

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERDA DE CARGA E DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA EVAPORAÇÃO DOS REFRIGERANTES R-134a e R-12

A. L. Souza, J. C. Chato, J. M. S. Jabardo, J. P. Wattlelet, J. S. Panek
Universidade de Illinois em Urbana-Champaign - Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

RESUMO

Um circuito experimental foi desenvolvido a fim de estudar as características do R-12 e R-134a quando da evaporação de misturas refrigerante-óleo. Os testes foram conduzidos nos limites de aplicação para ar condicionado veicular. A perda de pressão em relação ao refrigerante puro aumenta com o aumento da concentração de óleo, enquanto que o coeficiente de transferência de calor aumenta até uma certa porcentagem de óleo, e depois decresce.

INTRODUÇÃO

Uma instalação frigorífica eficiente envolve um compromisso entre a intensificação da transferência de calor e a perda de carga nos trocadores de calor, e em especial nos evaporadores. Uma vez que a substituição mais promissora para o R-12 é o R-134a, a comparação da perda de carga e do coeficiente de transferência de calor entre os dois refrigerantes se faz necessária. Schallager (1988,1990) apresenta uma revisão bibliográfica enfatizando as características de transferência de calor e perda de carga para refrigerantes puros e na presença de óleo, bem como Wattlelet (1971,1992), que avalia e compara as características de transferência de calor para os refrigerantes R-134a e R-12.

A maioria dos sistemas frigoríficos operam com o ciclo de compressão a vapor, e portanto uma mistura refrigerante-óleo é encontrada escoando nestes sistemas, com uma pequena quantidade de óleo lubrificante. Este óleo é necessário para lubrificação dos compressores. A presença do óleo no refrigerante pode afetar significativamente a perda de carga e o coeficiente de transferência de calor nos trocadores de calor nos circuitos frigoríficos (Chaddock(1976)).

Um circuito experimental foi desenvolvido no Centro de Refrigeração e Ar Condicionado (ACRC) da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign, a fim de estudar as características de transferência de calor e perda de carga quando da evaporação de misturas refrigerante-óleo, com enfoque principal para os novos refrigerantes seguros à integridade da camada de ozônio como mostra Wattlelet (1971) e Panek (1992).

APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental desenvolvido para estudo das características de transferência de calor e perda de carga quando da evaporação de misturas

refrigerante-óleo está apresentado na Figura 1.

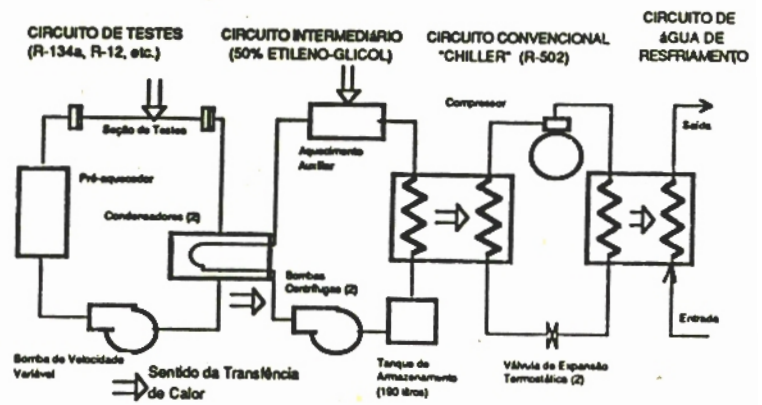


Figura 1. APARATO EXPERIMENTAL

A seção de testes está localizada no circuito de testes de evaporação, onde pode ser facilmente desconectada, caso necessário, para rápida troca ou reparo. O circuito convencional de refrigeração "chiller" contém R-502 e está acoplado termicamente ao circuito principal de evaporação através de um circuito intermediário contendo etileno-glicol.

Instrumentação. Todos os dispositivos para medida de temperatura foram calibrados num banho termostático contra termômetros de mercúrio de precisão. Após serem processadas pelo sistema de aquisição de dados, considera-se como +/- 0,2 °C as incertezas nas medidas de temperaturas feitas pelos termopares.

