

## DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO E DE TEMPERATURA E VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO DA MISTURA ÓLEO MINERAL-R12

**Edgard Poiate Junior**

PETROBRAS/CENPES/PDEP/MC

Cidade Universitária – Q. 7 – Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ – CEP 21949-900

[poiate@petrobras.com.br](mailto:poiate@petrobras.com.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](mailto:gasche@dem.feis.unesp.br)

**Resumo.** *Este trabalho refere-se ao estudo experimental do escoamento bifásico de uma mistura líquida composta por óleo mineral (SUNISO IGS) e refrigerante R12 ao longo de dois tubos retos horizontais de diâmetro constante. Um dos tubos é usado para a visualização do escoamento e o outro é instrumentado para a realização da medição de pressão e de temperatura. Realizou-se experimentos para diversas vazões da mistura e para várias temperaturas e concentrações de refrigerante no óleo na entrada dos tubos. Os resultados mostram um escoamento líquido monofásico da mistura na região de entrada do tubo, com o aparecimento eventual de pequenas bolhas. Nesta região, a temperatura da mistura permanece praticamente constante e o escoamento apresenta uma queda de pressão linear. À medida que o escoamento prossegue, uma pequena quantidade de bolhas começa a surgir devido à redução de solubilidade do refrigerante no óleo como resultado da queda de pressão do escoamento. O número de bolhas aumenta com a contínua queda de pressão até que uma região de escoamento de espuma é observada próxima da saída do tubo. Na região de escoamento bifásico observa-se uma grande redução não linear de pressão e de temperatura. Nota-se, também, uma grande instabilidade do escoamento, caracterizada pela oscilação das medidas de pressão e pela observação de diferentes padrões de escoamento numa mesma posição do escoamento em instantes diferentes.*

**Palavras chave:** *Mistura Óleo-refrigerante, Escoamento Bifásico, Espuma, Visualização de Escoamento*

### 1. Introdução

A importância dos sistemas de refrigeração na atualidade é inegável. Não se pode pensar em processamento, armazenamento e transporte de alimentos, na precisão de certos processos industriais, em sistemas de computadores ou no conforto humano sem que os sistemas de refrigeração sejam lembrados. A refrigeração, em suas diversas formas de aplicação, tem se incorporado ao estilo de vida das pessoas e seu uso vem crescendo mundialmente.

A grande maioria das instalações de refrigeração, desde refrigeradores domésticos até grandes sistemas industriais, usa o princípio da compressão de vapor como método de refrigeração. Nos sistemas de compressão de vapor, o efeito de refrigeração é produzido pela evaporação de um líquido em baixa temperatura, provocada pelo bombeamento do vapor por intermédio do compressor. O compressor é considerado o “coração” dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor. Um componente importante dos compressores usados em sistemas de refrigeração é o sistema de lubrificação. O lubrificante reduz o atrito entre as partes móveis, aumentando a vida útil do compressor e reduzindo as perdas de energia. Uma outra função do lubrificante em compressores de refrigeração é reduzir o vazamento de gás refrigerante ao longo de suas várias folgas (selagem), resultando num aumento da eficiência volumétrica do processo de compressão.

Em todos os modelos de lubrificação, que envolvem tanto o escoamento do óleo ao longo dos canais de lubrificação, como o projeto de mancais, e nos modelos que prevêm o vazamento de gás refrigerante ao longo das folgas dos compressores, o fluido de trabalho, na maioria das vezes, é assumido como sendo o óleo lubrificante puro. Um fato conhecido, entretanto, é que a grande maioria dos fluidos refrigerantes usados nos sistemas de refrigeração são miscíveis nos óleos lubrificantes, o que faz com que as propriedades do fluido resultante, a mistura óleo-refrigerante, sejam alteradas (Baustian *et al.*, 1988 a, 1988 b, 1988 c, 1988 d; Baustian *et al.*, 1986). Além disso, quando ocorre o desprendimento do refrigerante dissolvido no óleo, devido a uma redução de pressão ou aumento de temperatura, formando bolhas de gás, as características do escoamento também são significativamente modificadas (Goswami *et al.*, 1997). Portanto, pesquisas envolvendo tais misturas são de grande importância para o projeto, análise e desenvolvimento de compressores.

O estudo de misturas compostas por óleos e refrigerantes usadas em sistemas de refrigeração passou a ter uma importância ainda maior a partir da assinatura do Protocolo de Montreal em 1987, devido à necessidade da substituição dos refrigerantes CFCs (clorofluorcarbonos) e HCFCs (hidroclorofluorcarbonos) pelos refrigerantes HFCs (hidrofluorcarbonos) por motivos ambientais (ASHRAE, 1987; Groll, 1996). Esta mudança de refrigerantes tem incitado a substituição dos óleos minerais e lubrificantes alquilbenzenos (*alkylbenzene lubricants*) pelos lubrificantes à base de poliolesters (*polyolester-based lubricants*), (Sundaresan *et al.*, 1992; Thomas *et al.*, 1992; Short *et al.*, 1992; Lilje *et al.*, 1995). Isto criou uma grande necessidade, por parte dos fabricantes de lubrificantes, de refrigerantes e de compressores em entender os fenômenos de absorção, desprendimento de gás e de espumamento em misturas refrigerante-lubrificante alternativas e os mecanismos que os afetam (Drost, 1994; Fukuta *et al.*, 1995; Leung *et al.*, 1998).

