e comprometer o equipamento experimental. Após intervalos de tempo determinados, os pontos experimentais de cada curva de ebulição eram levantados, resultando a curva correspondente ao particular tempo efetivo de ebulição.

Curvas de ebulição para o refrigerante R-134a foram obtidas a partir de valores definidos para o fluxo de calor máximo, 120 kW/m^2 para o cobre, 70 kW/m^2 para o latão e 60 kW/m^2 para o aço inoxidável. Estes valores foram considerados com base nas limitações de segurança do equipamento, uma vez que fluxos maiores do que estes poderiam ocasionar queima da resistência elétrica e eventual perda da superfície de testes.

Antes da análise do efeito do envelhecimento propriamente dito, deve-se observar que, como estamos considerando materiais diferentes, seus coeficientes de transferência de calor são distintos. Para comparar o efeito do material, foram consideradas curvas para rugosidades (Ra) próximas, visando eliminar a influência deste parâmetro nos resultados. Nas Figs. 3 e 4 é possível verificar a influência do material para uma rugosidade baixa e uma rugosidades elevada, respectivamente.

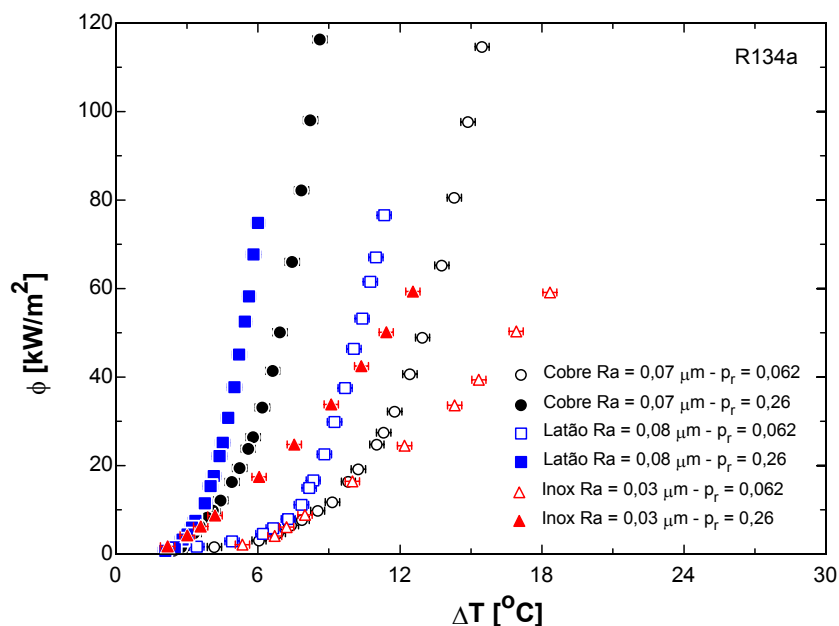


Figura 3 – Efeito do material da superfície para rugosidade baixa

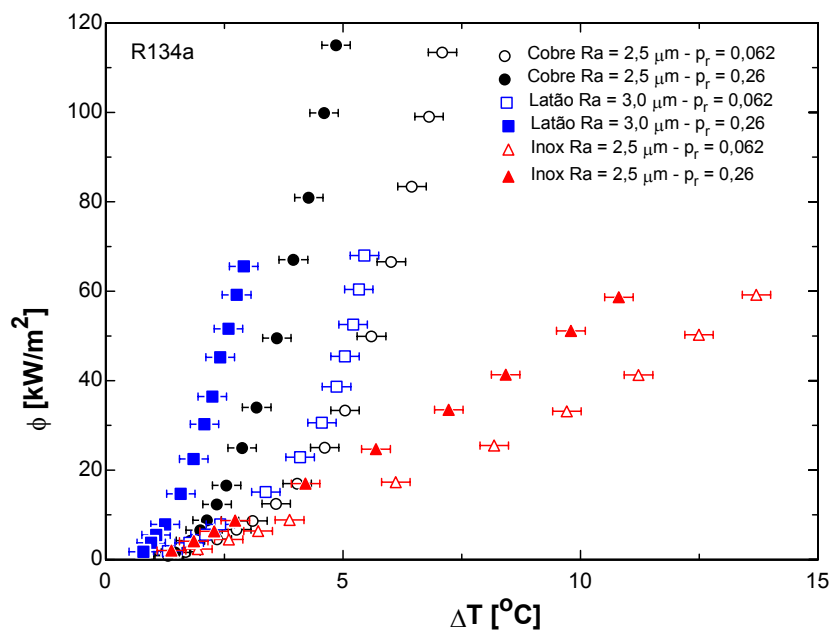


Figura 4 – Efeito do material para rugosidade elevada

Como é possível verificar, a superfície de latão apresenta um coeficiente de transferência de calor ligeiramente maior do que a superfície de cobre e muito maior do que a superfície de aço inoxidável. Este resultado pode estar relacionado à diferença entre os ângulos de contato entre as superfícies e o refrigerante. Somente ao nível de comparação, Trevoy e Johnson apud Bernadin et al (1997) verificaram o ângulo de contato em várias superfícies utilizando água. A superfície de latão apresentou um ângulo de contato maior (10,5°) do