

AVALIAÇÃO DOS MULTIPLICADORES BIFÁSICOS NO ESCOAMENTO DA MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE R134A AO LONGO DE UM TUBO DE PEQUENO DIÂMETRO

Héryca Olenir Sousa Castro
heryca@fesurv.br

José Luiz Gasche

UNESP-Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Brasil Centro 56, Ilha Solteira –SP – CEP 15385 000
gasche@dem.feis.unesp.br

Resumo. Neste trabalho apresenta-se uma investigação experimental do escoamento da mistura óleo éster ISO VG10-refrigerante R134a com formação de espuma ao longo de um tubo reto horizontal de diâmetro interno igual a 3,22 mm e comprimento de 6 m. Uma bancada experimental foi projetada para permitir a medição dos perfis longitudinais de pressão e de temperatura do escoamento ao longo do tubo, assim como a visualização dos padrões do escoamento bifásico. Os testes foram realizados para diferentes vazões, várias concentrações de refrigerante na entrada do escoamento e temperaturas de entrada em torno de 30 °C. Os perfis de pressão medidos foram usados para calcular a queda de pressão viscosa local ao longo do escoamento. Esses dados foram, então, comparados com os resultados dos modelos de predição de queda de pressão viscosa para escoamentos bifásicos em tubos de pequenas dimensões propostos por Wang et al. (2000), Barbosa et al. (2004)) e, também com os resultados fornecidos pelo modelo homogêneo. Todas as correlações testadas falharam ao prever a queda de pressão do escoamento da mistura óleo éster ISO VG10 e refrigerante R-134a. Na região de escoamento bifásico com baixos valores de título, a correlação proposta por Barbosa et al. (2004) foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais. Na região de altos valores de título, onde o padrão de escoamento de espuma foi observado, a correlação de Wang et al. (2000) e o modelo homogêneo superestimaram o gradiente de pressão viscoso em relação aos dados experimentais. Entretanto, a correlação proposta por Barbosa et al. (2004) subestimou os resultados nesta região.

Palavras chaves: multiplicadores bifásicos,, mistura óleo-refrigerante, escoamento bifásico, espuma.

1. Introdução

Para o ciclo de refrigeração, uma boa miscibilidade do refrigerante no óleo lubrificante é requerida para permitir um fácil retorno do óleo para o compressor. Entretanto, dentro do compressor, esta miscibilidade modifica consideravelmente os vazamentos de gás refrigerante através das diversas folgas, a lubrificação das partes móveis e a eficiência dos mancais. A solubilidade do refrigerante no óleo depende da temperatura da pressão, reduzindo com o aumento da temperatura e com a redução da pressão. Consequentemente, quando a mistura óleo-refrigerante escoar pelos diversos canais do compressor, a queda de pressão causada pelo atrito produz uma redução de solubilidade da mistura, o que faz com que o refrigerante evapore, formando bolhas de refrigerante ao longo do escoamento (flashing flow). Calvert (1990) mostra que o comportamento deste tipo de escoamento é muito diferente do comportamento dos escoamentos bifásicos convencionais (em bolhas, pistonado, anular, etc.) quando a fração de vazio alcança valores da ordem de 0,7 (Winkler et al., 1994), onde a formação de espuma é geralmente observada. Portanto, o entendimento geral do escoamento deste tipo de mistura com formação de espuma em pequenos canais é importante para desenvolver uma base de conhecimentos na qual modelos de vazamento de gás e de lubrificação possam ser construídos.

Principalmente nas décadas de 80 e 90, vários trabalhos relacionados com misturas óleo-refrigerante foram desenvolvidos. Alguns destes trabalhos foram direcionados à determinação de propriedades termofísicas das novas misturas em razão da necessidade de substituição dos refrigerantes halogenados (Martz *et al.*; 1996, Grebner and Crawford., 1993; Thomas and Pham, 1992; Baustian *et al.*, 1986; Thome, 1995; e Van Gaalen *et al.*, 1990, 1991). Outros autores concentraram seus estudos no comportamento dos escoamentos de refrigerantes contaminados com óleo lubrificante (misturas ricas em refrigerante) com o objetivo de analisar o escoamento e a transferência de calor dessas misturas em evaporadores e condensadores. Alguns exemplos são os trabalhos de Schlager *et al.* (1987), Jensen e Jackman (1984), Wallner e Dick (1975) Hambraeus (1995) e Mitrovic (1998).

Motta *et al.* (2001) apresentou uma boa revisão da literatura sobre o escoamento de misturas óleo-refrigerante. É importante notar que a maioria dos trabalhos são relacionados a escoamentos de mistura com baixa concentração de óleo (menos de 5%), ou seja, escoamentos nos quais o óleo é tratado como sendo o contaminante. Existem poucos estudos sobre escoamentos de misturas óleo-refrigerante nos quais o refrigerante age como contaminante, ou seja, misturas ricas em óleo.

Um destes trabalhos foi realizado por Lacerda *et al.* (2000), que investigaram experimentalmente o escoamento bifásico da mistura óleo-refrigerante ao longo de um tubo longo usando a mistura óleo mineral-refrigerante R12. Os

autores mediram as distribuições de pressão e de temperatura ao longo do escoamento da mistura através de um tubo metálico de diâmetro interno igual a 2,86 mm e 6,0 m de comprimento. Além disso, visualizaram os padrões de escoamento da mesma mistura escoando através de um tubo de vidro de 3,03 mm de diâmetro interno. Os resultados da visualização mostraram a existência do escoamento de espuma no final do tubo, onde uma grande redução de temperatura e de pressão foram obtidas. Poiate Jr. e Gasche (2002) obtiveram distribuições de pressão e de temperatura similares para a mesma mistura escoando através de um tubo de 3,22 mm de diâmetro, além de resultados de visualização semelhantes para a mistura escoando através de um tubo de vidro de 3,0 mm de diâmetro interno. Embora as condições de operação dos testes nesses dois trabalhos tenham sido diferentes, os resultados são qualitativamente iguais.

Recentemente, Barbosa *et al.* (2004) apresentaram uma análise das metodologias disponíveis para avaliar a queda de pressão devido ao atrito em escoamentos bifásicos gás-líquido de misturas óleo-refrigerante ricas em óleo em tubos de pequeno diâmetro. Várias correlações e métodos para o cálculo da queda de pressão devido ao atrito foram investigadas pelos autores, algumas delas baseadas em dados para escoamento em canais de pequenas dimensões. Os resultados mostraram que nenhuma das metodologias se ajustou adequadamente aos dados experimentais obtidos para o escoamento da mistura óleo mineral-refrigerante R12 através de um tubo horizontal de 5,3 m de comprimento e 2,86 mm de diâmetro interno. Em função disso, os autores propuseram uma nova correlação para prever a queda de pressão viscosa para este tipo de escoamento.

Neste trabalho algumas correlações citadas por Barbosa *et al.* (2004) (Wang *et al.* (2000), Modelo Homogêneo) e aquela proposta pelos próprios autores são testadas para correlacionar os dados dos gradientes de pressão experimentais obtidos para o escoamento da mistura óleo éster-refrigerante R134a ao longo de um tubo reto horizontal de 3,22 mm de diâmetro interno e 6 m de comprimento.