Principalmente na década de 90, diversos trabalhos relacionados à mistura óleo-refrigerante começaram a serem desenvolvidos. Parte dos trabalhos foi dirigida à determinação das propriedades termofísicas das novas misturas, ao passo que diversos pesquisadores concentraram-se em estudar o comportamento do escoamento de misturas de refrigerantes contaminadas com pequena quantidade de óleo, objetivando analisar a influência do óleo na dinâmica e na transferência de calor do escoamento destas misturas em evaporadores e condensadores (Eckels *et al.*, 1991, Thomas e Pham, 1992; Grebner *et al.*, 1993; Yokozeki, 1994; Meyer e Jabardo, 1994; Hambraeus, 1995).

Nos problemas envolvendo selagem e lubrificação, onde se encontra misturas ricas em óleo, quando a mistura escoar de regiões de alta pressão para regiões de baixa pressão, ocorre o desprendimento do refrigerante dissolvido no óleo, resultando na formação de uma grande quantidade de bolhas, o que altera significativamente as características do escoamento (Yanagisawa *et al.*, 1991). Esta formação de bolhas, por sua vez, pode ser tão intensa a ponto de ocorrer a formação de espuma no escoamento, como mostrado pelo experimento de visualização realizado por Costa *et al.* (1990), em seu trabalho sobre o vazamento de gás refrigerante através da folga radial de compressores rotativos de pistão rolante. Estes fatos comprometem muito o desempenho de mancais, os cálculos de vazamentos de gás refrigerante e o dimensionamento dos sistemas de lubrificação.

Em seu trabalho sobre o vazamento de gás refrigerante ao longo da folga radial de compressores rotativos de pistão rolante, Gasche (1996) desenvolveu diversos modelos para estimar o vazamento de gás provocado pelo escoamento da mistura óleo-refrigerante, nos quais os aspectos de solubilidade do refrigerante no óleo, o fenômeno de desprendimento de gás e de formação de espuma foram levantados, discutidos e assumidos nos modelos propostos. Estes modelos mostraram que estes fenômenos influem significativamente nos resultados. Entretanto, pela falta de conhecimento teórico completo associado ao escoamento bifásico destas misturas e pela ausência de dados experimentais, principalmente com relação ao escoamento de espuma, alguns dos modelos propostos não puderam ser validados.

Uma pesquisa bibliográfica sobre o escoamento bifásico de misturas óleo-refrigerante com ou sem a formação de espuma mostra que a grande maioria dos trabalhos referem-se à misturas de refrigerantes contaminados com pequenas quantidades de óleo, da ordem de até 10%. A grande maioria dos trabalhos relacionados ao escoamento de espumas refere-se a espumas aquosas (bolhas de ar em água) e de polímeros (Nutt e Burley, 1989; Calvert, 1990; Winkler *et al.*, 1994; Kraynik, 1998). Na literatura aberta encontrou-se apenas os trabalhos de Lacerda *et al.* (2000 a e b), que tratam do escoamento bifásico de misturas óleo-refrigerante, ricas em óleo, usadas em sistemas de refrigeração.

Devido à escassez de informações sobre este assunto, principalmente com relação a dados experimentais, desenvolveu-se neste trabalho o estudo experimental do escoamento bifásico de uma mistura composta por óleo mineral SUNISO 1GS e refrigerante R12, com o objetivo de medir as distribuições de pressão e de temperatura e de visualizar o escoamento.

## 2. Bancada Experimental

Com o objetivo de se estudar o escoamento bifásico de misturas compostas por óleos e refrigerantes usadas em sistemas de refrigeração, construiu-se a bancada experimental mostrada na Fig. (1). A bancada é composta de dois vasos principais de armazenamento, um Vaso de Alta Pressão (VAP) e um Vaso de Baixa Pressão (VBP); dois tanques acumuladores de gás, um Acumulador de Alta Pressão (AAP) e um Acumulador de Baixa Pressão (ABP); dois tubos horizontais paralelos de comprimento iguais, um de aço cobreado, denominado de Seção de Teste Cobreada (STC), e outro de vidro pirex, denominado de Seção de Teste de Visualização (STV); uma Linha de Retorno de Óleo (LRO) e uma Linha de Retorno de Gás refrigerante (LRG).

