

Padrões do Escoamento Bifásico da Mistura Óleo-Refrigerante R134a ao Longo de um Tubo Horizontal de Pequeno Diâmetro

Héryca Olenir Sousa Castro

heryca@dem.feis.unesp.br

José Luiz Gasche

gasche@dem.feis.unesp.br

Wanderson Paterlini Conti

conti@dem.feis.unesp.br

Edson Del Rio Vieira

delrio@dem.feis.unesp.br

UNESP-Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Brasil Centro 56, Ilha Solteira –SP – CEP 15385 000

Resumo. Do ponto de vista do ciclo de refrigeração, uma boa miscibilidade entre o óleo lubrificante e o refrigerante é requerida para facilitar o retorno do óleo para o compressor. Entretanto, do ponto de vista do compressor, esta miscibilidade modifica consideravelmente os vazamentos de gás através das folgas, a lubrificação das partes móveis e o funcionamento dos mancais. Isto ocorre devido à redução da solubilidade do refrigerante no óleo quando a mistura formada escoar para uma região de menor pressão ou de maior temperatura, produzindo uma grande formação de bolhas de gás refrigerante. Esta formação de bolhas dá origem a um escoamento bifásico da mistura através dos diversos tipos de canais do compressor. O comportamento deste escoamento é muito diferente daquele dos escoamentos bifásicos convencionais quando a fração de vazio alcança valores em torno de 0,7, onde o escoamento de uma espuma é observado. Portanto, a compreensão do escoamento da mistura óleo-refrigerante com formação de espuma em canais de pequenas dimensões é essencial para o desenvolvimento de uma base de conhecimentos sobre a qual modelos de vazamentos de refrigerante e de lubrificação possam ser desenvolvidos. Este trabalho apresenta uma investigação experimental dos padrões de escoamento da mistura óleo éster-refrigerante R134a com formação de espuma através de um tubo de 3,22 mm de diâmetro e 6 m de comprimento. Os testes foram realizados para diferentes vazões, várias concentrações de refrigerante e temperaturas da mistura em torno de 28 e 39 °C na entrada do escoamento. Três padrões de escoamento foram visualizados. O escoamento de uma mistura líquida foi observado na entrada do escoamento, enquanto que numa região intermediária do escoamento pôde ser notada a presença de bolhas de diferentes formas e dimensões. No final do tubo, o escoamento de uma espuma foi visualizado. Nessa região, grandes reduções de temperatura e de pressão foram registradas.

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

1. Introdução

No que diz respeito ao 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 do óleo e da pressão de vapor de refrigerante, reduzindo com o aumento da temperatura e com a redução da pressão. Conseqüentemente, quando a mistura óleo-refrigerante escoar pelos diversos canais do compressor, ocorre a formação de bolhas de refrigerante devido à redução da solubilidade, que é causada pela queda de pressão provocada pelo atrito do escoamento (*flashing flow*). Calvert (1990) mostra que o comportamento deste tipo de escoamento é muito diferente dos escoamentos bifásicos convencionais 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 relacionadas a escoamentos de mistura com baixa concentração de óleo (menos de 5%), ou seja, escoamentos nos quais o óleo é tratado como contaminante. Existem poucos estudos sobre escoamentos de misturas óleo-refrigerante nos quais o óleo está contaminado pelo refrigerante.

Lacerda *et al.* (2000) publicou resultados de uma pesquisa experimental sobre o escoamento bifásico da mistura óleo-refrigerante ao longo de um tubo longo usando um óleo mineral e R12 como refrigerante. Os autores mediram as distribuições de pressão e de temperatura do escoamento da mistura através de um tubo metálico de diâmetro interno igual a 2,86 mm. 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 um escoamento de espuma no final do tubo, onde uma grande redução de temperatura e de gradiente de pressão foram medidas.

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 sejam diferentes, os resultados são qualitativamente iguais.

Recentemente, Barbosa Jr. *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.

Com o objetivo de melhorar o entendimento deste tipo de escoamento, este trabalho foi realizado para estudar o comportamento do escoamento bifásico de uma mistura composta por refrigerante R134a e óleo ester ISO VG10 usando a mesma bancada experimental utilizada por Poiate Jr. e Gasche (2002). Serão apresentados resultados para a visualização dos padrões de escoamento em 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 ($\pm 0,03$) 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 ($\pm 0,5$ °C) instalados na superfície do tubo. O tubo de vidro é usado para a visualização do escoamento.

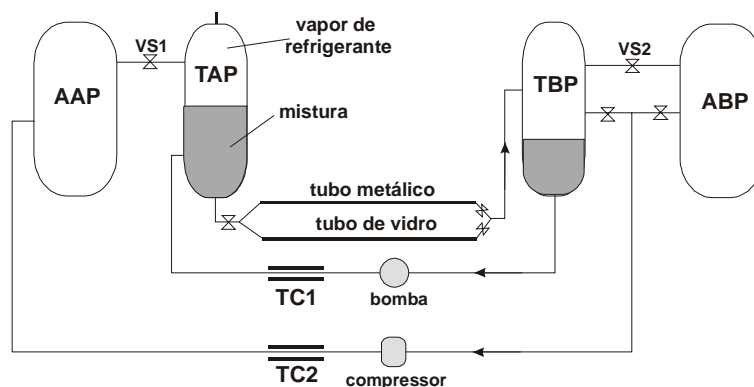


Figura 1 – Esquema geral simplificado da bancada experimental

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, mantém 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 desejado 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 ester ISO VG10 foram colocados no TAP e aquecido 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.

