

IPEN-DOC-2142

PERDA DE PRESSÃO POR ATRITO EM TUBOS LISOS DURANTE ESCOAMENTO BIFÁSICO DE REFRIGERANTES

M. M. Pimenta (1), A. L. Souza (1,2), J. C. Chato (2), J. P. Wattelet (2)

(1) Escola Politécnica da USP, (2) Universidade de Illinois em Urbana-Champaign

RESUMO

Um estudo teórico-experimental de perda de pressão local por atrito em tubos lisos durante escoamento bifásico foi realizado utilizando os refrigerantes R-134a e R-12, com regimes de escoamento observados que variaram desde estratificado-ondulado para baixos fluxos de massa e títulos até anular-anular nebuloso ("misty annular") para altos fluxos de massa e títulos. A correlação desenvolvida de perda de pressão local por atrito mostrou-se adequada.

INTRODUÇÃO

A avaliação de perda de pressão para os novos refrigerantes, com o objetivo de serem seguros para a integridade da camada de ozônio, bem como reduzirem tanto quanto possível o consumo energético, é vital para o projeto adequado de evaporadores usados na indústria de refrigeração e ar condicionado.

Uma vez que a substituição mais promissora para o R-12 e o R-134a, a comparação da perda de pressão e do coeficiente de transferência de calor entre os dois refrigerantes se faz necessária. As referências (Schalager et alli, 1948) apresentam uma revisão bibliográfica enfatizando as características de perda de pressão e de transferência de calor para refrigerantes puros e na presença de óleo.

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 perda de pressão e transferência de calor quando da evaporação de misturas refrigerante-óleo, com enfoque principal para os novos refrigerantes seguros à integridade da camada de ozônio Wattelet (1991) e Panek (1992)

Apesar do progresso e da existência de vários estudos teóricos e experimentais publicados sobre perda de pressão (Tong, 1967 e Chisholm, 1983), uma necessidade considerável existe para o estudo de correlações que predizem de forma prática e precisa a perda de pressão por atrito quando do escoamento bifásico de refrigerantes.

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 Fig. 1. Esta figura apresenta um fluxograma descritivo do circuito de testes de evaporação no qual circula a mistura refrigerante-óleo, de um circuito intermediário contendo etileno-glicol que condensa e subresfria esta mistura e de um circuito convencional de refrigeração "chiller", no qual um circuito contendo água fria e usado para resfriamento de seu condensador.

Circuito de Testes de Evaporação. Os principais componentes do circuito de testes de evaporação estão apresentados na Fig. 2.

DEVOLVER AO BALCÃO DE EMPRÉSTIMO

COLEÇÃO PTC

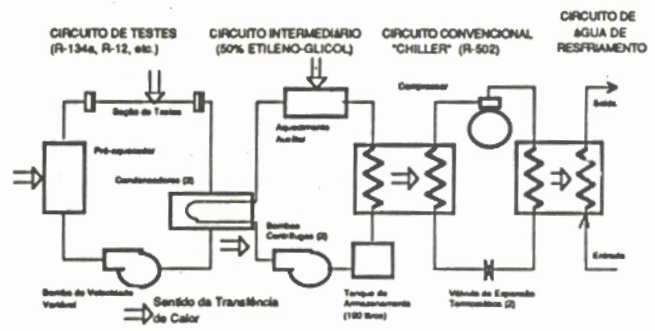


Figura 1. APARATO EXPERIMENTAL

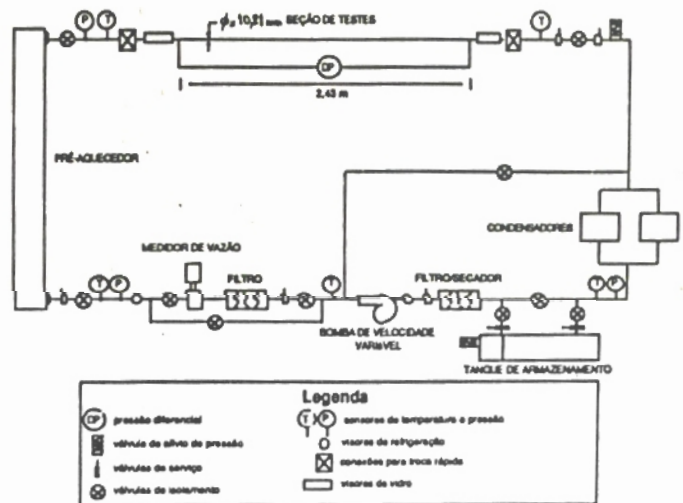


Figura 2. CIRCUITO DE TESTES DE EVAPORAÇÃO

O circuito pode ser carregado com refrigerante puro ou mistura refrigerante-óleo, a fim de se estudar as características de perda de pressão, bem como obter uma base apropriada da influência do óleo durante o processo de evaporação.