O escoamento pelos dois tubos é produzido pela diferença de pressão imposta em suas extremidades. Isto é conseguido através da utilização dos dois vasos de pressão, VAP e VBP. O VAP é responsável pelo armazenamento da mistura óleo-refrigerante antes do início dos testes e foi projetado para uma pressão máxima de 10 bar. Este vaso contém uma resistência elétrica de aquecimento (RE), para a realização de testes em temperaturas de até 60 °C e um Visor De Nível (VDN), utilizado para o acompanhamento visual da quantidade de mistura dentro do vaso. O VBP é responsável pelo recebimento da mistura após ter escoado pelos tubos, visto que a bancada não foi projetada para operar em regime contínuo. Este vaso também foi projetado para uma pressão máxima de 10 bar e também contém um visor de nível.

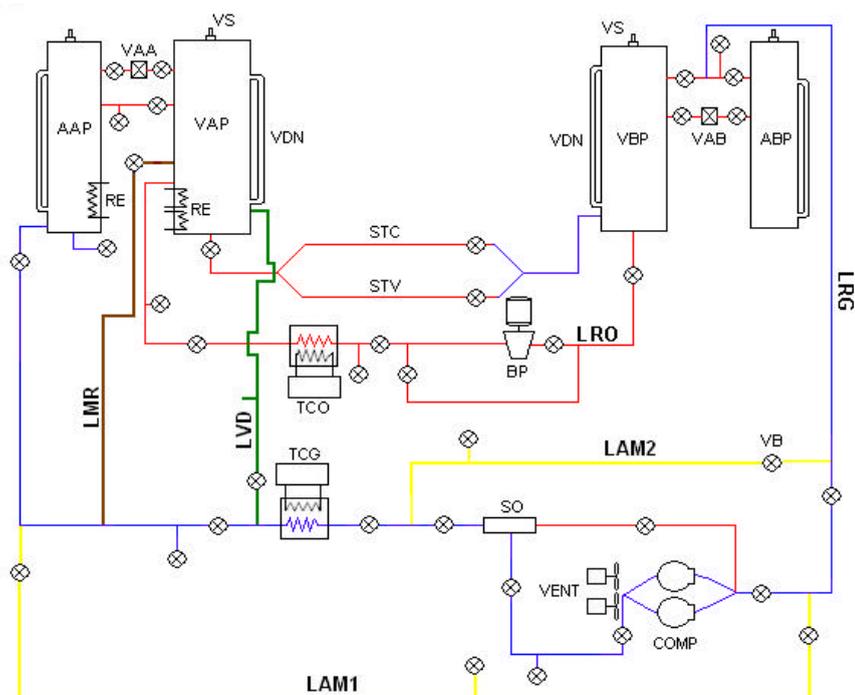


Figura 1. Esquema da bancada experimental.

Os dois tanques acumuladores de gás refrigerante, AAP e ABP, são usados para manter as pressões constantes nos vasos VAP e VBP durante os testes, o que permite a realização de testes com vazões constantes. O controle destas pressões é realizado por meio de duas válvulas automáticas com abertura por solenóides, uma Válvula para o Acumulador de Alta pressão (VAA) e outra Válvula para o Acumulador de Baixa pressão (VAB), acionadas através do sinal de dois transdutores de pressão instalados nos vasos VAP e VBP. O sinal do transdutor, após ser tratado e convertido em sinal digital, é enviado a um microcomputador e manipulado por um programa de aquisição de dados, que o compara com um valor pré-estipulado. O resultado desta comparação serve como sinal de resposta para a abertura ou fechamento das válvulas automáticas. Assim, no VAP, à medida que o nível da mistura for baixando e a pressão diminuindo, a VAA recebe um sinal para abrir e o AAP libera a quantidade de gás refrigerante necessária para manter a pressão constante no VAP. No VBP, à medida que o nível for subindo, devido à recepção da mistura, e a pressão aumentando, a VAB recebe um sinal para abrir e o ABP recebe o excedente de gás refrigerante, fazendo com que a pressão no VBP também se mantenha constante.

Os dois tubos horizontais paralelos da seção de teste possuem aproximadamente 6 m de comprimento. A STV possui diâmetro interno de  $3,03 \pm 0,03$  mm, e é utilizada para visualização do escoamento. A STC possui um diâmetro interno de  $3,22 \pm 0,03$  mm e contém 10 tomadas de pressão estática e 15 termopares tipo T AWG 32 (0,203 mm de diâmetro).

O restante do sistema é usado para fazer os retornos de gás e óleo para o VAP e AAP. Uma Bomba de Palheta (BP) é utilizada para bombear o óleo do VBP para VAP após a realização dos testes. O retorno do gás refrigerante é feito por dois compressores alternativos utilizados em sistemas de refrigeração (COMP), os quais são refrigerados por dois ventiladores (VENT). Os compressores também são utilizados para estabelecer as pressões necessárias para cada ensaio nos vasos e acumuladores, para acelerar o processo de saturação da mistura no VAP e, durante os ensaios, para manter a pressão no ABP sempre menor do que a pressão no VBP e a pressão no AAP sempre maior do que a pressão no VAP. Para isto, o compressor succiona continuamente o gás do ABP e o descarrega no AAP. Nas duas linhas de retorno, tanto de gás refrigerante, LRG, como de óleo, LRO, são introduzidos Trocadores de Calor (unidades de condensação usadas em sistemas de refrigeração), com o objetivo de resfriar o Gás, TCG, e o Óleo, TCO, antes de alcançarem o AAP e o VAP, respectivamente. Outro papel importante do Trocador de Calor de Gás, TCG, é resfriar o fluido refrigerante que é succionado do VAP pelos compressores usando a tubulação LMR, a tubulação LAM1, e a tubulação LVD, durante o processo de saturação do óleo com o refrigerante.