O procedimento inicial de todos os testes é a saturação do óleo no TAP com refrigerante para uma dada temperatura e para uma pressão de 100 mbar acima da pressão desejada no teste, ou seja, para uma pressão de $p_i = p_t + 100$ mbar. Para aumentar a taxa de absorção, borbulha-se o refrigerante dentro do TAP usando o compressor, o qual 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 atingida para a pressão p_i , alguma quantidade de refrigerante da parte superior do TAP é liberada para reduzir a pressão até p_t , 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_t ($\pm 1\%$ do valor). Esse novo estado de saturação é alcançado num período de 30 a 60 minutos após o início do processo, e é observado quando a pressão no TAP para de aumentar, 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 ± 1 °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.

As visualizações dos padrões de escoamento foram realizadas usando uma câmera fotográfica digital Olympus Camedia 3,2 Mpixel com uma objetiva macro. As fotos foram capturadas em formato compactado JPEG, com o auxílio de um tripé, utilizando o flash interno da câmera e balanço automático de branco. As imagens foram processadas no Corel Photo Paint para pequenos ajustes de cor, controle de contraste e reforço da imagem.

Antes de iniciar os experimentos com misturas, realizou-se alguns testes com o escoamento de óleo puro através do tubo metálico usando nitrogênio como fluido de pressurização do 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 de misturas, que foi baseada no uso do gradiente de pressão estabelecido na entrada do escoamento, região onde o escoamento ainda é monofásico e completamente desenvolvido. Detalhes da validação da bancada experimental podem ser encontrados em Poiate Jr. (2001).

2.3. Redução e Interpretação dos dados

Para evitar o desprendimento de refrigerante antes que a mistura alcançasse a seção de testes, não utilizou-se nenhum medidor de vazão. Ao invés disso, a vazão mássica foi calculada usando o gradiente de pressão linear medido na região de entrada do escoamento, onde a mistura ainda encontrava-se no estado líquido e o escoamento já era completamente desenvolvido. A velocidade média usada na determinação da vazão do escoamento foi calculada pela Eq. (1):

$$\bar{V} = \left[\frac{2D}{\rho f} \left(-\frac{dp}{dz} \right) \right]^{1/2} \quad (1)$$

onde D é o diâmetro interno do tubo, ρ é a massa específica da mistura calculada na temperatura e pressão da entrada do escoamento, f é o fator de atrito calculado pela equação proposta por Churchill (1977), e dp/dz é o gradiente de pressão ao longo do escoamento, medido na parte linear da distribuição de pressão.

O número de Reynolds foi definido como:

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (2)$$

onde μ é a viscosidade absoluta da mistura líquida na entrada do tubo. Os valores de ambas as propriedades, μ e ρ , foram fornecidos pelo fabricante do óleo. Os valores de solubilidade do refrigerante no óleo, w , também foram fornecidos pelo fabricante e são dependentes da temperatura e pressão.

As incertezas dos dados reduzidos foram determinadas por meio da propagação das incertezas das variáveis medidas usando a metodologia proposta por Moffat (1988). A incerteza da velocidade média foi de $\pm 5\%$, enquanto a incerteza do número de Reynolds foi de $\pm 10\%$. Como pode ser visto na Eq. (1), a incerteza da velocidade média depende da incerteza do gradiente de pressão longitudinal, dp/dz , que foi estimado pela incerteza do ajuste da curva de pressão na região de gradiente linear, levando em consideração também, a incerteza da medição da pressão.

3. Resultados

Distribuições de pressão e de temperatura foram medidos e os padrões de escoamento foram visualizados em mais de 30 testes, mas apenas alguns dos resultados são apresentados neste trabalho. Os resultados de visualização dos padrões de escoamento, entretanto, são o foco do trabalho. As temperaturas de entrada do escoamento foram de aproximadamente 28 e 39 °C. Para temperaturas em torno de 28 °C, as pressões de saturação dentro do TAP foram de 4,0 e 5,0 bar, enquanto para temperatura de saturação de 39 °C foi de 5,0 bar. Outros testes não apresentados aqui foram realizados para pressões de saturação de 4,5, 5,5 e 6,0 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 ester ISO VG10 e refrigerante R134a.

As Figs. 3 a 6 apresentam os resultados da visualização do teste mostrado na Fig. 2, cuja pressão de entrada foi de 4,0 bar, temperatura de entrada de 27,5 °C e concentração de 35%. Essas figuras apresentam fotografias tiradas na mesma posição em diferentes instantes de tempo. Na Fig. 3, $z = 2,26$ a $z = 2,36$ m, a primeira fotografia mostra minúsculas bolhas de vapor aglomeradas escoando entre películas de líquido localizadas na parede do tubo. Na segunda fotografia, algumas dessas bolhas se aglomeram formando uma bolha alongada, ou aglomerados de bolhas maiores. Observa-se nessas duas figuras que as bolhas se concentram na parte superior do tubo devido ao empuxo.