que o cobre (9,6°) e o aço inoxidável (5,4°), apresentando a mesma tendência que os resultados das Figs. 3 e 4. Para confirmar esta hipótese, seriam necessários ensaios com refrigerantes halogenados, uma vez que a água apresenta várias características muito distintas destes.

Uma vez consideradas as diferenças no coeficiente de transferência de calor dos materiais utilizados na presente pesquisa, é possível analisar o comportamento dos mesmos quanto ao envelhecimento. Deve-se salientar que as curvas das Figs. 3 e 4 foram obtidas em condições em que o envelhecimento não atua mais de forma significativa, como será visto a seguir.

A curva de ebulição da Fig. 5 foi levantada a partir de uma superfície de cobre, evidenciando o efeito do envelhecimento, para um valor de rugosidade elevado ($Ra = 4,6 \mu m$). Deve-se observar a tendência assintótica do coeficiente de transferência de calor com o tempo, facilmente verificada quando se compara as duas primeiras curvas (0

h e 21 h) com as demais. Além disso, a curva correspondente a 108 h de ebulição e a curva de 150 h coincidem, validando o método utilizado na obtenção dos dados experimentais.

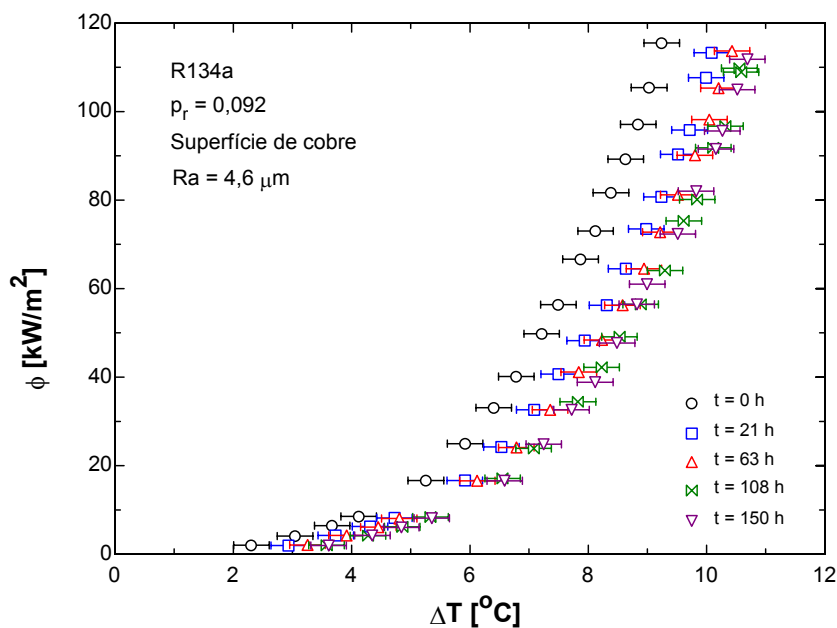


Figura 5 – Efeito do envelhecimento de superfície em superfície de cobre

Na Fig. 6 é possível verificar que a superfície de aço inoxidável não apresentou efeito algum de envelhecimento. Com isso, é possível concluir que não há gás inerte dissolvido no refrigerante, já que este efeito não apresentaria uma dependência do material. Além disso, pelo mesmo motivo, os dados não são afetados pela presença de sujeira, já que as superfícies são limpas utilizando o mesmo procedimento. Na Fig. 7 estão os dados para a superfície de latão, apresentando um efeito intermediário entre a superfície de cobre e de aço inoxidável naquilo que diz respeito ao envelhecimento.