A bancada experimental conta, ainda, com um Separador de Óleo (SO), instalado na linha de retorno de gás refrigerante, logo na saída do AAP. São instaladas, também válvulas de bloqueio ao longo de toda a bancada, com o objetivo de controlar a vazão dos fluidos nas linhas de retorno e para a manutenção dos equipamentos.

Dois sistemas de aquisição de dados, cada um com 8 canais, que podem operar sincronizados a uma taxa de 9600 Hz, com resolução de 16 bits, foram utilizados para medir as pressões e temperaturas dos vasos VAP e VBP e a pressão medida pelos 10 transdutores instalados na STC. Um outro sistema de aquisição de dados, com 32 canais podendo operar sincronizados a uma taxa de 10000 Hz, com resolução de 24 bits, foi utilizado para o tratamento dos sinais dos 15 termopares instalados na STC. Um software comercial foi utilizado para adquirir, controlar, tratar e converter os dados experimentais. Todos os instrumentos foram calibrados no local utilizando os sistemas de aquisição de dados.

### 3. Procedimento Experimental

#### Procedimentos iniciais

Inicialmente efetuou-se a limpeza dos componentes da bancada com fluido refrigerante R11, principalmente dos vasos de pressão. Garantida a máxima limpeza possível, efetuou-se um vácuo de 0,1 mbar em toda a bancada, valor mínimo conseguido com a bomba de vácuo disponível no laboratório. Em seguida procedeu-se o abastecimento do vaso de alta pressão (VAP) com 100 litros de óleo mineral SUNISO 1GS. Com o objetivo de extrair possíveis impurezas e umidade, o óleo foi aquecido a uma temperatura de aproximadamente 80 °C, mantendo-se a bomba de vácuo em funcionamento. Posteriormente, o acumulador de alta pressão (AAP) foi abastecido com 100 kg de fluido refrigerante R12.

#### Processo de saturação do óleo

Em seguida, procedeu-se a saturação do óleo contido no vaso de alta pressão na pressão,  $p$ , e temperatura,  $T$ , desejadas em um determinado teste, usando o refrigerante armazenado do acumulador de alta pressão. Este processo de saturação é um procedimento fundamental para a realização dos testes. O seguinte procedimento foi utilizado:

- aquece-se o óleo até a temperatura desejada;
- ajusta-se a pressão no vaso de alta pressão num valor 100 mbar acima da pressão desejada no teste, ou seja,  $p+100$  mbar;
- com o sistema de aquisição de dados ligado, procede-se a saturação, succionando o gás refrigerante da parte superior do vaso de alta pressão e injetando-o pela parte inferior do vaso, depois de ter sido resfriado no trocador de calor, TCG, produzindo o borbulhamento do gás no óleo. Este procedimento permite um maior contato entre os fluidos, aumentando a velocidade de absorção do gás, além de produzir uma maior homogeneização da mistura;
- durante este processo, a pressão no vaso de alta pressão tende a diminuir devido à absorção do refrigerante pelo óleo. Por isso, a válvula solenóide que liga o vaso de alta pressão com o acumulador de alta pressão, libera a quantidade necessária de gás refrigerante para manter a pressão inicialmente ajustada ( $p+100$  mbar). Durante o borbulhamento, a temperatura da mistura dentro do vaso de alta pressão é controlada em  $\pm 2$  °C e a pressão em  $\pm 100$  mbar;
- este processo inicial, denominado aqui de pré-saturação, é finalizado quando se observa que a pressão ( $p+100$  mbar) não se altera mais do que  $\pm 20$  mbar, durante o borbulhamento (a duração deste processo é de 4 a 6 horas, dependendo das condições de saturação desejadas). Isto significa que não está havendo mais uma significativa absorção de refrigerante pelo óleo. Como o processo de absorção é muito lento, não se pode garantir com grande precisão que a mistura esteja realmente saturada na pressão de  $p+100$  mbar;
- por isso, o processo de saturação é conseguido, fazendo-se uma redução brusca da pressão de  $p+100$  mbar para  $p$ , através da liberação de gás refrigerante da parte superior do vaso de alta pressão para o acumulador de baixa pressão. Se a mistura estiver saturada, ocorrerá um aumento da pressão do vaso de alta pressão devido à liberação de refrigerante. Isto pode ser avaliado, monitorando-se a pressão do vaso. Caso a pressão aumente, procede-se uma nova redução de pressão para  $p$ , e assim por diante, até que não se observe uma alteração significativa deste valor. Como o processo de liberação de refrigerante é muito mais rápido do que o processo de absorção, pode-se garantir com mais precisão a saturação da mistura na pressão  $p$  (e não  $p+100$  mbar) e na temperatura  $T$ . Estima-se que a incerteza da pressão de saturação é de  $\pm 20$  mbar;