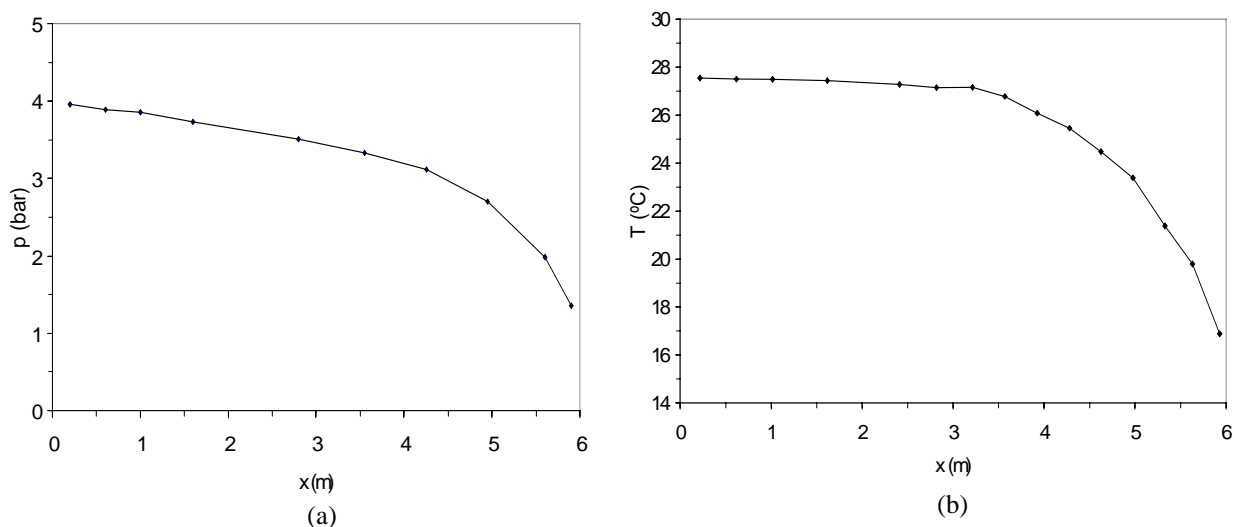


Figura 2. Resultados para o teste de $Re = 2400$, cuja pressão de entrada foi de 4,0 bar, temperatura de entrada de 27,5 °C e concentração de 35%. (a) Distribuição de pressão ao longo do tubo; (b) Distribuição de temperatura ao longo do tubo.

A Fig. 4 mostra os padrões de escoamento visualizados na região de $z = 3,004$ a $3,130$ m. Como pode ser visto, vários padrões de escoamentos são encontrados nessa região, o que mostra que o escoamento é intermitente. As causas

dessa intermitência ainda não são conhecidas. A primeira fotografia mostra pequenas bolhas escoando em linha, enquanto que a segunda e a terceira apresentam dois tipos de configurações: algumas regiões contendo muitas bolhas agrupadas e outras regiões apresentando bolhas alongadas. A quarta fotografia mostra padrões de escoamento similares embora com um número maior de bolhas. Pode ser observado que as bolhas continuam a escoar principalmente na porção superior do tubo devido ao empuxo, exceto na última fotografia. A Fig. 2 mostra que nessa região do escoamento a pressão e a temperatura começam a decrescer mais rapidamente.

Na Fig. 5, $z = 4,37$ a $z = 4,47$ m, observa-se uma maior uniformidade nos padrões de escoamento, ou seja, parece que o aumento da fração de vazio devido à maior redução da solubilidade da mistura reduz a intermitência do escoamento. Observa-se que o refrigerante no estado de vapor já ocupa a maior parte da tubulação, principalmente na terceira fotografia, onde não é mais possível perceber a presença de bolhas. Nesse caso, o padrão de escoamento se assemelha a uma espuma.

A Fig. 6 mostra que no final do tubo, $z = 5,73$ a $5,83$ m, à medida que o número de bolhas aumenta, o padrão de escoamento em espuma é bastante evidente. Nesse caso, a fase vapor ocupa toda a região da seção transversal do tubo. É válido observar que esse padrão de escoamento não é encontrado em outros escoamentos bifásicos chamados aqui de convencionais.

Na região de entrada do tubo, não mostrado aqui, o escoamento é predominantemente monofásico. Em raros instantes é possível observar a passagem de minúsculas bolhas.

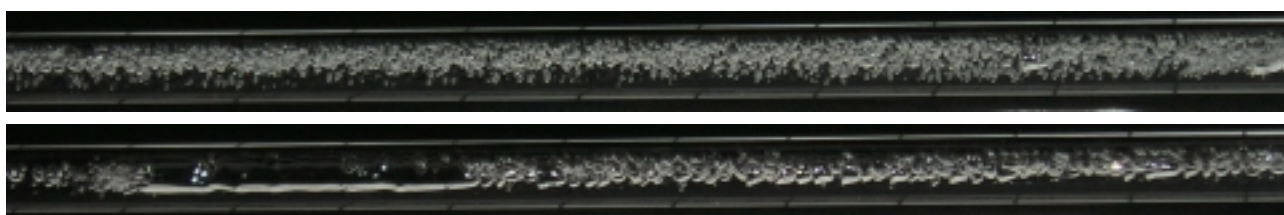


Figura 3: Padrões do escoamento na região de $z = 2,260$ a $2,360$ m para o teste de $Re=2400$ (pressão de entrada de 4,0 bar, temperatura de entrada de $27,5$ °C e concentração de 35%).