2. Método experimental

A bancada experimental foi projetada para produzir escoamentos em regime permanente da mistura óleo-refrigerante através de dois tubos retos horizontais de 6 m de comprimento de tal forma que três padrões de escoamento pudessem ser observados: um escoamento de mistura no estado líquido na entrada do tubo, uma região intermediária de escoamento bifásico com pequeno número de bolhas (escoamento bifásico denominado aqui de convencional) e um escoamento de espuma na região próxima ao final do tubo. Um tubo metálico foi instrumentado com transdutores de pressão e termopares para permitir a medição das distribuições de pressão e de temperatura ao longo do escoamento. Um tubo de vidro foi usado para permitir a visualização dos padrões de escoamento.

2.1 Bancada experimental e instrumentação

Um esquema geral simplificado da bancada experimental é mostrado na Fig. 1. Basicamente, a bancada experimental é composta de quatro tanques, seção de testes, uma linha de retorno de gás, uma linha de retorno de óleo, instrumentação e um sistema de aquisição de dados. Todos esses equipamentos são montados de tal forma a produzir o escoamento da mistura óleo-refrigerante através de um tubo metálico de 3,22 mm (± 0.03) de diâmetro interno e de 6 m de comprimento ou através de um tubo de vidro de 3,0 mm de diâmetro interno e 6 m de comprimento. O tubo metálico é equipado com 10 transdutores de pressão (± 2 kPa) e 15 termopares tipo T AWG36 ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) instalados na superfície do tubo. O tubo de vidro é usado para a visualização do escoamento.

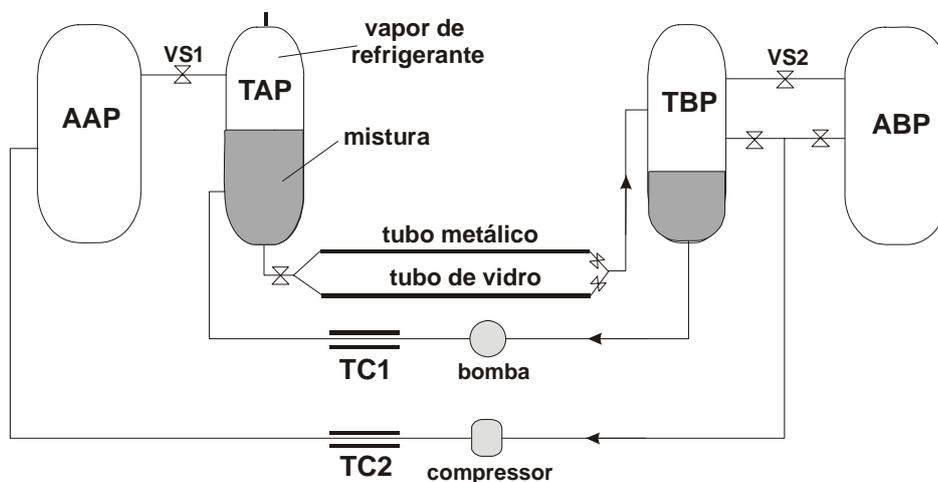


Figura 1. Esquema geral simplificado da bancada experimental.

O principal objetivo dos quatro tanques é manter constante a diferença de pressão entre os tanques de alta e de baixa pressão (TAP, TBP), que são conectados pelos dois tubos que compõem a seção de testes. O tanque de alta pressão (TAP) é abastecido com óleo e refrigerante, de tal forma que uma mistura líquida na parte inferior do tanque coexiste em equilíbrio com refrigerante no estado de vapor na parte superior do tanque, sob certas condições de pressão e temperatura desejadas. Sensores de pressão e de temperatura monitoram as condições do vapor de refrigerante e da mistura líquida nos dois tanques. Dois acumuladores de alta e baixa pressão (AAP, ABP) operando em níveis de pressão maior e menor do que os níveis de pressão no TAP e TBP, respectivamente, mantêm as pressões no TAP e TBP constantes por meio da abertura e fechamento de duas válvulas solenóides (VS1, VS2), controladas pelo sistema de aquisição de dados. Durante a operação, a mistura líquida em equilíbrio no TAP é direcionada para um dos dois tubos, dependendo do tipo de teste desejado: para o tubo de vidro se testes de visualização de escoamento são desejados ou para o tubo metálico instrumentado se medições das distribuições de pressão e de temperatura são requeridas.

Equipamentos auxiliares consistem em um compressor, uma bomba e dois trocadores de calor (TC1, TC2). O compressor é empregado para retornar o refrigerante ao AAP e a bomba é usada para retornar a mistura líquida ao TAP após a realização dos testes. Os trocadores de calor são utilizados para resfriar ambos os fluidos, caso necessário. Os dados de todos os sensores, inclusive os dados de sensores de monitoramento das condições de operação dos testes, foram armazenados em um microcomputador através de um sistema de aquisição automático de dados. Todos os instrumentos foram calibrados no local usando o sistema de aquisição de dados.

2. 2 Procedimento Experimental

Primeiramente, todas as partes necessária da bancada experimental foram limpas com um líquido solvente e o sistema foi evacuado a uma pressão absoluta de 10 Pa. Depois disso, 80 kg de óleo éster ISO VG10 foram colocados no TAP e aquecidos até 60°C durante três horas com a bomba de vácuo em funcionamento para facilitar a retirada de impurezas. A seguir, 60 kg de refrigerante R134a foram colocados parcialmente no AAP e TAP.

Todos os testes são iniciados com a saturação do óleo no TAP com refrigerante para uma dada temperatura e para uma pressão inicial, p_i , de 100 mbar acima de pressão desejada no teste, p_b , ou seja, para uma pressão de $p_i = p_b + 100$ mbar. Para aumentar a taxa de absorção, borbulha-se o refrigerante dentro do TAP usando o compressor, que retira o refrigerante da parte superior do TAP e o comprime na parte inferior do TAP. Quando o refrigerante é absorvido pelo óleo, a pressão tende a diminuir, o que ativa a abertura da VS1, que libera refrigerante para manter a pressão no TAP constante. Esse processo continua até que a saturação do óleo seja atingida para a pressão p_i . O processo de saturação pode durar até seis horas, dependendo das condições de operação desejadas no teste. Depois que a saturação é conseguida para a pressão p_i , alguma quantidade de refrigerante da parte superior do TAP é liberada para reduzir a pressão até p_b , que é a pressão desejada no teste. Essa redução de pressão promove uma rápida liberação de refrigerante na forma de bolhas de vapor da mistura líquida (*outgassing*), assegurando que a saturação foi estabelecida na pressão p_i ($\pm 1\%$ do valor). Esse novo estado de saturação é alcançado dentro de 30 a 60 minutos após o início do processo, e é observado quando a pressão no TAP permanece inalterada, ou seja, a liberação de bolhas dentro da mistura líquida para de ocorrer. Durante todo o processo de saturação, a temperatura dentro do TAP é controlada no valor desejado com uma incerteza de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Após o processo de saturação, dependendo do tipo de teste desejado, visualização ou medição, as válvulas da seção de testes são manipuladas para promover o escoamento da mistura saturada através do tubo de vidro ou tubo metálico instrumentado, respectivamente. Durante o teste, o compressor permanece ligado para retornar o refrigerante do ABP para o AAP. A aquisição de dados inicia-se após o estabelecimento do regime permanente no escoamento, que é monitorado pela temperatura de saída do escoamento.