#### Medição da distribuição de pressão e de temperatura

Garantida a saturação da mistura nas condições de pressão e de temperatura desejadas, pode-se proceder à medição da distribuição de temperatura e de pressão ao longo do escoamento. Para isto, abre-se a válvula instalada no tubo de aço cobreado, permitindo o escoamento na secção de teste instrumentada. Inicialmente, procede-se o ajuste manual das válvulas de bloqueio instaladas entre o vaso de alta pressão, VAP, e acumulador de alta pressão, AAP, e o vaso de baixa pressão, VBP, e o acumulador de baixa pressão, ABP, de tal forma que as válvulas solenóides instaladas consigam controlar as pressões nos vasos de alta e baixa pressão dentro de uma tolerância de  $\pm 20$  mbar.

Durante a realização dos testes é necessário que os compressores fiquem sempre ligados, succionando o refrigerante do acumulador de baixa pressão e comprimindo-o no acumulador de alta pressão, com o objetivo de manter a pressão no acumulador de baixa pressão sempre menor do que a pressão no vaso de baixa pressão, além de manter a pressão no acumulador de alta pressão sempre maior do que a pressão no vaso de alta pressão. A aquisição dos sinais de pressão e de temperatura é iniciada após as temperaturas da seção de teste se estabilizarem em  $\pm 0.5$  °C, o que ocorre em torno de três a cinco minutos.

#### Visualização do escoamento

Após a aquisição dos sinais, a válvula de bloqueio instalada no tubo de aço cobreado é fechada, enquanto a válvula de bloqueio instalada no tubo de vidro é aberta para permitir a visualização do escoamento, que é efetuada depois de estabelecido o regime permanente, que é monitorado através da temperatura do refrigerante no vaso de baixa pressão.

A visualização do escoamento foi realizada através de fotografias tiradas em várias posições axiais ao longo do tubo, com o objetivo de registrar diferentes padrões de escoamento. Dezenas de ensaios foram realizados e verificou-se que a qualidade das imagens depende fortemente do tipo e forma de iluminação.

O melhor resultado de iluminação foi obtido com uma luz de flash eletrônico disposta 90° em relação ao eixo da objetiva da câmera. O flash foi posicionado a menos de 150 mm do objetivo a ser fotografado.

As melhores imagens foram obtidas com filme negativo colorido de rolo tipo 135 (35 mm) KODAKOLOR ISO 400 (filme que apresenta boa granulométrica e imagens de alto contraste), usando uma câmera Nikon F4s *Single Lens Reflex (SLR)*, de até 5.7 fps (fotos por segundo), equipada com uma objetiva do tipo *MEDICAL* - macro de 110 mm de distância focal.

A câmera foi regulada com velocidade de obturação de 1/250 s (máxima velocidade de sincronismo da câmera) e com uma abertura do diafragma de 1:22. Este procedimento (alta velocidade de sincronismo da câmera com o flash e um valor pequeno de abertura do diafragma) minimiza o efeito da iluminação parasita. Valores elevados de abertura de diafragma também provocam elevada profundidade de campo.

A magnitude da imagem (relação entre o tamanho real do objeto fotografado e o tamanho registrado no negativo) foi mantida aproximadamente constante num valor igual a 1:1,5. Considerando que a dimensão do negativo é 24 x 36 mm, conseguiu-se registrar em cada imagem em torno de 54 mm do duto da seção de teste de vidro. Os negativos foram ampliados em fotografia para 150 x 210 mm, a seguir digitalizados em scanner do tipo *flat bed* em 200 dpi óptico. Posteriormente, as imagens foram tratadas em 256 tons de cinza (8 bits de cores) e gravadas em extensão jpg, usando-se o software *Corel Photo Paint*.

#### 4. Resultados e discussão

O escoamento bifásico da mistura composta por óleo mineral (SUNISO 1GS) e fluido refrigerante R12 foi testado para pressões de saturação variando de 3,50 a 6,00 ± 0,02 bar e temperaturas variando de 25,0 a 60,0 ± 0,5 °C.

A concentração mássica de refrigerante no óleo foi calculada através de uma equação ajustada a um diagrama de pressão-temperatura-concentração fornecido pela empresa EMBRACO (Empresa Brasileira de Compressores). A densidade da mistura foi calculada segundo ASHARE (1998). A viscosidade da mistura foi calculada através de uma equação ajustada a um diagrama de pressão-temperatura-viscosidade fornecida pela empresa norte-americana WITCO (fabricante do óleo SUNISO 1GS). Tanto a concentração, a densidade e a viscosidade da mistura líquida foram calculadas nas condições de pressão e de temperatura da entrada do tubo.