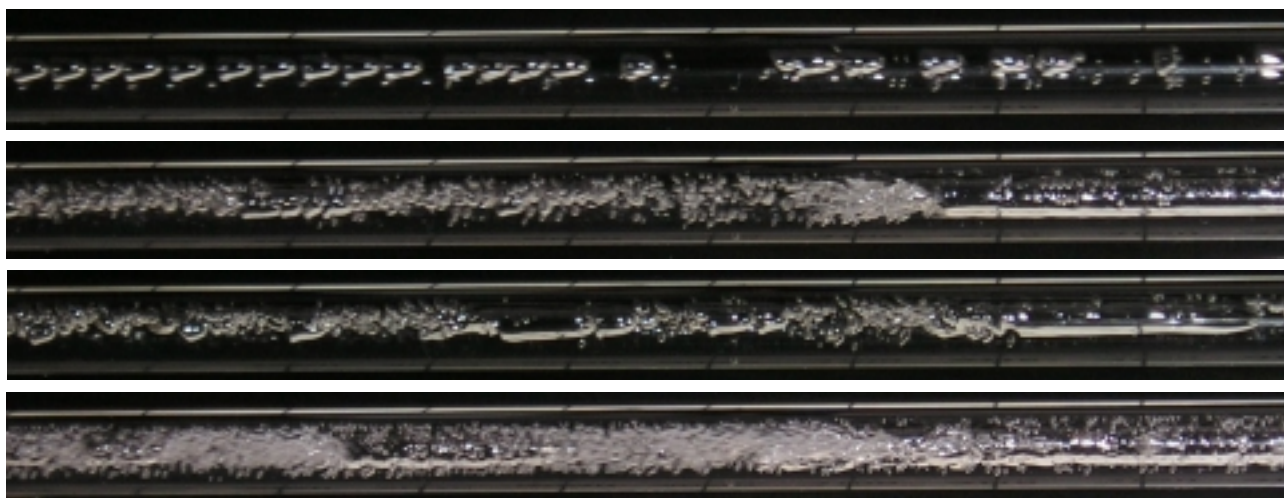


Figura 4: Padrões do escoamento na região de $z = 3,004$ a $3,130$ m para o teste de $Re=2400$ (pressão de entrada de 4,0 bar, temperatura de entrada de $27,5$ °C e concentração de 35%).

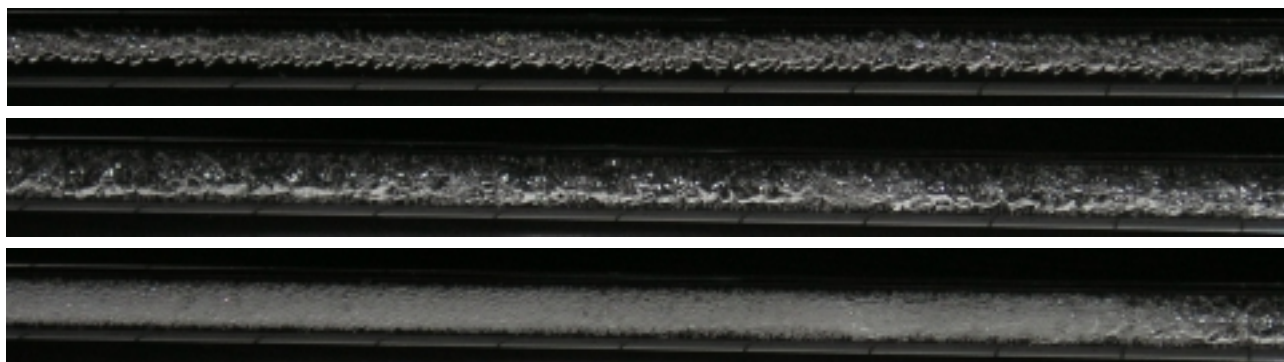


Figura 5: Padrões do escoamento na região de $z = 4,370$ a $4,470$ m para o teste de $Re=2400$ (pressão de entrada de 4,0 bar, temperatura de entrada de $27,5$ °C e concentração de 35%).

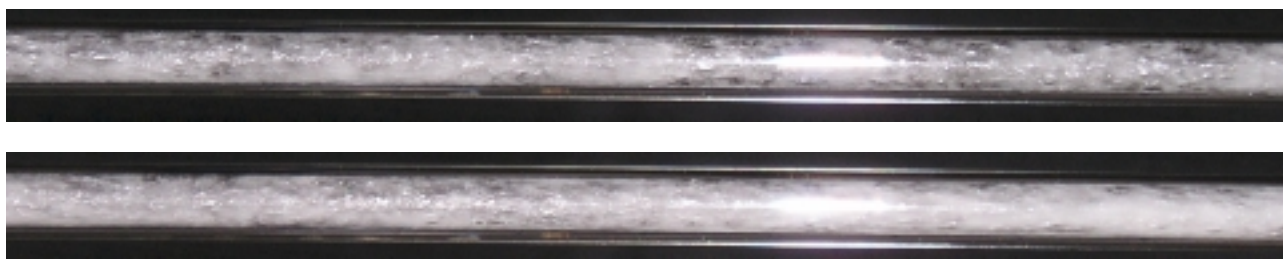


Figura 6: Padrões do escoamento na região de $z = 5,730$ a $5,830$ m para o teste de $Re = 2400$ (pressão de entrada de $4,0$ bar, temperatura de entrada de $27,5$ °C e concentração de 35%).

A Fig. 7 apresenta os resultados da visualização do ensaio realizado para $Re = 1400$, numa pressão de entrada de $5,0$ bar e temperatura de entrada da mistura de $27,0$ °C e concentração de 60% . As características do escoamento são semelhantes às descritas para o ensaio anterior. Observa-se, entretanto, que a formação de bolhas iniciou-se numa posição z maior do que no caso anterior, devido ao menor valor de Re , o que causa uma menor queda de pressão.