Antes de iniciar os experimentos com misturas, realizou-se alguns testes com o escoamento de óleo puro através do tubo metálico usando nitrogênio para pressurizar o óleo no TAP. Esses testes foram usados para validar a bancada experimental. Além disso, serviram para validar a metodologia adotada para obter a vazão mássica do escoamento, que foi baseada no uso do gradiente de pressão estabelecido na entrada do escoamento, região onde o escoamento ainda está no estado líquido e é completamente desenvolvido. Detalhes da validação da bancada experimental podem ser encontrados em Poiate Jr. (2001).

2. 3 Gradiente de pressão viscoso

Em escoamentos bifásicos em tubos, de uma maneira geral, o gradiente total de pressão ao longo do escoamento poder ser dividido em quatro termos. Um dos termos leva em consideração a contribuição da variação da área da seção transversal do tubo no gradiente de pressão total. Um outro termo inclui a contribuição da força gravitacional na variação de pressão e existirá apenas no caso do tubo estar inclinado em relação à horizontal. Um terceiro termo incorpora o efeito da aceleração do escoamento causado pelo aumento da fração de vazão do escoamento. Finalmente, o quarto termo contabiliza a variação da pressão devido ao atrito. Para tubos de seção transversal constante posicionado na horizontal o primeiro e o segundo termos são nulos, restando apenas as contribuições do termo de aceleração e de atrito.

Usualmente, o termo de atrito do escoamento bifásico é substituído por um termo de atrito monofásico, acompanhado de um coeficiente de correção denominado multiplicador bifásico. O gradiente de pressão monofásico é calculado usando as correlações usuais aplicadas aos escoamentos monofásicos. Os multiplicadores bifásicos, por sua vez, são estimados por meio de diversas correlações obtidas a partir de dados experimentais para diversas situações de escoamentos bifásicos.

No presente trabalho, o gradiente de pressão experimental devido ao atrito em uma determinada posição z é calculado pela seguinte equação:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{f,TP} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{Total} - \left(\frac{dp}{dz}\right)_{ac} \quad (1)$$

onde

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{Total} = \frac{p_{i+1} - p_i}{z_{i+1} - z_i}, \quad i = 1 \text{ a } 9 \quad (2)$$

sendo $(dp/dz)_{Total}$ o gradiente de pressão total medido experimentalmente, p_i a pressão medida na posição “ i ” e z_i é a posição do transdutor ao longo do tubo. A pressão é medida em 9 posições ao longo do escoamento, portanto, i varia de 1 a 9.

Segundo Barbosa *et al.* (2004), o gradiente de pressão devido à aceleração do fluido, $(dp/dz)_{ac}$, é calculado por:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{ac} = G^2 \left[\left(\frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{dx}{dz} - \frac{x}{\rho_G^2} \frac{d\rho_G}{dz} - \frac{(1-x)}{\rho_L^2} \frac{d\rho_L}{dz} \right] \quad (3)$$

onde G é o fluxo de massa total, ρ_G é a densidade do R-134a no estado vapor, ρ_L é a densidade da mistura óleo-refrigerante líquida, x é o título do escoamento e z é uma determinada posição ao longo do tubo. Os gradientes dx/dz , $d\rho_G/dz$ e $d\rho_L/dz$ são estimados de maneira similar ao $(dp/dz)_{Total}$.

Supondo que em cada posição z a mistura líquida permanece sempre saturada de refrigerante, pode-se calcular o título local usando a conservação da massa para o óleo e para o refrigerante, o que fornece a seguinte equação para o título local:

$$x = \frac{w_e - w}{1 - w} \quad (4)$$

onde w_e é a concentração do refrigerante no óleo dentro do tanque de alta pressão. Esta concentração é calculada por meio de uma equação para a solubilidade do refrigerante no óleo obtida através de ajuste de dados fornecidos pela empresa EMBRACO, usando a pressão e a temperatura medidas dentro do tanque de alta pressão. Por outro lado, w é a concentração local em uma determinada posição z ao longo do tubo, dada pela mesma equação, mas usando a pressão e a temperatura medidas na posição z .

O gradiente de pressão devido ao atrito, calculado pela Eq. 1, é denominado de gradiente de pressão viscoso experimental. Este gradiente é comparado com gradientes de pressão obtidos de correlações empíricas encontradas na literatura, que usam multiplicadores bifásicos como metodologia. A seguir são apresentadas as correlações, denominados gradientes teóricos neste trabalho.

2. 3.1 Correlação de Wang *et al.* (2000)

Wang *et al.* (2000) propôs uma correlação empírica para a mistura ar-água escoando em um tubo de 3 mm de diâmetro interno. Os autores dividiram os dados experimentais em duas regiões: uma região onde os multiplicadores bifásicos são dependentes do fluxo de massa e outra, onde os multiplicadores são independentes do fluxo de massa. Todos os resultados da mistura óleo éster-refrigerante R-134a estudadas neste trabalho estão incluídas na região onde os multiplicadores são independentes do fluxo de massa. Para esta região, o multiplicador bifásico é dado por:

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C_1}{X} + \frac{C_2}{X^2} \quad (5)$$

onde

$$C_1^2 = \left[5 + \left(\frac{Re_G}{Re_L} \right)^{0,3} \right] + \frac{Re_{LO}}{17} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{0,05Re_L}{Re_G} \quad (7)$$

$$X^2 = \frac{(dp/dz)_{f,L}}{(dp/dz)_{f,G}} \quad (8)$$

e Re_G é o número de Reynolds calculado considerando o escoamento monofásico do gás com vazão em massa Gx , Re_L é o número de Reynolds calculado considerando o escoamento monofásico de líquido com vazão em massa $G(1-x)$ e Re_{LO} é o número de Reynolds calculado considerando o escoamento monofásico do líquido com vazão em massa G .

Os gradientes de pressão monofásicos foram estimados utilizando-se as equações:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,L} = 2f \frac{[G(1-x)]^2}{\rho d} \quad (9)$$

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,G} = 2f \frac{(Gx)^2}{\rho d} \quad (10)$$

onde f é o fator de atrito de Fanning. Neste trabalho foi utilizada a equação de Churchill (1977) para o cálculo do fator de atrito devido à sua aplicabilidade a todos os regimes de escoamento: laminar, transição e turbulento.

Assim o gradiente de pressão bifásico devido ao atrito pode ser calculado pela equação:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,TP} = \Phi_L^2 \left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,L} \quad (11)$$

2.3.2 Correlação de Barbosa *et al.* (2004)

Barbosa *et al.* (2004) adaptaram a correlação de Chisholm (1967) para o multiplicador bifásico do gás utilizando os resultados experimentais de Lacerda (2000). Como uma aproximação grosseira, os autores recomendaram a utilização desta nova correlação para misturas com características termodinâmicas e propriedades termofísicas similares, tal como a mistura óleo éster-refrigerante R-134a e (mistura estudada neste trabalho).