Instrumentação. Foram usados termopares tipo T para medida das temperaturas dos refrigerantes em cinco

diferentes posições no circuito; entre elas, na entrada e saída da seção de testes. 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 $\pm 0,2$ oC as incertezas nas medidas de temperaturas feitas pelos termopares.

Foram medidas pressões absolutas do refrigerante em três diferentes posições no circuito: entrada da seção de testes, saída do condensador e entrada do pré-aquecedor. Um transdutor diferencial de pressão foi usado para medir a perda de pressão ao longo da seção de testes. A faixa de atuação do transdutor diferencial de pressão é de 0-35 KPa. As incertezas nas medidas de pressão após serem processadas pelo sistema de aquisição de dados e considerada como $\pm 0,3$ % do fundo de escala dos transdutores de pressão.

Operação e Controle. Os parâmetros controlados na seção de testes durante a operação do circuito são: temperatura de saturação, título na entrada e fluxo de massa. Quando é atingido o estado estacionário estes parâmetros devem estar dentro da seguinte faixa dos valores objetivos: $\pm 0,2$ oC da temperatura de saturação; $\pm 1,0$ % do título na entrada e ± 5 % do fluxo de massa, sendo a condição estacionária assumida somente quando a temperatura de saturação variar menos que 0,1 oC no tempo.

As propriedades termodinâmicas e de transporte do refrigerante usadas durante coleta e análise dos dados foram obtidas das referências Wilson(1988) e Jung(1991).

METODOLOGIA DE ANÁLISE.

A perda de pressão em escoamento bifásico pode ser dividida em três componentes: atrito, aceleração e gravidade. Para a perda de pressão por atrito é necessário que se conheça o coeficiente de atrito bifásico ou o multiplicador de atrito bifásico. Já para a perda de pressão por aceleração ou gravidade, é necessário o conhecimento da fração de vazio, ou seja, razão entre a área de escoamento do gás para a área de escoamento total ASHRAE(1989). Para o circuito aqui descrito, como a seção de testes está na posição horizontal e termicamente isolada (adiabática), obviamente as componentes da perda de pressão por gravidade e por aceleração não são consideradas na análise dos resultados, sendo também assumido que o escoamento está completamente desenvolvido na seção de testes.

No modelo de Lockhart-Martinelli (1947) e Martinelli-Nelson(1948), o parâmetro " \bar{X} " é usado e definido por:

$$\bar{X} = \left\{ \frac{(\partial p / \partial z)_l}{(\partial p / \partial z)_v} \right\}^{0.5} \quad (1)$$

onde $(\partial p / \partial z)_l$ e a perda de pressão por atrito supondo que somente a fase líquida escoe no tubo e $(\partial p / \partial z)_v$ e a equivalente para a fase vapor.

Define-se o parâmetro por Lochhart-Martinelli (1947):

$$X_{tt} = \left\{ \frac{(1-x)}{x} \right\}^{0.875} \cdot \left\{ \frac{\rho_v}{\rho_l} \right\}^{0.5} \cdot \left\{ \frac{\mu_l}{\mu_v} \right\}^{0.125} \quad (2)$$

Dois multiplicadores bifásicos para a fase líquida são expressos matematicamente por Martinelli Nelson (1948):

$$\phi_L = \left\{ \frac{(\partial p / \partial z)_a}{(\partial p / \partial z)_l} \right\}^{0.5} \quad (3)$$

$$\phi_{Lo} = \left\{ \frac{(\partial p / \partial z)_a}{(\partial p / \partial z)_{Lo}} \right\}^{0.5} \quad (4)$$