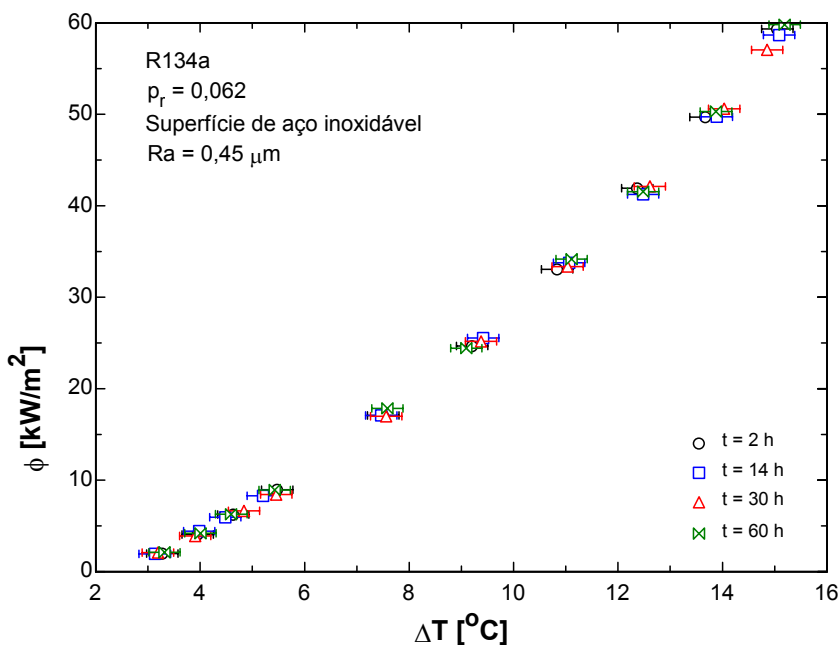


Figura 6 – Efeito do envelhecimento de superfície em superfície de aço inoxidável

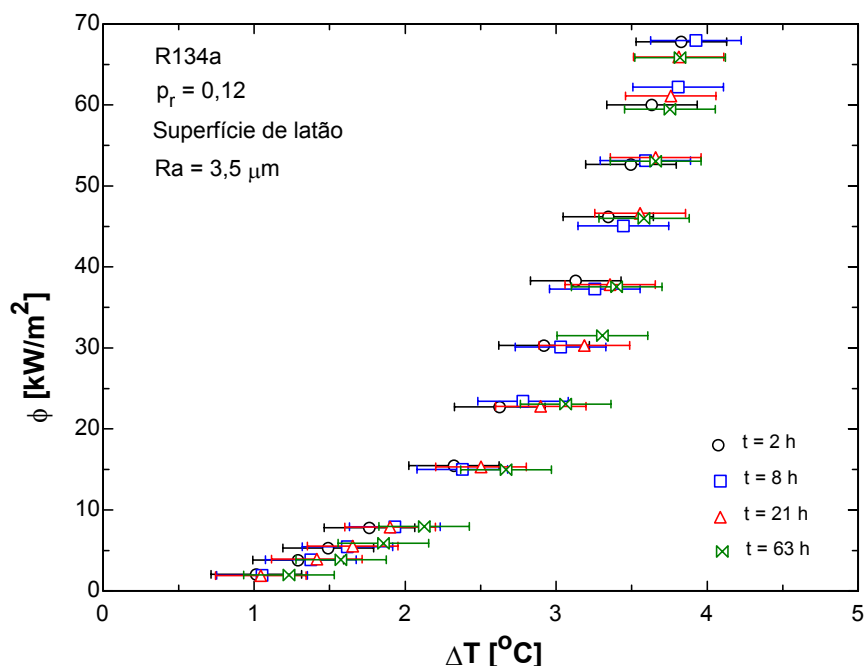


Figura 7 – Efeito do envelhecimento de superfície em superfície de latão

Para comparar os resultados de envelhecimento para estes materiais, será considerado o coeficiente de transferência de calor em três fluxos de calor distintos, resultando, assim, a Tabela 2.