A seguinte correlação foi proposta:

$$\Phi_G^2 = 1,24 \left(\frac{x}{1-x} \right) (1-w) + \left[1,95 \exp \left(6,94 \times 10^{-3} \frac{Re_G}{Re_L} \right) X \right] + X^2 \quad (12)$$

Assim, o gradiente de pressão bifásico viscoso pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,TP} = \Phi_G^2 \left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,G} \quad (13)$$

onde

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,G} = 2f_G \frac{(Gx)^2}{\rho_G d} \quad (14)$$

2.3.3 Correlação do Modelo Homogêneo

Nos modelos de análise do escoamento encontrados na literatura a abordagem geralmente empregada consiste em tratar o escoamento bifásico como homogêneo, isto é, considerar as fases líquida e vapor com velocidades iguais. O modelo homogêneo fornece bons resultados se a $\rho_l/\rho_g < 10$ ou se $G > 2000 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Em termos do fator de atrito de

Fanning, o multiplicador bifásico que resultaria se toda a vazão em massa do escoamento fosse somente de líquido é dado pela seguinte equação:

$$\Phi_{LO}^2 = \frac{f_H \rho_L}{f_{LO} \rho_H} \quad (15)$$

onde ρ_H é a densidade homogênea dada por:

$$\frac{1}{\rho_H} = \frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \quad (16)$$

e f_{LO} é o fator de atrito monofásico calculado considerando que toda a vazão em massa do escoamento seja somente de líquido, f_H é o fator de atrito homogêneo calculado pelas equações padrões de escoamento monofásico e utilizando o número de Reynolds homogêneo dado por:

$$Re = \frac{Gd}{\mu_H} \quad (17)$$

A equação para a viscosidade homogênea, μ_H , proposta por Beattie e Whalley (1982) é usada neste trabalho:

$$\mu_H = \mu_L (1 - \alpha_H) (1 + 2,5\alpha_H) + \mu_G \alpha_H \quad (18)$$

onde μ_L é a viscosidade dinâmica da mistura óleo-refrigerante, μ_G é a viscosidade dinâmica do refrigerante R-134a e α_H é a fração de vazão.

Assim o gradiente de pressão bifásico viscoso é calculado por:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,TP} = \Phi_{LO}^2 \left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,LO} \quad (19)$$

na qual,

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,LO} = 2f_L \frac{G^2}{\rho_L d} \quad (20)$$

3. Resultados

Distribuições de pressão e de temperatura foram medidos em mais de 30 testes, mas apenas alguns dos resultados são apresentados neste trabalho. Apresenta-se a seguir resultados dos modelos utilizados para o cálculo dos multiplicadores bifásicos para os testes realizados em temperaturas de entrada em torno de 30°C e pressões no TAP de 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 e 6,5 bar. Essas pressões foram escolhidas de tal forma que escoamento de espuma pudesse ser observado na região de saída do escoamento. Todos os testes foram realizados usando uma mistura composta de óleo éster ISO VG10 e refrigerante R134a. Todos os perfis de pressão e de temperatura podem ser vistos em Castro (2006).

3.1 Resultados fornecidos pela correlação de Wang *et al.* (2000)

Utilizando o modelo de Wang *et al.* (2000) e os dados experimentais de pressão e temperatura, calculou-se a razão entre o gradiente de pressão experimental e o gradiente de pressão teórico, denominado aqui de razão de gradiente de pressão. Estes resultados são apresentados nas Figs. 2 a 4.

Para todas as pressões testadas, as maiores diferenças entre o gradiente de pressão experimental e o gradiente de pressão teórico ocorreram numa região intermediária do tubo, aqui denominada de região de escoamento bifásico convencional. Para a maioria dos dados, o modelo superestimou o gradiente de pressão viscoso.

Na Figura 4 (b) são apresentados os resultados de todos os testes utilizando o modelo de Wang *et al.* (2000). Exceto para o Conjunto 5, a razão de gradiente de pressão está mais próxima da unidade na região de maiores títulos, na qual é observado a formação de espuma no escoamento. Na região de escoamento bifásico convencional os resultados obtidos são praticamente independentes da pressão no tanque de alta pressão.

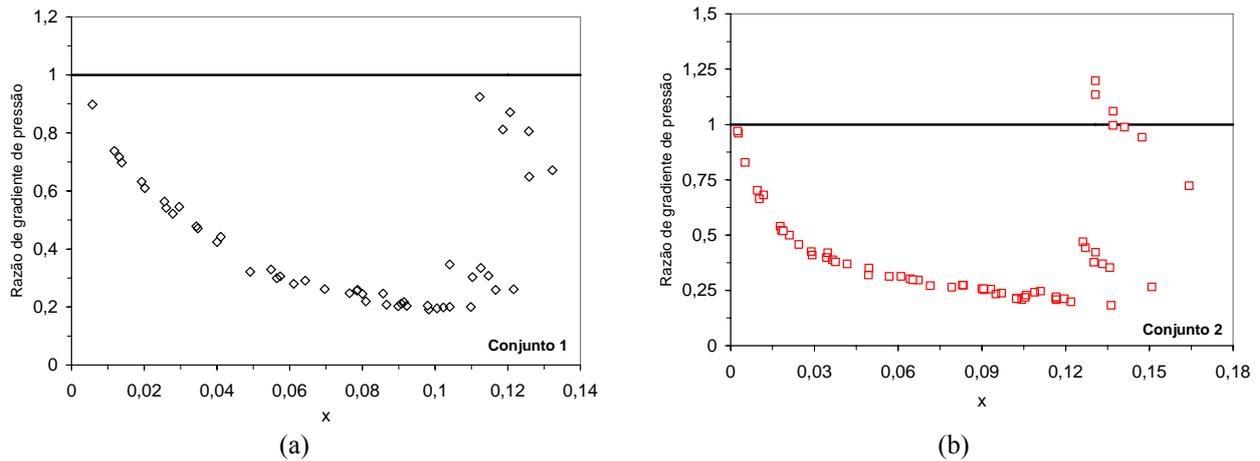


Figura 2. Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000), (a) $p_{TAP} = 4,5$ bar , (b) $p_{TAP} = 5,0$ bar.