CORRELAÇÃO DESENVOLVIDA

Uma correlação para estimar a perda de pressão por atrito quando do escoamento bifásico turbulento para os refrigerantes R-134a e R-12 puros foi desenvolvida, utilizando o modelo de deslizamento, onde as fases são consideradas escoar separadamente. Os dados experimentais foram correlacionados através dos parâmetros adimensionais de Lockhart-Martinelli(1948) " X_{tt} " e do número de Froude " Fr_l " para a fase líquida. O número de Froude naturalmente aparece quando forças de inércia e gravidade são significativas no escoamento (Wallis(1969) e Chisholm(1983)), principalmente para baixos títulos sendo o escoamento estratificado ou ondulado a influência do fluxo de massa no multiplicador bifásico por atrito foi observado e bem descrito por Baroczy (1987), Isbin et alii (1987) e Chisholm (1973,1967). No caso da correlação desenvolvida neste trabalho, o efeito do fluxo de massa está representado através do número de Froude, como mostra as Eqs. 6,7 e 8.

Uma análise por regressão foi feita utilizando 52 testes para o refrigerante R-134a e 45 testes para o refrigerante R-12, a fim de se obter uma dependência funcional entre " ϕ_{Lo} " e os parâmetros adimensionais " X_{tt} " e " Fr_l ", cujo valor obtido para o coeficiente de correlação foi de 0,98. O desvio absoluto médio definido por:

Desvio Absoluto

$$\text{Médio} = (100/n) \cdot \sum \text{ABS} \left\{ \frac{(\Delta P_{\text{calc}} - \Delta P_{\text{exp}})}{(\Delta P_{\text{exp}})} \right\} \quad (5)$$

e calculado utilizando os resultados experimentais para ambos os refrigerantes, foi de 4,6 %. A forma final da correlação pode ser expressa através da seguinte equação:

$$\phi_{Lo}^2 = [1.0 + c_1 \cdot (X_{tt} - c_2)] \cdot (1-x)^{1.75} \quad (6)$$

onde,

$$c_1 = 3,031 + 3,255 \cdot Fr_l - 0,759 \cdot Fr_l^2 \quad (7)$$

$$c_2 = 1,773 - 0,138 \cdot Fr_l \quad (8)$$

A Fig. 3 apresenta uma comparação gráfica entre os valores de " ϕ_{Lo}^2 " obtidos através da equação 10 e aqueles obtidos experimentalmente. Pode-se observar que os valores calculados através

da correlação obtida, para ambos refrigerantes R-134a e R-12, e os dados experimentais colocam-se dentro de uma faixa de + 10 %.

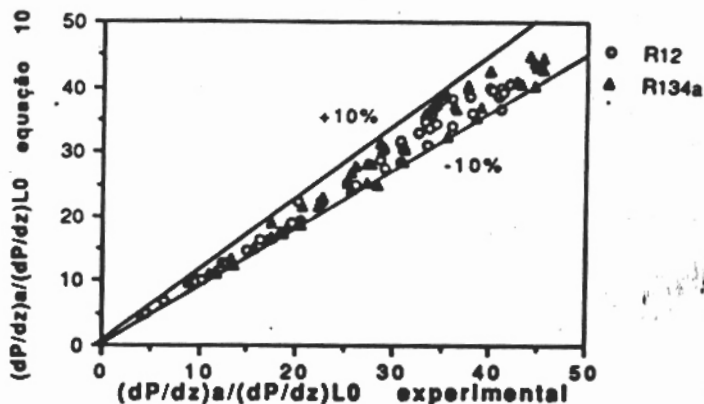


Figura 3 - Comparação para o multiplicador bifásico entre equação 10 e experimental

$$\phi L_0^2 = 12,82 \cdot (X_{tt} - 1,47) \cdot (1-x)^{1,8} \quad (10)$$

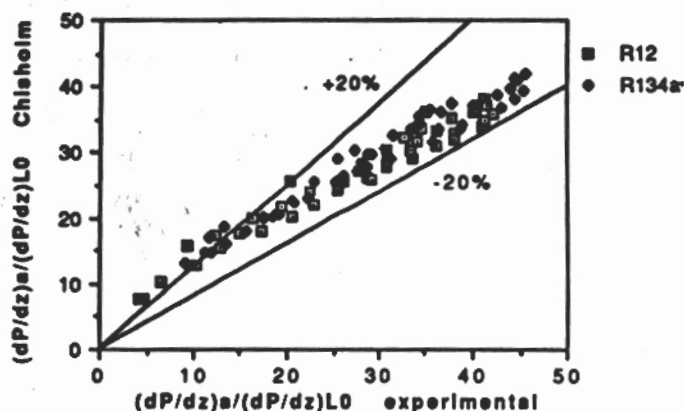


Figura 4 - Comparação para o multiplicador bifásico entre Chisholm e experimental