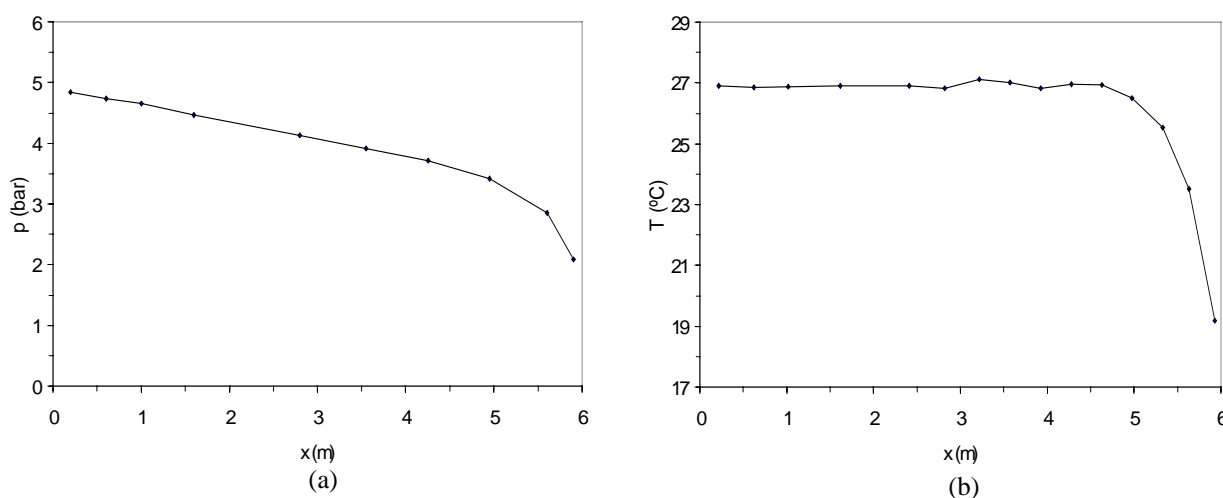


Figura 7. Resultados para o teste de $Re = 1400$ cuja pressão de entrada foi de $5,0$ bar, temperatura de entrada de $27,0$ °C e concentração de 60% . (a) Distribuição de pressão ao longo do tubo; (b) Distribuição de temperatura ao longo do tubo

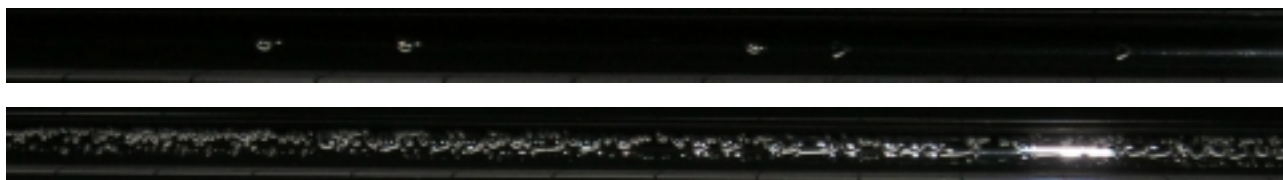


Figura 8: Padrões do escoamento na região de $z = 4,090$ a $4,190$ m para o teste de $Re=1400$ (pressão de entrada de $5,0$ bar, temperatura de entrada de $27,0$ °C e concentração de 60%).

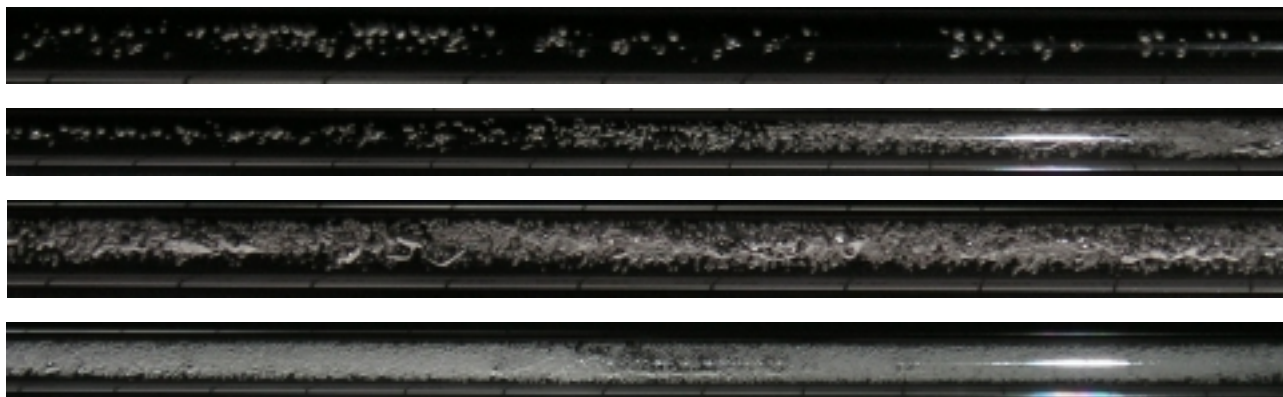


Figura 9: Padrões do escoamento na região de $z = 5,060$ a $5,170$ m para o teste de $Re=1400$ (pressão de entrada de $5,0$ bar, temperatura de entrada de $27,0$ °C e concentração de 60%).

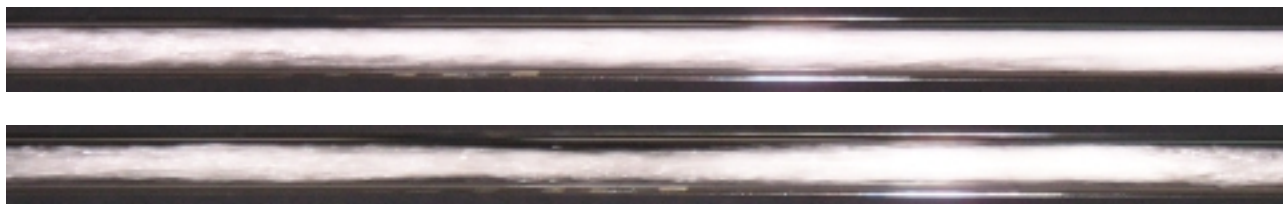


Figura 10: Padrões do escoamento na região de $z = 5,720$ a $5,830$ m para o teste de $Re=1400$ (pressão de entrada de $5,0$ bar, temperatura de entrada de $27,0$ °C e concentração de 60%).