Tabela 2 – Coeficiente de transferência de calor [kW/m²K] para três fluxos distintos

tempo	Cobre					Latão				Aço Inoxidável			
	0h	21h	63h	108h	150h	2h	8h	21h	63h	2h	14h	30h	60h
$\phi = 20 \text{ kW/m}^2$	3,62	3,23	3,11	2,95	2,92	7,96	7,64	7,27	6,87	2,45	2,46	2,43	2,48
$\phi = 40 \text{ kW/m}^2$	5,90	5,36	5,15	4,93	4,88	12,60	11,97	11,74	11,63	3,32	3,27	3,27	3,28
$\phi = 60 \text{ kW/m}^2$	7,87	7,09	6,86	6,61	6,70	16,51	15,98	16,03	15,96	3,96	3,93	3,94	3,94

A partir da Tabela 2, é possível verificar a variação percentual do coeficiente de transferência de calor comparando-se duas curvas consecutivas. Para efeito de análise, na Tabela 3, o tempo de ebulição associado a cada resultado é referente à média das curvas consideradas.

Tabela 3 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor [%]

tempo	Cobre				Latão			Aço Inoxidável		
	10h	42h	85h	129h	5h	14h	42h	8h	22h	45h
$\phi = 20 \text{ kW/m}^2$	10,8	3,7	5,1	1,0	4,0	4,8	5,5	-0,4	1,2	-2,1
$\phi = 40 \text{ kW/m}^2$	9,2	3,9	4,3	1,0	5,0	1,9	0,9	1,5	0,0	-0,3
$\phi = 60 \text{ kW/m}^2$	9,9	3,2	3,6	-1,4	3,2	-0,3	0,4	0,8	-0,3	0,0
média	10,0	3,6	4,3	0,2	4,1	2,1	2,3	0,6	0,3	-0,8

Analisando os resultados da Tabela 3, é possível verificar que nas superfícies de cobre e latão a diferença entre a primeira e a segunda curva obtida foi mais significativa. Na superfície de aço inoxidável, como já verificado na Fig. 6, não existe um efeito significativo de envelhecimento.

Dentre as possíveis causas do envelhecimento propostas por Chaudhri e McDougall (1969), a presença de sujeira ou mesmo ar na superfície não se aplica a estes dados, já que a superfície é previamente limpa com R-11 e o sistema evacuado antes da carga de refrigerante, conforme verificado anteriormente. Efeitos de corrosão também não se aplicam, uma vez que, mesmo as superfícies de cobre e latão não sofrem efeito algum imerso em fluido refrigerante halogenado (R-134a).

Uma possível causa para este fenômeno pode estar relacionada às propriedades mecânicas do material. Segundo Hofman e Hayward (1924), o cobre apresenta um limite de resistência a tração da ordem de 235 MPa, o latão possui um limite ligeiramente maior, da ordem de 400 MPa e o aço inoxidável da ordem de 590 MPa. Com a formação contínua de bolhas sobre a superfície, regiões de eventual concentração de tensões em diversos pontos da superfície, devido ao processo de acabamento superficial, podem se romper, permitindo que pequenas quantidades de material sejam removidas durante a ebulição.

Esse efeito contínuo e prolongado tornaria possível a alteração das características superficiais ao longo do tempo, que se reflete no coeficiente de transferência de calor. O aço inoxidável apresenta um limite de resistência elevado, sendo a ocorrência deste fenômeno desprezível.