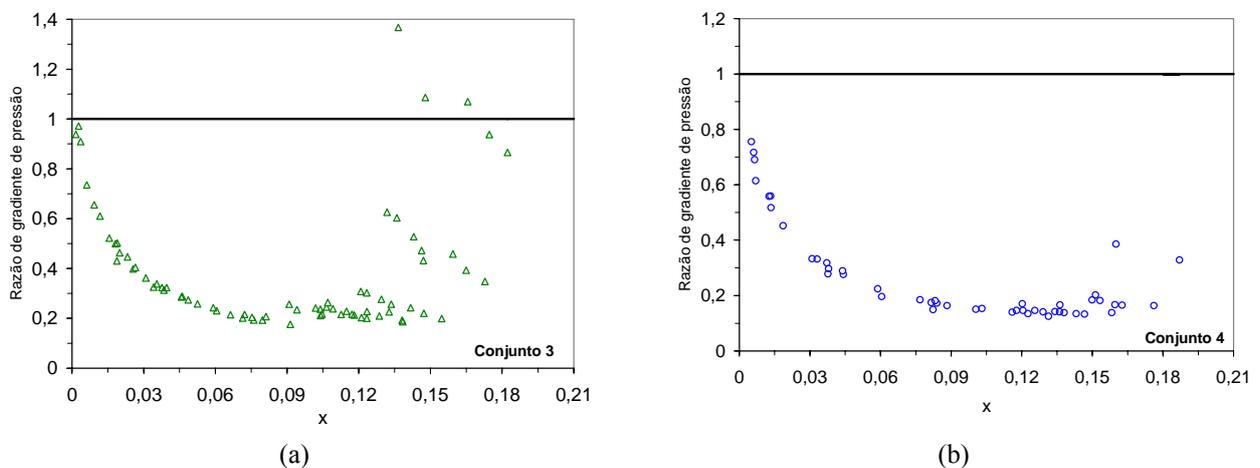


Figura 3. Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000), (a) $p_{TAP} = 5,5$ bar , (b) $p_{TAP} = 6,0$ bar.

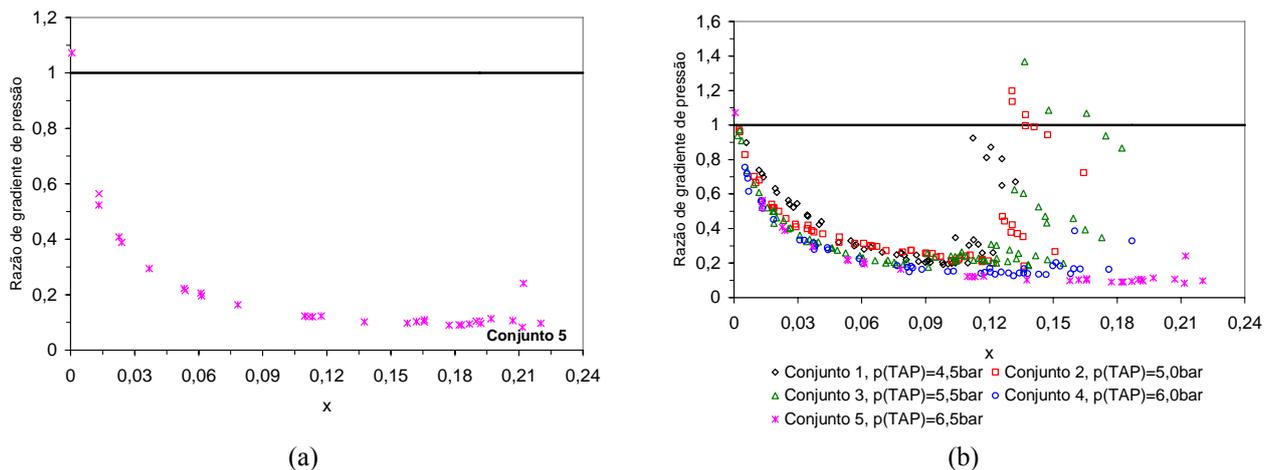


Figura 4. Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000), (a) $p_{TAP} = 6,0$ bar , (b) gráfico mostrando todas as pressões.

3.2 Resultados fornecidos pela correlação de Barbosa *et al.* (2004)

Utilizando o modelo de Barbosa *et al.* (2004) e os dados experimentais de temperatura e pressão , calculou-se a razão entre o gradiente de pressão experimental e o gradiente de pressão teórico. Estes resultados são apresentados nas Figs. 5 a 7.

Para todos os testes, a razão entre o gradiente de pressão experimental e o gradiente de pressão calculado pela correlação de Barbosa *et al.* (2004) apresentou resultados próximos da unidade. Os maiores desvios em relação à unidade ocorreram na região de títulos elevados, na qual o escoamento de espuma é frequentemente observado.

A Figura 7 (b) mostra todos os resultados em um único gráfico. Similar aos resultados obtidos pelo modelo de Wang *et al.* (2000), observa-se que a razão de gradiente de pressão é independente da pressão no tanque de alta pressão na região de escoamento bifásico convencional.

Nota-se na Fig. 7 (b) que existe uma região de título na qual o gradiente de pressão experimental torna-se maior do que o teórico. Os resultados de visualização mostram que nesta região o padrão de escoamento de espuma é predominante. Ao estudar o escoamento de espumas aquosas, Calvert (1990), mostrou que a estimativa de queda de pressão usando o parâmetro de Lockart-Martinelli foi cerca de até 200 vezes menor do que a queda de pressão experimental. Portanto, este tipo de resultado era esperado para a região de espuma.

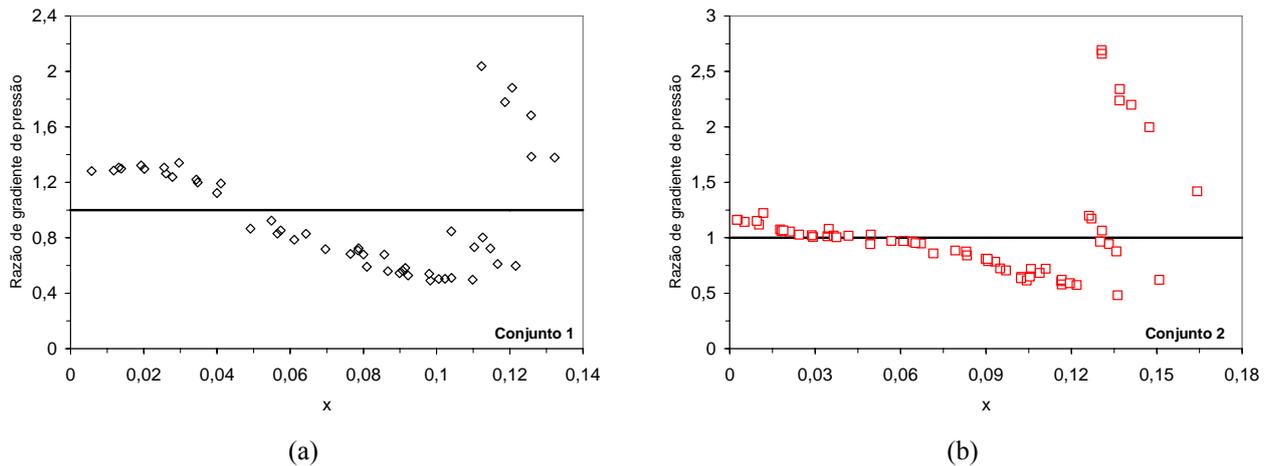


Figura 5. Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004), (a) $p_{TAP} = 4,5$ bar , (b) $p_{TAP} = 5,0$ bar.