A vazão e o número de Reynolds foram calculados a partir de um processo iterativo do cálculo do fator de atrito pela correlação de Churchill (1977).

Os cálculos das incertezas da pressão, da temperatura, da densidade, da concentração, da viscosidade, do fator de atrito, da velocidade média, do número de Reynolds e da vazão, foram calculados utilizando a metodologia de Moffat (1988).

Distribuições típicas de pressão e de temperatura são mostradas na Fig. (2) para quatro ensaios diferentes. Nestes ensaios se manteve constante a pressão no VAP de 3,50 ± 0,02 bar e variou-se a pressão no VBP, mantendo-se a temperatura da mistura no VAP invariável em 26,7 ± 0,5 °C. Com estes testes, consegue-se verificar a influência da diferença de pressão nas características do escoamento para uma fração mássica inicial constante de refrigerante na mistura líquida do VAP de 0,25 ± 0,01 (massa de refrigerante/massa de mistura). As diferenças de pressão média medida entre o primeiro e o último transdutor para estes ensaios foram de 1,97 ± 0,02, 1,69 ± 0,02, 1,31 ± 0,02 e 0,89 ± 0,02 bar, resultando em vazões através do tubo de 6,8 ± 0,6, 6,5 ± 0,6, 5,8 ± 0,5 e 5,1 ± 0,5 g/s, o que correspondem a números de Reynolds de 620 ± 78, 590 ± 74, 530 ± 66 e 460 ± 60, respectivamente. Os pontos plotados representam a média dos dados coletados durante um tempo médio de teste de 10 minutos. Estes pontos estão unidos por retas, apenas para apontar a tendência dos dados.

Observa-se no gráfico da distribuição de pressão, Fig (2a), a existência de duas regiões distintas no escoamento. Uma região de gradiente de pressão constante, o que caracteriza uma região de escoamento predominantemente monofásico, na qual a queda de pressão é resultado apenas do atrito. A presença de uma pequena quantidade de refrigerante na fase gasosa não é suficiente para descaracterizar o modelo de escoamento monofásico neste trecho. Na outra região, observa-se um gradiente de pressão variável, com uma queda de pressão não linear, resultado típico de um escoamento bifásico. Isto ocorre porque a liberação de gás da fase líquida diminui consideravelmente a densidade da mistura em cada seção transversal ao longo do escoamento, o que por sua vez acelera o escoamento para manter a vazão mássica constante. Assim, nesta região a queda de pressão do escoamento é causada tanto pelo atrito, como pela aceleração do escoamento devido à redução da densidade da mistura.

A distribuição de temperatura, mostrada na Fig. (2b), também apresenta dois comportamentos diferentes. Na região de queda de pressão linear, observa-se que a temperatura permanece praticamente constante, sofrendo uma grande redução na região do escoamento bifásico. O desprendimento do gás da mistura líquida, um fenômeno que requer uma grande quantidade de energia para prover o calor latente necessário para evaporação, produz esta redução de temperatura. Nota-se que a temperatura chega a cair em torno de 10 °C para o teste de maior diferença de pressão. Um resultado interessante, aparentemente ainda sem explicação, é observado na entrada do escoamento, onde se verifica uma temperatura menor.

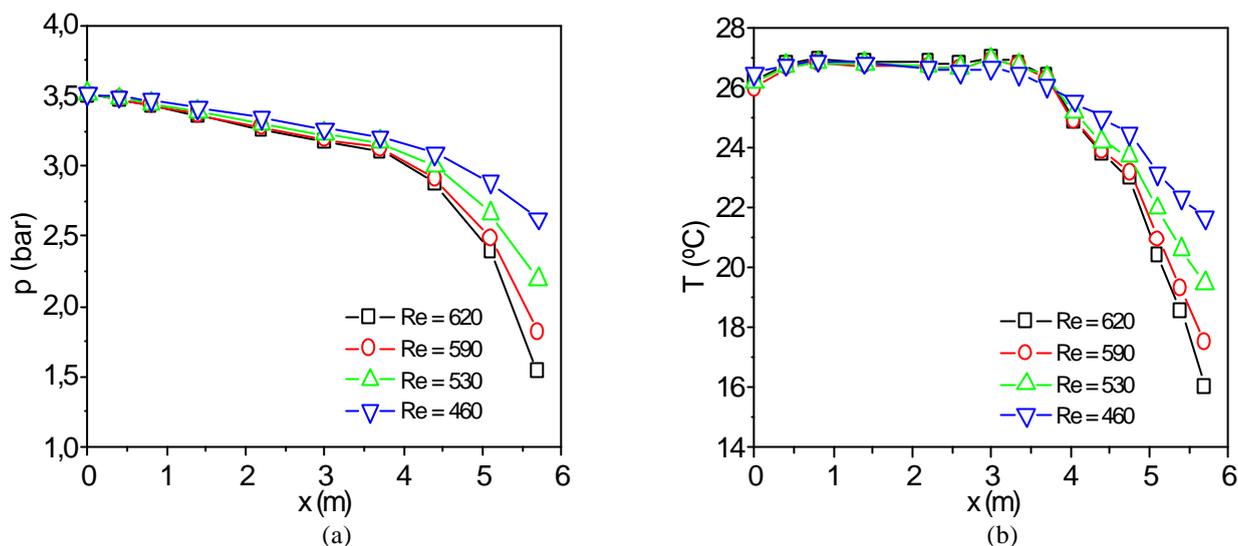


Figura 2. (a) Distribuição de pressão ao longo do tubo. (b) Distribuição de temperatura ao longo do tubo.