As incertezas nas medidas de pressão após serem processadas pelo sistema de aquisição de dados é considerada como +/- 0,3 % do fundo de escala dos transdutores de pressão. Todos os transdutores de pressão foram calibrados contra um padrão primário que utiliza pesos cilíndricos como padrões de pressão.

COLEÇÃO PTC
DEVOLVER AO BALCÃO DE EMPRÉSTIMO

Para a avaliação do circuito experimental, foram rodados testes monofásicos, e os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor e perda de carga comparados com aqueles obtidos através de correlações já devidamente consagradas, como Dittus-Boelter, Petukhov e Blausius mostradas em Rosenow (1985). Os resultados concordaram tanto qualitativa quanto quantitativamente, com um erro relativo menor que 10% tanto para o coeficiente de transferência de calor como para a perda de carga na seção de testes.

Enquanto que a perda de carga é lida diretamente do transdutor diferencial de pressão na seção de testes, o coeficiente de transferência de calor "h" foi determinado pela lei de resfriamento de Newton, usando o valor médio das temperaturas da superfície "Ts" e a média das temperaturas da mistura refrigerante-óleo na entrada e saída da seção de testes, bem como também o fluxo de calor na seção de teste "Qts", através das seguintes equações:

$$h = \frac{\phi_{ts}}{(T_s - T_m)} \quad (1)$$

$$\phi_{ts} = q/A_s \quad (2)$$

onde "As" é a área superficial interna e "q" a potência térmica dissipada na seção de testes, e

$$T_s = 0,25 \cdot T_c + 0,25 \cdot T_b + 0,5 \cdot T_l \quad (3)$$

onde "Tc", "Tb" e "Tl" são respectivamente, a média aritmética das temperaturas na parte de cima, na parte de baixo e nas partes laterais medidas na seção de testes.

A fim de determinar o título na entrada da seção de testes, um balanço de energia no pré-aquecedor foi usado. A quantidade de calor adicionada pelo ambiente à seção de testes, da ordem de 10 W, foi desprezada para efeito de cálculo do coeficiente de transferência de calor.

Os testes bifásicos foram conduzidos nos limites de aplicação para ar condicionado em veículos automotores nas seguintes condições: Temperatura de Saturação de 5 °C; Fluxo de Massa de 100-300-500 Kg/m².s; Fluxo de Calor de 5-10-20-30 kW/m²; Título na Entrada de 20-40-60%; óleo lubrificante nas concentrações em massa de 1-3-5 %. É importante observar que a pressão correspondente a temperatura de saturação de 5 °C para o R-134a é de 350 kPa e para o R-12 é de 363 kPa.

Para os testes bifásicos foram investigados os refrigerantes R-134a e R-12. Três diferentes óleos foram adicionados ao refrigerante R-134a: PAG Q332, PAG Q354 e Ester 0540. Vários regimes de escoamento foram observados através dos visores de vidro, bem como fenômenos como espumamento ("foaming") quando óleo foi adicionado ao refrigerante no circuito experimental.

Um fenômeno conhecido como "dryout" foi também observado para alguns testes com relativamente altos títulos, quando o filme de líquido anular na parede da seção de testes inicia evaporação completa. Isto foi detectado tanto visualmente, quanto através de uma rápida queda no coeficiente de transferência de calor devido ao acréscimo na temperatura da parede do tubo. Desde que foram observadas gotas de líquido carregadas no núcleo de vapor para este caso, é bom salientar que o título termodinâmico pode ser menor que a unidade. Na maioria dos testes realizados, os regimes de escoamento observados foram predominantemente anular. Para 300 e 500 kg/m².s os regimes de escoamento observados foram ondulado-anular, anular e tipo névoa ("mist"), enquanto que para 100 kg/m².s os regimes de escoamento observados foram estratificado-ondulado, ondulado-anular e tipo névoa ("mist").

Transferência de calor para o refrigerante puro. Foram investigados o efeito do título médio, do fluxo de massa e do fluxo de calor no coeficiente de transferência de calor. Para 300 e 500 kg/m².s, o coeficiente de transferência de calor cresce em geral com o aumento do título médio, uma vez que uma intensa evaporação na interface líquido-vapor diminui a espessura do filme de líquido, e portanto, uma menor resistência térmica para transferência de calor por ebulição convectiva dominante neste regime, como pode ser observado nas Figuras 2 e 3. Pode-se observar também que para o regime de escoamento estratificado, tipicamente para 100 kg/m².s, não há nenhum efeito considerável do título médio com relação ao coeficiente de transferência de calor. Neste regime de escoamento, o coeficiente de transferência de calor na parte de cima da seção de testes é menor que na parte de baixo, devido ao fato do líquido molhar ("wetting") a base do tubo.