4. Conclusões

O presente trabalho apresenta resultados relativos ao envelhecimento de superfícies submetidas à ebulição nucleada de R-134a. A partir desses dados, foi possível concluir que:

1. As superfícies de cobre e de latão estão sujeitas ao fenômeno do envelhecimento, quando submetidas à ebulição nucleada;
2. O aço inoxidável não sofre efeito de envelhecimento;
3. Considerando-se a ausência de gás inerte, sujeiras sobre a superfície e ausência de corrosão na superfície imersa no fluido refrigerante, o envelhecimento da superfície deve estar relacionado à alteração superficial da mesma ao longo do tempo como consequência da ebulição;
4. O envelhecimento deve estar relacionado à resistência mecânica do material da superfície.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio prestado à presente pesquisa e ao suporte técnico do sr. José Roberto Bogni.

6. Nomenclatura

A	Área do menisco [m ²]	t	tempo [s]
D	Coefficiente de difusão	T	Temperatura [°C]
h_{lv}	Calor latente de vaporização [J/kg]	T_{gas}^0	Temperatura inicial do gás [°C]
p_{gas}^0	Pressão inicial do gás [Pa]	T_n	Temperatura de nucleação [°C]
p_l	Pressão do líquido [Pa]	T_{sat}	Temperatura de saturação [°C]
p_r	Pressão reduzida	V_c	Volume da cavidade [m ³]
p_v	Pressão do vapor [Pa]	ΔT	Superaquecimento [°C]
R	Constante do gás [J/kg°C]	ϕ	Fluxo de calor [W/m ²]
Ra	Rugosidade média aritmética [µm]	ρ_v	Densidade do vapor [kg/m ³]
r_{eq}	Raio do núcleo de vapor [m]	σ	Tensão superficial [N/m]

5. Referências

- Bernardin J. D.; Mudawar I.; Walsch C. B.; Franses E. I. (1997), *Contact Angle Temperature Dependence for Water Droplets on Practical Aluminum Surfaces*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 40, no. 5, pp. 1017-1033.
- Chaudrhi I. H.; McDougall I. R. (1969), Ageing Studies in Nucleate Pool Boiling of Isopropyl Acetate and Perchloroethylene, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 12, pp. 681-688.
- Hofamn H. O.; Hayward C. R. (1924), Metallurgy of Copper, McGraw-Hill.
- Holland P. K.; Winterton H. S. (1973), Nucleation of sodium boiling from surface cavities containing gas, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 16, pp. 1453-1458.
- Ribatski G. (2002), Análise teórica e experimental da ebulição nucleada de refrigerantes halogenados, Tese de doutorado, EESC/USP – São Carlos.
- Silva E. F. (2002), Análise experimental da ebulição nucleada de hidrocarbonetos halogenados de baixa e média pressão em tubos horizontais, Dissertação de mestrado, EESC/USP – São Carlos.
- Stelute E. B. (2004), Efeito da rugosidade superficial na ebulição nucleada de refrigerantes halogenados em tubos horizontais, Dissertação de mestrado, EESC/USP – São Carlos.
- Sterman L. S.; Vilemas Y. (1968), The influence of the state of heating surface on heat transfer at boiling, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 11, pp.347-351.

SURFACE AGEING EFFECTS IN NUCLEATE BOILING HEAT TRANSFER OF R134a

Evandro Fockink da Silva

fockink@sc.usp.br

Elvio Bugança Stelute

stelute@sc.usp.br

José Maria Saiz Jabardo

mjabardo@sc.usp.br

Laboratório de Refrigeração – Departamento de Engenharia Mecânica

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo

Av. Trabalhador São-carlense, 400 CEP.:13.560-120 - São Carlos – SP

Abstract

This paper deals with an analysis of ageing effects in cylindrical surfaces of copper, brass and stainless steel with an average roughness range from 0.45 μm to 4.6 μm in R-134a nucleate boiling. Boiling curves have been obtained at various boiling times. It has been determined that in brass and copper surfaces the heat transfer coefficient diminishes with time down to a minimum. Stainless steel surfaces have shown a nearly constant heat transfer coefficient over the boiling period. This phenomenon may be related to the mechanical properties of these surfaces. The less resistant material is exposed to surface characteristics changing with time, resulting in the ageing effect.

Keywords: nucleate boiling, ageing, refrigerants.