As Figuras (3a) e (3b) mostram os resultados para três ensaios em que também se manteve constante a pressão no VAP de  $4,00 \pm 0,02$  bar e variou-se a pressão no VBP, mantendo-se a temperatura da mistura no VAP invariável em  $26,5 \pm 0,5$   $^{\circ}\text{C}$ , o que resulta numa fração mássica inicial constante de refrigerante na mistura líquida do VAP de  $0,31 \pm 0,01$ . As diferenças de pressão média medida entre o primeiro e o último transdutor para estes ensaios foram de  $1,92 \pm 0,02$ ,  $1,89 \pm 0,02$  e  $1,61 \pm 0,02$  bar, resultando em vazões através do tubo de  $12,2 \pm 1,5$ ,  $12,0 \pm 1,4$  e  $11,6 \pm 1,3$  g/s, o que correspondem a números de Reynolds de  $1520 \pm 330$ ,  $1480 \pm 310$  e  $1440 \pm 290$ , respectivamente.

A principal diferença destes testes em relação aos testes da Fig (2) é a maior concentração de refrigerante no óleo na entrada do tubo. A tendência dos resultados é semelhante àquela observada nos testes da Fig (2). Esperava-se que a queda de temperatura do escoamento fosse menor nestes testes em relação aos testes anteriores, devido à maior concentração de refrigerante no óleo na entrada do escoamento. Entretanto isto não pode ser confirmado, pois não se obteve as mesmas diferenças reais de pressão e, portanto, não se possui a mesma base para a comparação.

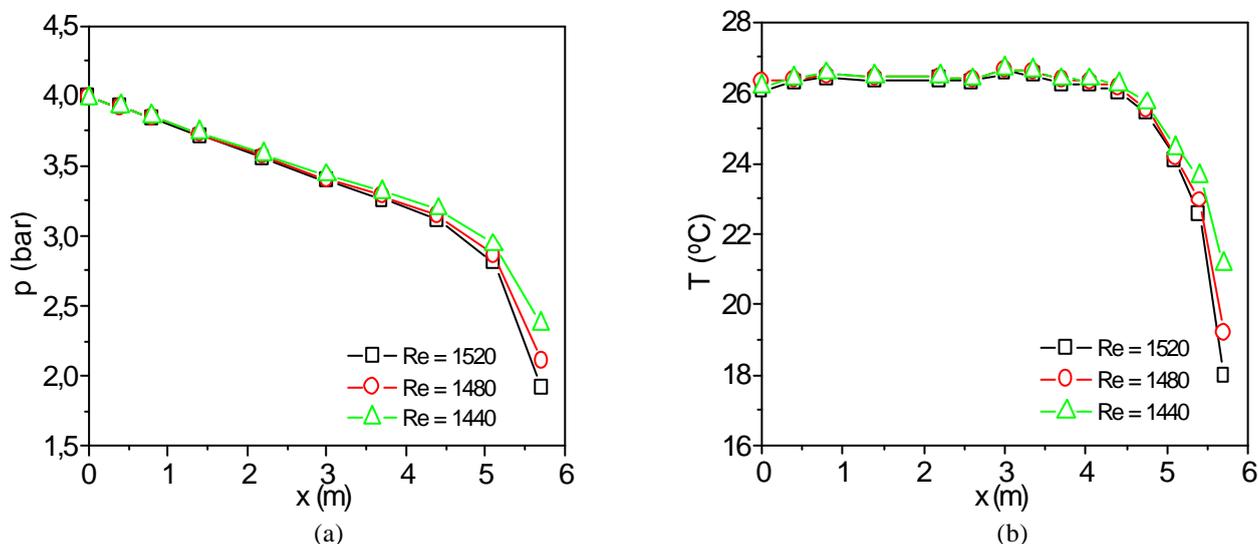


Figura 3. (a) Distribuição de pressão ao longo do tubo. (b) Distribuição de temperatura ao longo do tubo.