As Figs. 12 a 15 apresentam os resultados da visualização do teste realizado para $Re = 2300$, cujos perfis de pressão e temperatura são mostrados na Fig. 11, cuja pressão de entrada foi de $5,0$ bar, temperatura de entrada de $38,7$ °C e concentração de 22% . Para a posição $z = 2,52$ a $2,65$ m, Fig. 12, as duas fotografias mostram a presença de um grande número de pequenas bolhas aglomeradas escoando entre películas de líquido. Na Fig. 13, diversos padrões de escoamento são observados para a região $z = 3,49$ a $3,56$ m, que corresponde à posição intermediária do tubo de vidro. A primeira fotografia mostra pequenas bolhas não esféricas (forma de bala de revólver) escoando em linha e na parte superior do tubo. Na segunda fotografia observa-se que o número desse tipo de bolha aumenta. A terceira fotografia mostra bolhas alongadas acompanhadas de bolhas de pequenas dimensões. Na quarta fotografia observa-se novamente o padrão de escoamento com um grande número de bolhas aglomeradas ocupando a maior parte do tubo, e também a presença de bolhas maiores bastante deformadas na extremidade direita da fotografia. Esta seqüência de fotografias também pode ser usada para mostrar a grande intermitência do escoamento, caracterizada pelos diferentes padrões observados em uma mesma posição do tubo.

Para a posição $z=4,55$ a $4,65$ m, Fig. 14, as duas fotografias mostram um número bem maior de pequenas bolhas aglomeradas, aparentemente já caracterizando o escoamento em espuma. A Fig. 15 mostra a visualização da parte final do tubo, $z = 5,75$ a $5,83$ m. As três imagens mostram que o escoamento em espuma é predominante. Nessa região ocorre uma grande redução da pressão e temperatura, como mostrado na Fig. 11.

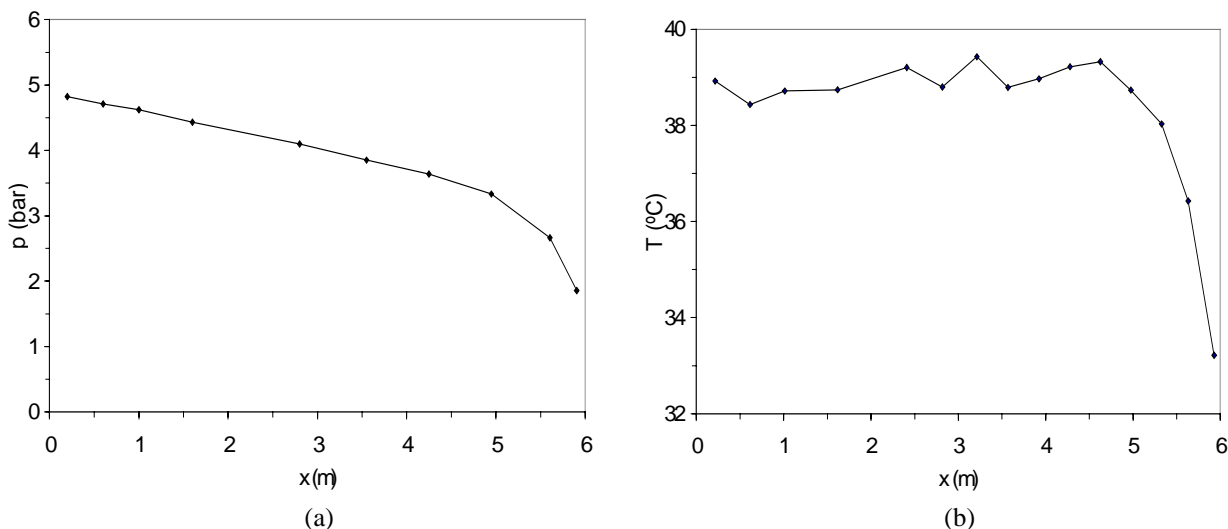


Figura 11. Resultados para o teste de $Re=2300$, cuja pressão de entrada foi de $5,0$ bar, temperatura de entrada de $38,7$ °C e concentração de 60% . (a) Distribuição de pressão ao longo do tubo; (b) Distribuição de temperatura ao longo do tubo.

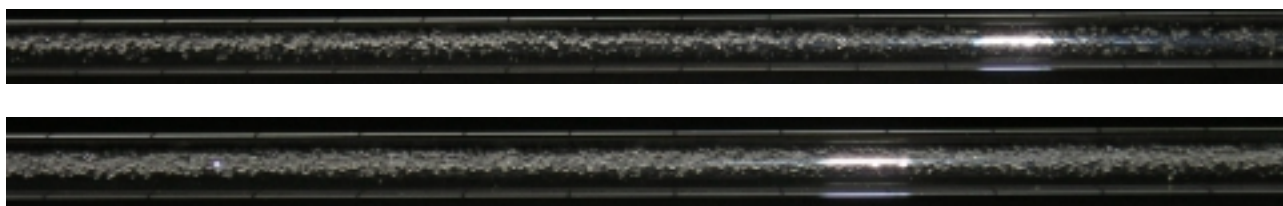


Figura 12: Padrões do escoamento na região de $z = 2,520$ a $2,650$ m para o teste de $Re=2300$ (pressão de entrada de $5,0$ bar, temperatura de entrada de $38,7$ °C e concentração de 22%).