COMPARAÇÃO COM OUTRAS CORRELAÇÕES

Vários trabalhos foram desenvolvidos por Lockhart (1947) e Isbin et alli (1987) utilizando correlações gráficas para o cálculo dos multiplicadores bifásicos e da perda de pressão por atrito em escoamento bifásico, e portanto menos práticos e bastante trabalhosos quando comparados com aqueles que utilizam equações algébricas como função de parâmetros adimensionais. Apesar disto, estes trabalhos foram extremamente úteis para um bom entendimento dos fenômenos físicos durante escoamento bifásico, bem como dos parâmetros adimensionais associados a este.

Chisholm (1967, 1973 e 1983) publicou importantes trabalhos nesta área e contribuiu consideravelmente na obtenção de correlações para estimativa da perda de pressão por atrito em escoamento bifásico, aplicadas para diversos fluidos. A forma matemática desta correlação (Chisholm, 1973) é:

$$\phi L_0^2 = 1 + (\Gamma^2 - 1) \cdot [B \cdot x^*(1-x)]^{0,875} + x^{1,75} \quad (9)$$

O desvio absoluto médio obtido entre esta correlação e os resultados experimentais foi de 12,9 %. A Fig. 4 apresenta uma comparação gráfica entre os valores de " ϕL_0^2 " obtidos através desta correlação (Eq. 9) e os dados obtidos experimentalmente. Pode-se observar que os valores calculados através da correlação de Chisholm para ambos R-134a e R-12 e os dados experimentais colocam-se dentro de uma faixa de ± 20 %, havendo uma tendência desta correlação para superestimar os resultados experimentais para baixos títulos e subestimá-los para altos títulos.

Da mesma forma, Jung et alli (1989) obtiveram uma equação algébrica para o multiplicador bifásico para a fase líquida " ϕL_0^2 ", utilizando os refrigerantes R-22, R-114, R-12 e R-152a, descrita matematicamente na Eq. 10.

Uma comparação gráfica entre os valores de " ϕL_0^2 " obtidos através desta correlação (Eq. 10) e os dados obtidos experimentalmente esta apresentada na Fig. 5. Os valores calculados através da correlação de Jung e Radermacher superestimam os dados experimentais em média da ordem de 25 %. Isto pode ser explicado devido ao fato de que esta correlação foi obtida assumindo que a perda de pressão total durante evaporação horizontal destes refrigerantes, e então a seção de testes não adiabática, e devida somente ao atrito e portanto o termo de aceleração foi desprezado, fazendo assim com que os valores correlacionados superestimasse a perda de pressão somente por atrito.

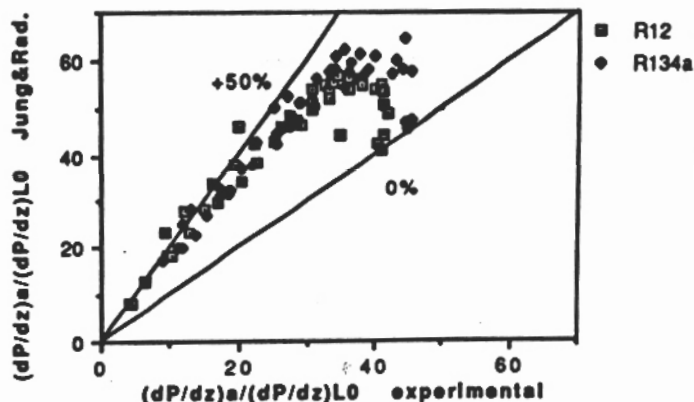


Figura 5 - Comparação para o multiplicador bifásico entre Jung&Rad. e experimental

CONCLUSÕES

Na maioria dos experimentos realizados, os regimes de escoamento observados foram predominantemente anular. Para baixos títulos e baixos fluxos de massa os regimes de escoamento observados foram tipicamente estratificado-ondulado,

enquanto que para altos títulos e altos fluxos de massa os regimes de escoamento observados foram tipicamente anular-tipo névoa, enquanto que na região intermediária de títulos e fluxos de massa os regimes observados foram tipicamente anular.