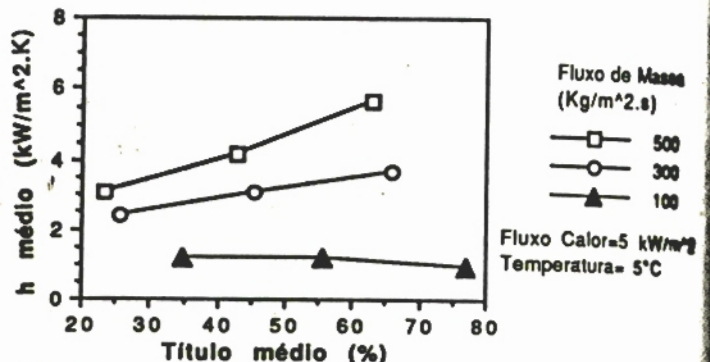


Figura 2. h vs. X para R-12 puro, com fluxo de calor constante

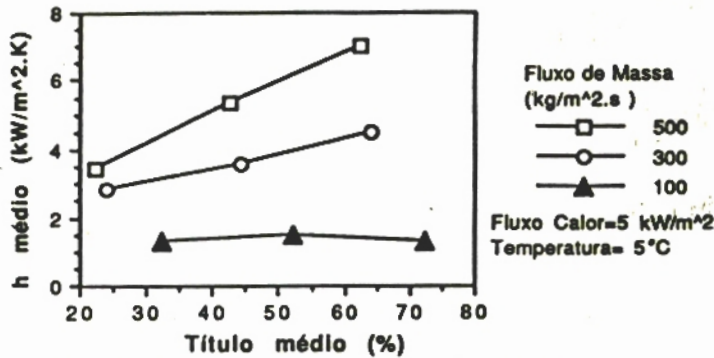


Figura 3. h vs. X para R-134a puro, com fluxo de calor constante

Nas Figuras 2 e 3 também observa-se que o coeficiente de transferência de calor cresce com o aumento do fluxo de massa, devido a velocidade maior do líquido e transição de regimes de escoamento. Quando do aumento do fluxo de massa a partir de 100 kg/m².s, o regime de escoamento muda de estratificado para anular, fazendo com que o líquido molhe completamente a parede e o núcleo de vapor escorrega no centro do tubo. Devido a isto, o coeficiente de transferência de calor para o regime de escoamento anular é tipicamente bem maior quando comparado ao estratificado.

O coeficiente de transferência de calor não é afetado significativamente pela variação do fluxo de calor para testes conduzidos no regime de escoamento anular, sendo a transferência de calor por ebulição convectiva predominante nestes testes, como mostra a Figura 4. Comparando as Figuras 2 e 3 conclui-se que o refrigerante R-134a apresenta um coeficiente de transferência de calor maior do que o R-12 nas mesmas condições, em média de 20-30 % maior, explicado em parte pelo fato de que o primeiro tem uma maior condutividade térmica da fase líquida.