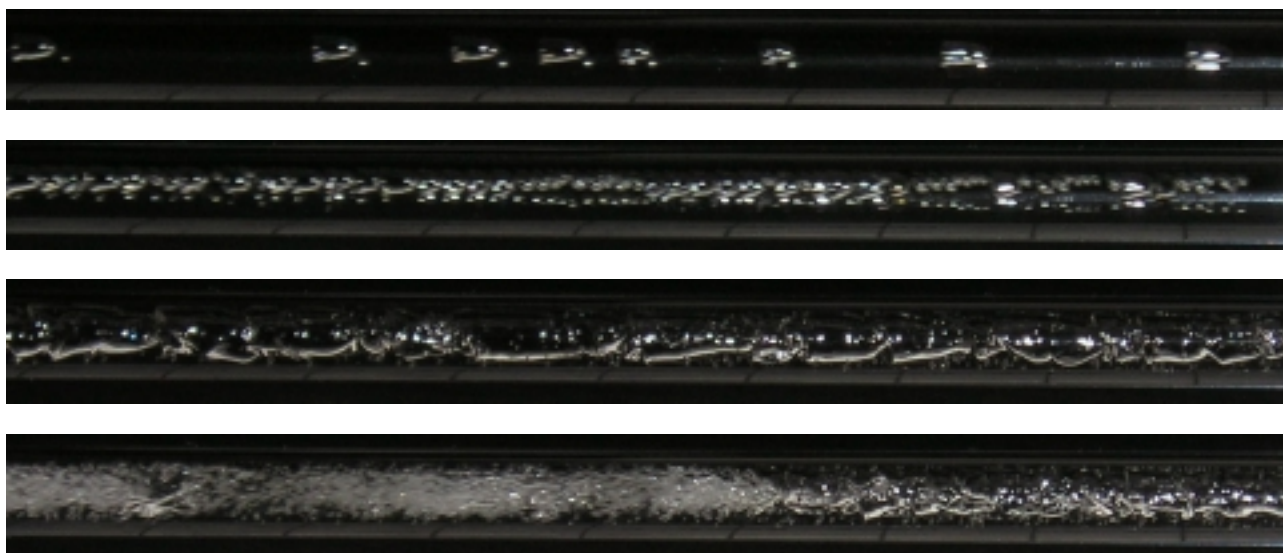


Figura 13: Padrões do escoamento na região de $z = 3,490$ a $3,560$ m para o teste de $Re=2300$ (pressão de entrada de 5,0 bar, temperatura de entrada de $38,7$ °C e concentração de 22%).

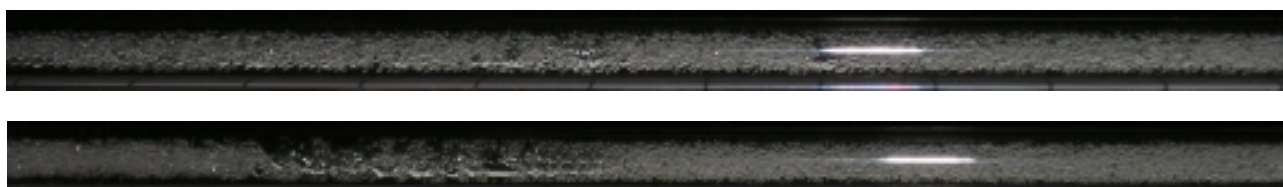


Figura 14: Padrões do escoamento na região de $z = 4,550$ a $4,650$ m para o teste de $Re=2300$ (pressão de entrada de 5,0 bar, temperatura de entrada de $38,7$ °C e concentração de 22%).

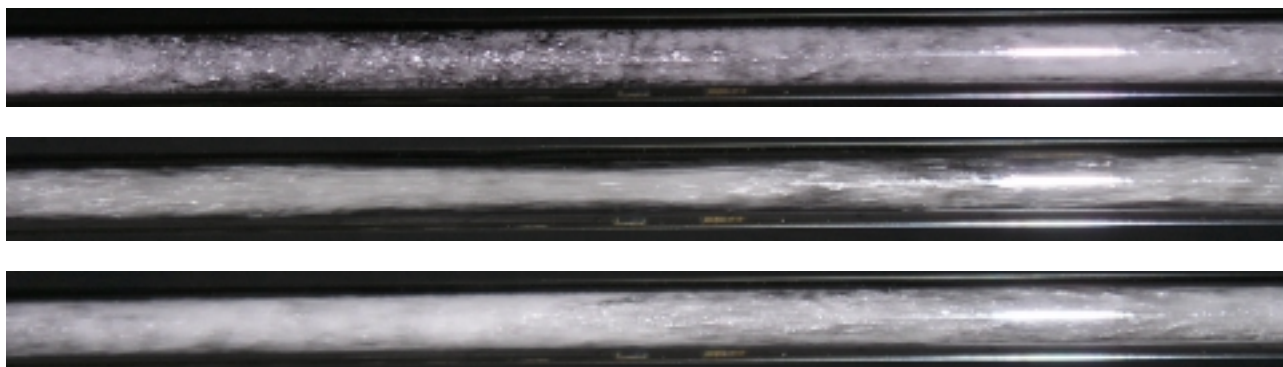


Figura 15: Padrões do escoamento na região de $z = 5,750$ a $5,830$ m para o teste de $Re = 2300$ (pressão de entrada de 5,0 bar, temperatura de entrada de $38,7$ °C e concentração de 22%).