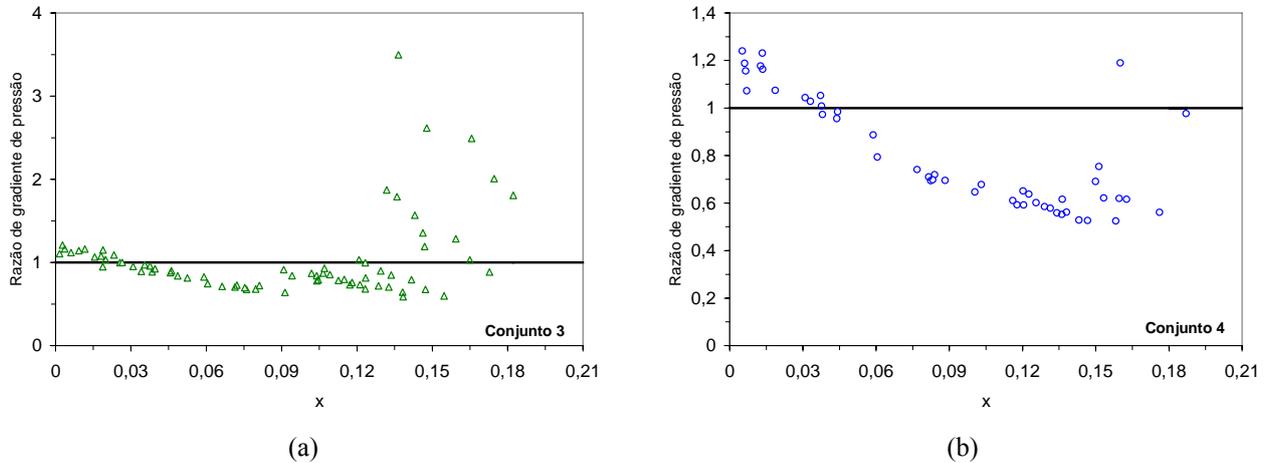


Figura 6. Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004), (a) $p_{TAP} = 5,5$ bar , (b) $p_{TAP} = 6,0$ bar

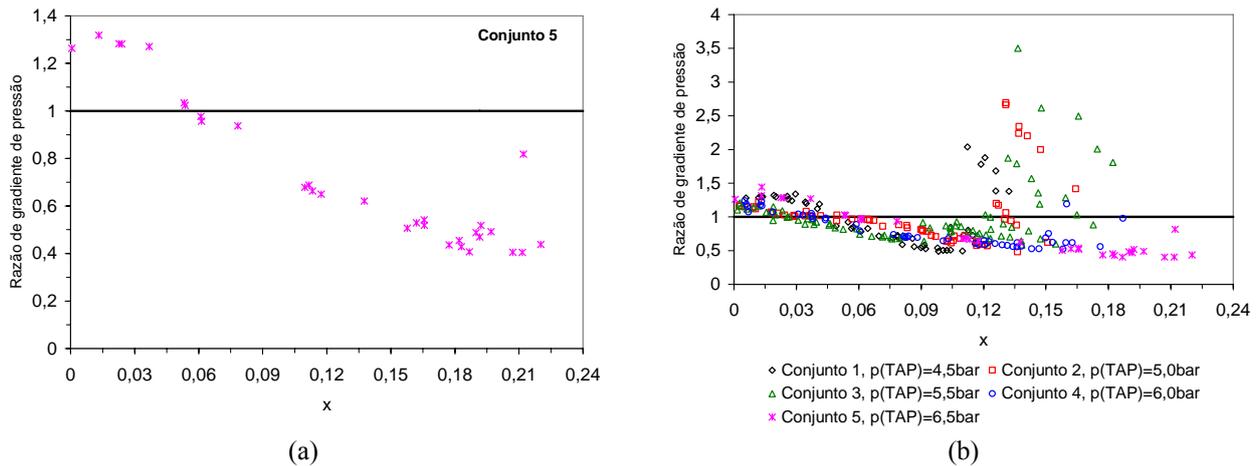


Figura 7. Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004), (a) $p_{TAP} = 6,5$ bar , (b) dados para todas as pressões.

3.3 Resultados fornecidos pelo Modelo Homôgeneo

Utilizando o modelo homogêneo e os dados experimentais de temperatura e pressão, calculou-se a razão entre o gradiente de pressão experimental e o gradiente de pressão teórico. Estes resultados são apresentados nas Figs. 8 a 10.

Independentemente da pressão no tanque de alta pressão, o gradiente de pressão experimental foi menor do que o gradiente de pressão teórico calculado pelo modelo homogêneo para a maioria dos casos. As maiores diferenças ocorreram na região intermediária de título, aqui chamada de escoamento bifásico convencional. As regiões de escoamento em espuma apresentaram resultados mais próximos da unidade.

A Figura 10 (b) apresenta todos os testes realizados. De maneira similar aos resultados obtidos quando as comparações foram feitas usando-se as correlações de Wang *et al.* (2000) e Barbosa *et al.* (2004), observa-se que a razão de gradiente de pressão é independente da pressão no tanque de alta pressão nas regiões de escoamento monofásico e escoamento bifásico convencional.

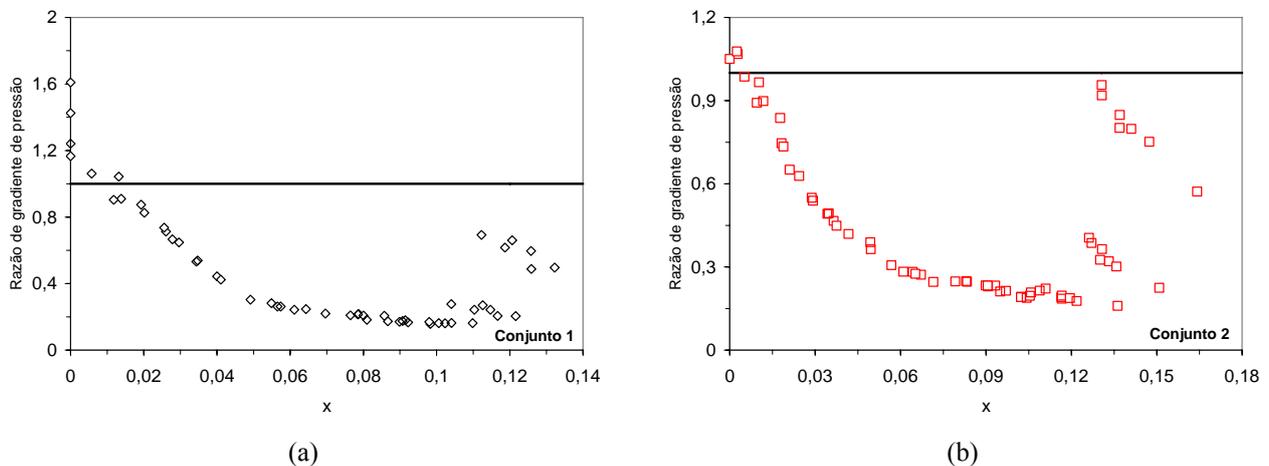


Figura 8. Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Modelo Homôgeneo), (a) $p_{TAP} = 4,5$ bar , (b) $p_{TAP} = 5,0$ bar.