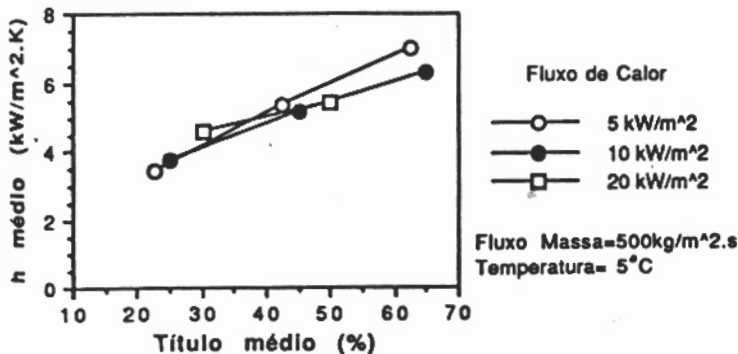


Figura 4. h vs. X para R-134a puro, com fluxo de massa constante

Influência do óleo O fato de se adicionar óleo ao refrigerante altera obviamente as propriedades da mistura como viscosidade, condutividade térmica e tensão superficial, que podem afetar consideravelmente a perda de pressão e o coeficiente de transferência de calor durante o processo de evaporação. A evaporação do refrigerante da mistura refrigerante-óleo quando do aumento do título, pode eventualmente fazer com que a fase líquida uniforme separe em duas fases líquidas distintas, uma fase rica em refrigerante e outra fase rica em óleo, dependendo dos limites de miscibilidade. Este efeito pode aumentar o coeficiente de transferência de calor, principalmente na região de altos títulos quando a parede do tubo ficaria completamente seca ("dryout") na ausência do óleo, uma vez que o refrigerante presente na fase rica em óleo continua a evaporar e calor é conduzido através do filme de óleo líquido, ocorrendo assim o resfriamento da parede.

Um fenômeno devido a presença de óleo conhecido como espumamento ("foaming") afeta também a transferência de calor. Este espumamento ocorre no regime de escoamento anular quando a velocidade alta do núcleo de vapor ao agitar suficientemente a superfície de líquido promove a formação de bolhas, as quais não se colapsam, imediatamente devido a maior tensão superficial quando comparada ao refrigerante puro.

Estes efeitos podem ser observados na Figura 5, onde é apresentada a razão entre o coeficiente de transferência de calor para mistura refrigerante-óleo e aquele para o refrigerante puro em função da concentração de óleo, para condições de testes idênticas. Em geral, com o aumento da concentração de óleo, esta razão inicialmente aumenta até uma certa porcentagem de óleo, e depois decresce. Observe que para o fluxo de massa igual a 100 kg/m².s, esta razão persiste maior que a unidade mesmo para concentração de óleo maior que 5 %, uma vez que neste caso a mistura refrigerante-óleo molha intensamente a parte de cima da parede do tubo no escoamento estratificado.

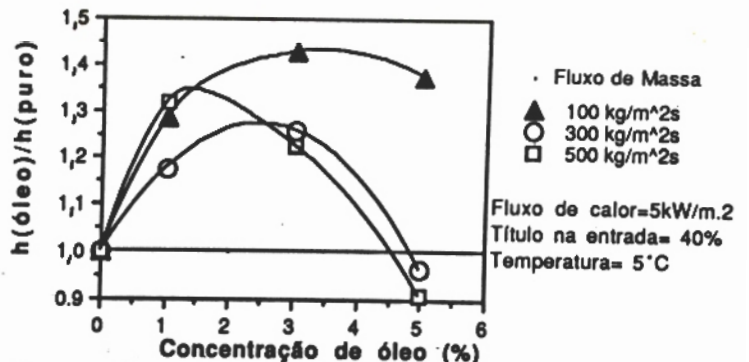


Figura 5. Razão do acréscimo do h entre o R-134a puro e Mistura com óleo-PAG 0332

Na Figura 6 é apresentada a razão entre a perda de carga para mistura refrigerante-óleo e aquela para o refrigerante puro em função da concentração de óleo, para condições de testes idênticas. Esta razão em geral cresce com

O aumento da concentração de óleo, independentemente do regime de transferência de calor, uma vez que a viscosidade da mistura sempre aumenta. Isto se deve ao fato de que o aumento da viscosidade, aumenta a tensão de cisalhamento entre a fase líquida e a parede do tubo, bem como aquela entre a superfície da fase líquida e do núcleo de vapor.

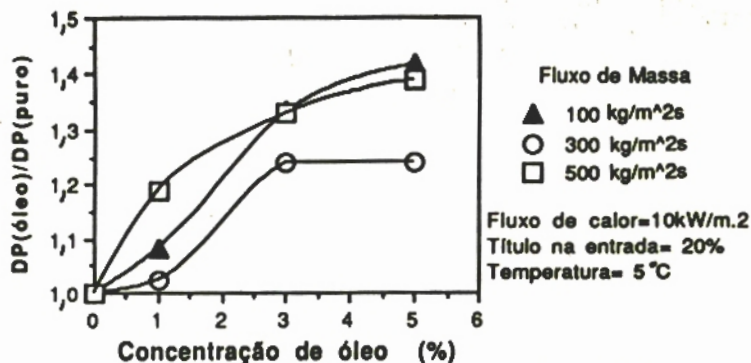


Figura 6. Razão do acréscimo da DP entre o R-134a puro e Mistura com óleo-PAG 0332