É importante ressaltar o aspecto intermitente do escoamento. Exceto na região de saída do escoamento, onde se visualiza o padrão de escoamento de espuma, observa-se a presença de vários padrões de escoamento em uma mesma posição ao longo do tubo em todos os testes realizados. Como já comentado anteriormente, as causas do padrão intermitente ainda são desconhecidas.

4. Conclusões

Uma bancada experimental foi usada para estudar o escoamento bifásico provocado pela redução de pressão (*flashing flow*) de uma mistura composta por óleo ester 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 melhorar o entendimento desse tipo de escoamento com o objetivo de desenvolver modelos físicos para aplicação em análise e simulação de processos de vazamentos de refrigerante e de lubrificação que ocorrem no interior de compressores de refrigeração. Distribuições de pressão, de temperatura e visualização dos padrões de escoamento são apresentados para escoamentos com temperaturas de entrada de 28 e 39 °C e pressões de entrada de 4,0 e 5,0 bar. Os resultados mostram a existência de três regiões características no escoamento. Uma região na entrada do tubo, onde o gradiente de pressão e a

temperatura do escoamento são constantes, indicando a predominância de escoamento monofásico da mistura. Uma região intermediária de escoamento bifásico apresentando uma pequena redução no gradiente de pressão e na temperatura e uma região na saída do tubo, caracterizada por uma grande redução de pressão e de temperatura, indicando a presença de escoamento de espuma. Além disso, notou-se a característica intermitente do escoamento, comprovada pelos vários padrões de escoamento em uma mesma posição ao longo do tubo, com exceção do padrão de escoamento em espuma observado no final do tubo.

5. 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, *Int. J. Refrig.*, Vol. 27, p. 129-139.
- Baustian, J. J., Pate, M. B. and 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.
- Calvert, J. R., 1990, Pressure drop for foam flow through pipes, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 11 N° 3, p.236-241.
- Churchill, S.W. 1977, Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes, *Chem. Eng.*, 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, *Int. J. Refrig.* 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., Prata, A.T., Fagotti, F., 2000, Experimental Characterization of oil-refrigerant two-phase flow, *Prof. ASME-Adv. En. Sys. Div.*, San Francisco, p. 101-109.
- Martz, W.L., Burton, C.M., Jacobi, A.M., 1996, Local composition modelling of the thermodynamic properties of refrigerant and oil mixtures, *Int. J. Refrig.*, Vol. 19, N° 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.
- Moffat, R.J., 1988, Describing the uncertainties in experimental results, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 1, p 3-17.
- 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., 2001, Two-phase flow of the mineral oil-refrigerant R12 through a straight round tube, *MEng. Dissertation (in Portuguese)*, São Paulo State University, Ilha Solteira-SP, Brazil, 216 p.
- Poiate Jr., E., Gasche, J.L., 2002, Pressure and temperature distribution and flow visualization of the two-phase mineral oil-R12 mixture (in Portuguese), *Brazilian Cong. of Thermal Eng. Sci.*, paper code 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, N° 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, 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, 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.
- Winkler, W., Valkó, P. P., Economides, M. J., 1994, A rheological model for polymers foams,” *Soc. Petroleum Eng.*, Vol. 3 , p.897-906.

6. Agradecimentos

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

Two-phase Flow Patterns of the Oil-refrigerant R134a Mixture Through a Small Diameter Horizontal Tube

Héryca Olenir Sousa Castro

heryca@dem.feis.unesp.br

José Luiz Gasche

gasche@dem.feis.unesp.br

Wanderson Paterlini Conti

conti@dem.feis.unesp.br

Edson Del Rio Vieira

delrio@dem.feis.unesp.br

UNESP-College of Engineering at Ilha Solteira, Department of Mechanical Engineering
Av. Brasil Centro 56, Ilha Solteira –SP – CEP 15385 000

Abstract: *Regarding to the refrigeration cycle a good miscibility of the refrigerant in the lubricating oil is required in order to allow easy the return of the circulating oil to the compressor through the reduction of the oil viscosity. However, inside the compressor this miscibility considerably modifies the refrigerant leakage through the clearances, the lubrication of sliding parts and the performance of journal bearings. This occurs due to the reduction of the solubility of the refrigerant in the oil as the mixture flows to a region of lower pressure or higher temperature, producing a great formation of refrigerant gas bubbles. This formation of bubbles produces a two-phase flow of the mixture through the several types of channel inside the compressor. The behavior of this flow is much different from the conventional two-phase flow as the void fraction reaches values around 0.7, where the foam flow is generally observed. Therefore, a general understanding of the oil-refrigerant mixture flow with foam formation through small dimension channels is crucial in order to develop a knowledge basis onto which lubrication and gas leakage models can be built. This work presents an experimental investigation of the flow patterns of the ester oil-refrigerant R134a mixture flow with foam formation through a 3.22 mm- diameter and 6 m-length tube. Tests were performed at different mass flow rates, several refrigerant mass fractions and mixture temperatures around 28 and 39 °C at the inlet of the flow. Three flow patterns were visualized. A liquid mixture flow was observed at the inlet of the tube, while in an intermediate region of the flow bubbles of different forms and sizes were observed. At the exit of the tube, a foam flow was visualized. In this region, a great reduction of temperature and pressure was registered.*

Key words. *Compressor, Oil-refrigerant Mixture, Two-phase Flow, Foam.*