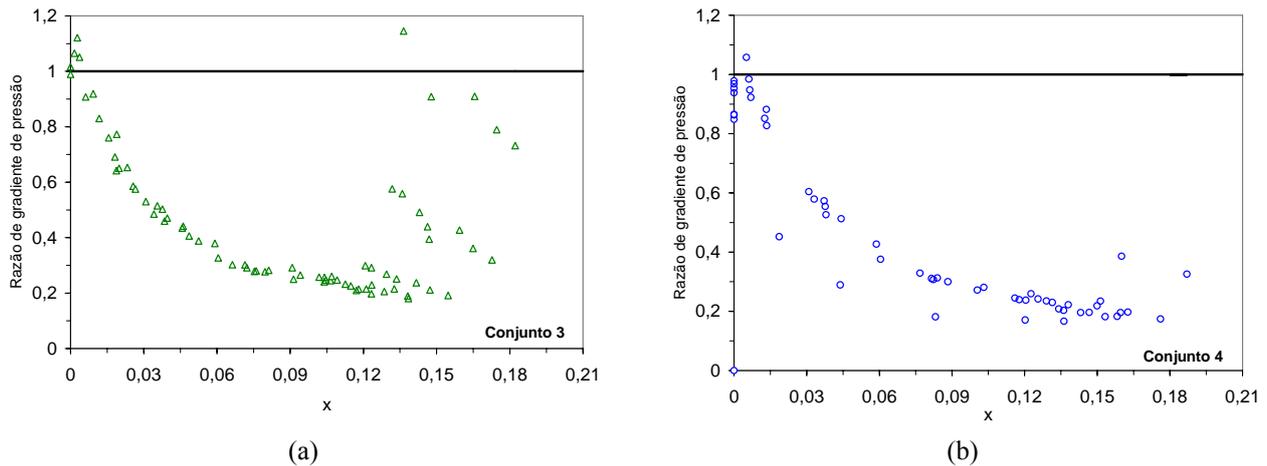


Figura 9. Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Modelo Homogêneo), (a) $p_{TAP}=5,5$ bar , (b) $p_{TAP}= 6,0$ bar.

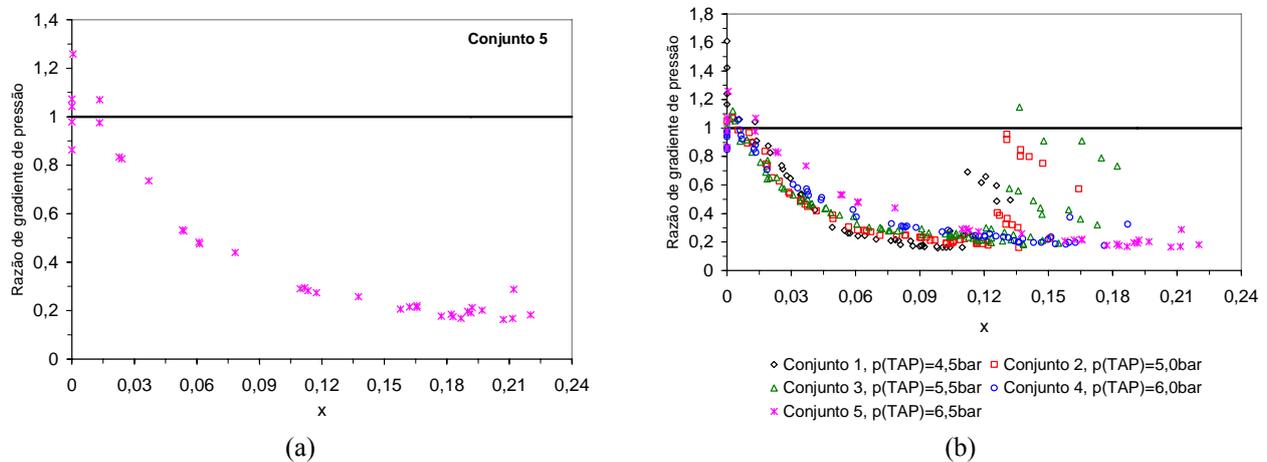


Figura 10. Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Modelo Homogêneo), (a) $p_{TAP}=6,5$ bar , (b) dados para todas as pressões.

Na Figura 11 são plotados os resultados de todos os testes realizados, utilizando-se os modelos de Wang *et al.* (2000), Barbosa *et al.* (2004) e o modelo homogêneo. Observa-se que a correlação de Barbosa *et al.* (2004) descreve melhor os dados experimentais para baixos e moderados títulos, ou seja, apresenta os resultados mais próximos da unidade. Entretanto, na região de elevados títulos, onde prevalece o escoamento de espuma, a correlação de Barbosa *et al.* (2004) falha. Os resultados obtidos utilizando-se a correlação de Wang *et al.* (2000) e o modelo homogêneo são bastante similares na região de escoamento bifásico convencional.

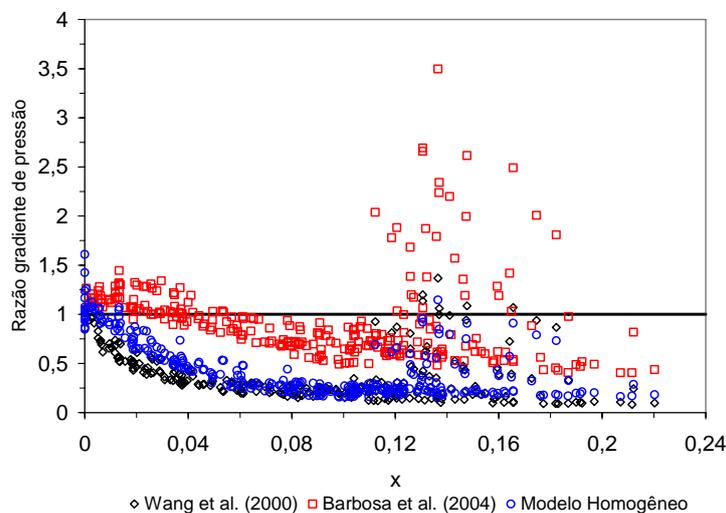


Figura 11. Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para todos os testes.

4. Conclusões

Neste trabalho realizou-se um estudo experimental do escoamento bifásico provocado pela redução de pressão (*flashing flow*) de uma mistura composta por óleo éster ISO VG10 e refrigerante R134a escoando através de um tubo reto horizontal de 3,22 mm de diâmetro e 6 m de comprimento. A principal motivação do trabalho foi analisar a aplicabilidade de correlações de multiplicadores bifásicos existentes na literatura para o cálculo do gradiente de pressão viscoso no caso do escoamento bifásico da mistura. Os resultados experimentais de queda de pressão foram comparados com alguns modelos de previsão de queda de pressão em escoamento bifásico em tubos de pequenas dimensões. Todas as correlações testadas (Wang *et al.* (2000), Modelo Homogêneo, Barbosa *et al.* (2004)) falharam ao prever a queda de pressão do escoamento, evidenciando a necessidade de se obter uma correlação para melhor ajustar os resultados para o escoamento da mistura óleo éster ISO VG10 e refrigerante R-134a. Na região de escoamento bifásico convencional, a correlação proposta por Barbosa *et al.* (2004) foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais. A maior parte dos resultados obtidos na região de escoamento de espuma, observada no final do tubo, utilizando a correlação de Wang *et al.* (2000) e o modelo homogêneo superestimaram o gradiente de pressão viscoso em relação aos dados experimentais. Entretanto, a correlação proposta por Barbosa *et al.* (2004) subestimou os resultados nesta região.