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos das experiências realizadas foram avaliados e se mostraram coerentes não só qualitativa quanto quantitativamente, quando comparados com modelos físicos estabelecidos e com alguns resultados experimentais similares publicados na literatura disponível em Wattlelet (1992). Modificações na seção de teste estão sendo realizadas a fim de se coletar dados para a região de baixas temperaturas (-20 °C), associada à refrigeração doméstica.

A perda de carga para o R-134a foi em média de 10-20% maior que o R-12 quando comparados nas mesmas condições, enquanto que para o coeficiente de transferência de calor foi em média de 20-30% maior. A perda de pressão para mistura refrigerante-óleo em relação ao refrigerante puro aumenta com o aumento da concentração de óleo, enquanto que o coeficiente de transferência de calor aumenta até uma certa porcentagem de óleo e depois decresce.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio e suporte financeiro do ACRC (Air Conditioning and Refrigeration Center) associado à Universidade de Illinois em Urbana-Champaign, em todas as fases do projeto, construção, montagem e operação do Aparato Experimental aqui descrito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chaddock, J. B., Influence of oil on refrigerant evaporator performance, *ASHRAE Transactions*, Vol. 82, 1976, pp. 474-486.
Jung, D. S. & Radermacher, R., Transport Properties and Surface Tension of

Pure and Mixed Refrigerants, *ASHRAE Transactions*, Vol. 97, Part 1, 1991, pp 90-99.

McLinden, M. O., Measurement and Formulation of the Thermodynamic Properties of Refrigerants 134a and 123, *ASHRAE Transactions*, Vol. 95, Part II, 1989, pp. 185-196.

Panek, J. S., *Evaporation Heat Transfer and Pressure Drop in Ozone-Safe Refrigerants and Refrigerant-Oil Mixtures*, Tese de Mestrado apresentada à Universidade de Illinois em Urbana-Champaign, Janeiro de 1992.

Rosenow, W. M.; J. P. Hartnett & Ganic, E. N., *Handbook of Heat Transfer Fundamentals*, 2 ed., McGraw-Hill, New York, 1985.

Schalager, L. M., Pate, M. B. & Bergles, A. E., A survey of refrigerant heat transfer and pressure drop emphasizing oil effects and in-tube augmentation, *ASHRAE Transactions*, Vol. 93 part 1, pp 149-166, 1988.

Schalager, L. M., Pate, M. B. & Bergles, A. E., Performance predictions of refrigerant-oil mixtures in smooth and internally finned tubes - part I: literature Review, *ASHRAE Transactions*, 1990, V. 96, Pt. 1.

Wattlelet, J. P., *Design, Building, and Baseline Testing of an Apparatus Used to Measure Evaporation Characteristics of Ozone-Safe Refrigerants*, Tese de Mestrado apresentada à Universidade de Illinois em Urbana-Champaign, Janeiro de 1991.

Wattlelet, J. P., Chato, J. C., Jabardo, J. M. S., Panek, J. S. & Renie, J. P., An experimental comparison of evaporation characteristics of HFC-134a and CFC-12, *XVIII International Congress of Refrigeration*, Montreal, 1991.

Wattlelet, J. P., Jabardo, J. M. S., Chato, J. C., Panek, J. S. & Souza, A. L., *Experimental evaluation of convective boiling of refrigerants HFC-134a and CFC-12*, *National Heat Transfer Conference*, San Diego, Agosto de 1992.

Wilson, D. P. & Basu, R. S., Thermodynamic Properties of New Stratospherically Safe Working Fluid-Refrigerant 134a, *ASHRAE Transactions*, Vol. 94, Part II, 1988, pp 2095-2118.

ABSTRACT

An experimental circuit was developed to study the characteristics of R-12 and R-134a in evaporation of oil-refrigerant mixtures. The tests were conducted in the application limits of vehicular air conditioning. The loss of pressure in relation to the pure refrigerant increases with the increase of the oil concentration, while the heat transfer coefficient increases up to a percentage of oil and after this decreases.