O multiplicador bifásico para a fase líquida "OLO", definido em termos da razão da perda de pressão por atrito observada e aquela supondo que todo o fluido escoe na fase líquida, mostrou-se uma função da razão de densidades e viscosidades entre as fases líquido-gás e do título da mistura ou "Xtt" (parâmetro de Lochhart-Martinelli), bem como do número de Froude "Frl" (função do fluxo de massa).

A correlação desenvolvida para a perda de pressão local por atrito em tubos lisos durante escoamento bifásico de refrigerantes, representada pelas Eqs. 10, 11 e 12, mostrou-se adequadamente bem correlacionada através dos parâmetros adimensionais "Xtt" e "Frl" com um desvio absoluto médio de 4,6 %.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio e suporte financeiro do ACRC (Air Conditioning and Refrigeration Center) associado à Universidade de Illinois em Urbana-Champaign, fundamentais para a realização do trabalho aqui descrito.

NOMENCLATURA

B coeficiente proposto por Chisholm(1973)
 D diâmetro interno do tubo (m)
 F coeficiente de atrito
 g aceleração da gravidade (m/s²)
 G fluxo de massa (Kg/m²*s)
 l comprimento total do evaporador (m)
 n número de experimentos realizados
 P pressão (Pa)
 DP perda de pressão ao longo do evaporador (Pa)
 x título (%)
 Dx variação de título ao longo do evaporador (%)

Letras Gregas e Grupos Adimensionais

ρ densidade (Kg/m³)
 μ viscosidade dinâmica (Pa*s)
 σ índice de propriedades,
 $(\rho_l/\rho_v)^{0.5} * (\mu_v/\mu_l)^{0.125}$
 Frl número de Froude, $G^2/(r_l^2 * g * D)$
 Rel número de Reynolds, $G * D / \mu_l$
 X parâmetro de Lochhart-Martinelli,
 $(\partial p / \partial z)_l / (\partial p / \partial z)_v)^{0.5}$

Subscritos

a atrito
 calc calculado através de correlação
 exp determinado experimentalmente
 l líquido
 L somente fase líquida escoando no tubo
 LO todo o fluido escoando na fase líquida
 v vapor
 tt turbulento-turbulento

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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.

Wattelet, J. P., "Design, Building, and Baseline Testing of an Apparatus Used to Measure Evaporation Characteristics of Ozone-Safe Refrigerants", Tese de Mestrado, Universidade de Illinois em Urbana-Champaign, Jan/1991

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

Tong, L. S., "Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967

Wallis, G. B. - "One-dimensional Two-Phase Flow" McGraw-Hill, Inc. - New York, 1969

Chisholm, D - "Two-Phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers" - Longman Inc - New York, 1983.

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

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.

1989 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers - Atlanta, USA.

Lockhart, R. W. and Martinelli, R. C. - "Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes" - Chemical Engineering Progress, Vol. 45 N 1, pp.39-48, 1947.

Martinelli, R. C. and Nelson, B. - "Prediction of pressure drop during forced-circulation boiling water" - Transactions of the ASME, pp. 695-702, 1948.

Baroczy, C. J. - "A systematic correlation for two-phase pressure drop" - Chemical Engineering Progress Symposium Series, Heat Transfer-Los Angeles, pp. 232-249, 1987

Isbin, H. S. et all - "Steam-water pressure drops" - Chemical Engineering Progress Symposium Series - Nuclear Engineering, N 23 Vol. 25, pp.75-84, 1987

Chisholm, D. - "Pressure Gradients due to friction during the flow of evaporating two-phase mixtures in smooth tubes and channels", Journal Heat and Mass Transfer 1973, V 16, pp. 347-358.

Chisholm, D. - "The influence of mass velocity on friction pressure gradients during steam-water flow" - Proc. Instn. Mech. Engrs. 1967-1968, Vlo. 182 Pt 3H.

Jung, D. S. and Radermacher, R. - "Prediction of pressure drop during horizontal annular flow boiling of pure and mixed refrigerants" - International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 32 N 12, pp. 2435-2446, 1989.

ABSTRACT

An theoretical and experimental study of local loss pressure by friction in smooth tubes during a two-phase flow was realized using R-134a and R-12, with observed flow patterns which vary since stratified-wavy for low mass flux and quality to "misty annular" for high mass flux and quality. The developed correlation for local pressure loss by friction was adequated.