5. Agradecimentos

Esse trabalho foi desenvolvido com apoio da FAPESP - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo.

6. Referências

- Barbosa Fr.; J.R., Lacerda V.T.; Prata, A.T.; 2004, Prediction of pressure drop in refrigerant-lubricant oil flows with high contents of oil and refrigerant outgassing in small diameter tubes, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 27, p. 129-139.
- Baustian, J. J.; Pate, M. B. e Bergles, A. E.; 1986, Properties of oil-refrigerant mixtures liquid with applications to oil concentration measurements: part I – thermophysical and transport properties,” *ASHRAE Transactions*, Vol. 92, p. 55-73.
- Beattie, D. R. H.; Whalley, P. B.; 1982, A simple two-phase frictional pressure drop calculation method, *International Journal Multiphase Flow*, Vol. 8, p. 83 – 87.
- Castro, H.O.S., 2006, Caracterização Experimental do Escoamento Bifásico com Formação de Espuma da Mistura Óleo-Refrigerante R134a ao longo de um Tubo Reto de Seção Constante, *Dissertação de Mestrado*, Unesp-Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira-SP.
- Calvert, J. R.; 1990, Pressure drop for foam flow through pipes, *Internacional Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 11, nº 3, p. 236 -241.
- Chisholm D.; 1967, A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow. *NEL Report nº.310*.
- Churchill, S.W.; 1977, Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes, *Chemistry Engineering*, n.7, p. 91-92.
- Grebner, J. J.; Crawford, R. R.; 1993, Measurement of pressure temperature-concentration relations for mixtures of R12/mineral oil and R134a/synthetic oil, *ASHRAE Transactions*, Vol. 99, Part 1, p. 387-396.
- Hambraeus, K.; 1995, Heat transfer of oil-contaminated HFC134a in a horizontal evaporator, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 18, N. 2, p. 87-99.
- Jensen, M.K., Jackman, D.L., 1984, Prediction of nucleate pool boiling heat transfer coefficients of refrigerant-oil mixtures, *J. Heat Transfer*, Vol. 106, p. 184-190.
- Lacerda, V. T.; 2000, Caracterização experimental do escoamento bifásico da mistura óleo-refrigerante em tubos de pequenos diâmetros, *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- Lacerda, V.T.; Prata, A.T.; Fagotti, F.; 2002, Refrigerant Outgassing from Compressor Lubricant Oil Flowing Through Pipes, *HEFAT'2002 - International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics*, LV1, pp. 195-200.
- Martz, W.L.; Burton, C.M.; Jacobi, A.M.; 1996, Local composition modelling of the thermodynamic properties of refrigerant and oil mixtures, *Internatioanl Journal of Refrigeration*, Vol. 19, No 1, p. 25-33.
- Mitrovic, J., 1998, Nucleate boiling of refrigerant-oil mixtures: bubble equilibrium and oil enrichment at the interface of a growing vapour bubble, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 41, p. 3451-3467.
- Motta, S.F.Y., Braga, S.L., Parise, J.A.R., 2001, Experimental study of adiabatic capillary tubes: critical flow of refrigerant/oil mixtures, *HVAC & R. Research*, N° 7, p. 331-344.
- Poiate Jr., E., Gasche, J.L., 2002, Distribuições de pressão e de temperatura e visualização do escoamento bifásico da mistura óleo mineral-R12, *Brazilian Cong. of Thermal Eng. Sci.*, código CIT02-0843.
- Schlager, L. M., Pate, M. B., Bergles, A. E., 1987, A survey of refrigerant heat transfer and pressure drop emphasizing oil effects and in-tube augmentation, *ASHRAE Transactions*, Vol. 93, Part 1, p. 392-415.

- Thomas, R. H. P.; Pham, H. T.; 1992, Solubility and miscibility of environmentally safer refrigerant/lubricant mixtures, ASHRAE Transactions, Vol. 98, Part 1, p. 783-788.
- Thome, J.R., 1995, Comprehensive thermodynamic approach to modeling refrigerant-lubricant oil mixtures, HVAC & R. Research, Vol. 1, No 2, p. 110-126.
- Van Gaalen, N.A.; Pate, M.B.; Zoz, S.C.; 1990, The measurement of solubility and viscosity of oil/refrigerant mixtures at high pressures and temperatures: test facility and initial results for R22/naphthenic oil mixtures, ASHRAE Transactions, Vol. 96(2), p.183-190.
- Van Gaalen, N.A.; Zoz, S.C.; Pate, P.E.; 1991a, The solubility and viscosity of solutions of R502 in a naphthenic oil and in an alkylbenzene at high pressures and temperatures, ASHRAE Transactions, Vol. 97(2), p. 100-108.
- Van Gaalen, N.A.; Zoz, S.C.; Pate, P.E.; 1991b, The solubility and viscosity of solutions of HCFC-22 in a naphthenic oil and in an alkylbenzene at high pressures and temperatures, ASHRAE Transactions, Vol. 97(1), p. 285-292.
- Wallner, R., Dick, H.G., 1975, Heat transfer to boiling refrigerant-oil mixtures, Proc. Int. Cong. Refrig., Vol. 2, p. 351-359.
- Wang, C. C.; Yang, K. S.; Chang, Y. J.; Lu, D. C.; 2000, Characteristics of air-water two-phase flow in a 3 mm smooth tube, Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 38, p. 1011-7.
- Winkler, W.; Valkó, P. P.; Economides, M. J.; 1994, A rheological model for polymers foams," Society of Petroleum Engineers, Vol. 3, p. 897-906.

TWO-PHASE MULTIPLIERS EVALUATION IN THE OIL-REFRIGERANT R134a MIXTURE FLOW THROUGH A SMALL DIAMETER

Héryca Olenir Sousa Castro

heryca@fesurv.br

José Luiz Gasche

UNESP-College of Engineering at Ilha Solteira, Department of Mechanical Engineering
Av. Brasil Centro 56, Ilha Solteira –SP – CEP 15385 000
gasche@dem.feis.unesp.br

Abstract

An experimental evaluation of the ester oil ISO VG10-refrigerant R134a mixture two-phase flow with foam formation is carried out in this work. The pressure and temperature profiles along the flow through a 3.22 mm internal diameter-5.7 m long tube were measured as well as the flow patterns were observed. Tests were accomplished for different mass flow rates, several refrigerant concentration at the inlet of the tube and inlet temperatures around 30 °C. The measured pressure profiles were used in order to calculate the local viscous pressure gradient along the flow. The experimental viscous gradients were compared with results obtained from three viscous pressure gradient correlations applied to two-phase flows through small dimension tubes: Wang et al. (2000), Barbosa et al. (2004), and the homogeneous model. All correlations failed to predict the experimental gradient of the mixture. The correlation proposed by Barbosa et al. (2004) predicted better for low qualities. For high qualities, where foam flow pattern was observed, the correlation proposed by Wang et al. (2000) and the results from the homogeneous model overpredicted the viscous pressure gradient in relation to the experimental data, while the Barbosa et al. (2004) correlation underpredicted the results for this region.

Keywords: two-phase multiplier, oil-refrigerant mixture, two-phase flow, foam.