As Figuras (4a) e (4b) mostram os resultados para três ensaios em que também se manteve constante a pressão no VAP de  $4,50 \pm 0,02$  bar e variou-se a pressão no VBP, mantendo-se a temperatura da mistura no VAP invariável em  $26,3 \pm 0,5$   $^{\circ}\text{C}$ , o que resulta numa fração mássica inicial constante de refrigerante na mistura líquida do VAP de  $0,39 \pm 0,01$ . As diferenças de pressão média medida entre o primeiro e o último transdutor para estes ensaios foram de  $1,94 \pm 0,02$ ,  $1,63 \pm 0,02$  e  $1,26 \pm 0,02$  bar, resultando em vazões através do tubo de  $11,2 \pm 0,2$ ,  $11,0 \pm 0,2$  e  $10,5 \pm 0,2$  g/s, o que correspondem a números de Reynolds de  $1930 \pm 370$ ,  $1880 \pm 350$  e  $1800 \pm 340$ , respectivamente.

A principal diferença destes testes em relação aos testes da Fig (2) e (3) é a maior concentração de refrigerante no óleo na entrada do tubo. As mesmas observações podem ser feitas, sem que nenhuma tendência visível diferente possa ser constatada.

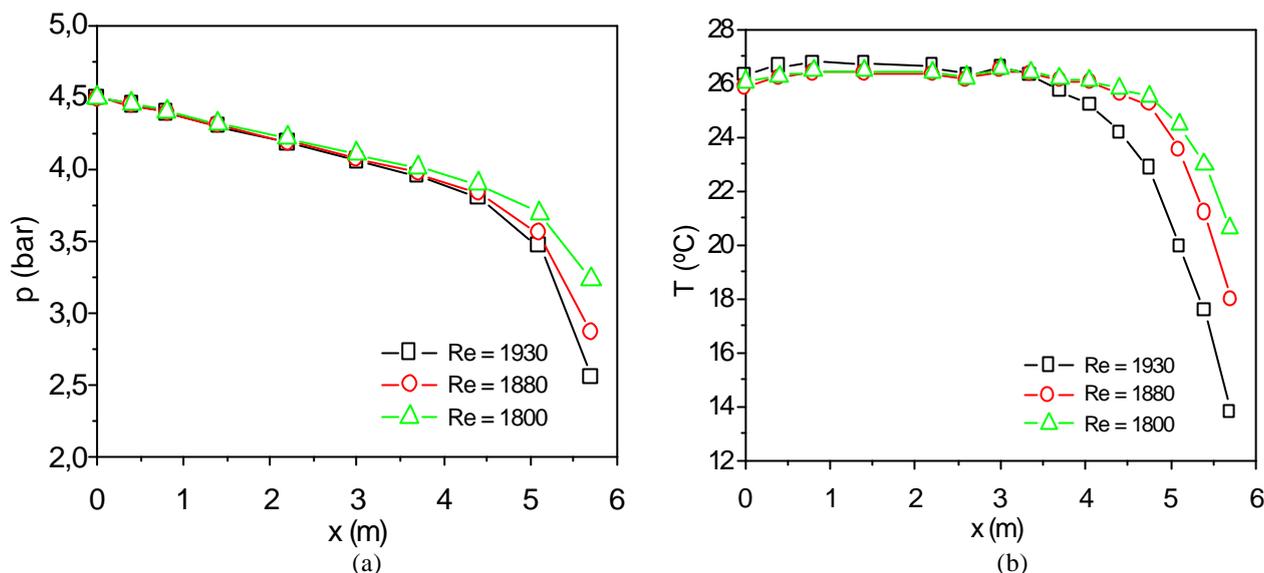


Figura 4. (a) Distribuição de pressão ao longo do tubo. (b) Distribuição de temperatura ao longo do tubo.

Visualizações típicas do escoamento são mostradas na Fig. (5). Este ensaio foi realizado com pressão no VAP de  $4,50 \pm 0,02$  bar, pressão no VBP de  $1,50 \pm 0,02$  bar e temperatura da mistura no VAP de  $29,2 \pm 0,5$  °C, resultando em  $Re = 2240 \pm 380$ . A fração mássica de refrigerante no VAP foi calculada em  $0,34 \pm 0,01$ . Acompanhando as imagens do escoamento em várias posições axiais ao longo do tubo de vidro (STV), adquiridas em instantes de tempo diferentes, são apresentados os gráficos da distribuição de pressão e de temperatura para este ensaio. É importante salientar que a posição de 200 mm mostrada nas imagens corresponde à posição zero dos gráficos de distribuição de pressão e de temperatura.

As primeiras três imagens mostradas na Fig. (5), posição 2860-2900 mm, referem-se à parte inicial do escoamento, onde nenhum desprendimento de bolhas pode ser observado. Para a posição 3450-3490 mm, três imagens são mostradas. Nota-se que em apenas uma das imagens pode-se observar a presença de um pequeno número de bolhas de dimensões reduzidas. Para a posição 4150-4170 mm, as cinco imagens mostram um número de bolhas e uma frequência de aparecimento maior. Nesta seqüência, diversos padrões de escoamento podem ser observados, desde escoamento monofásico (na primeira imagem), até um escoamento com um número muito grande de pequenas bolhas caracterizado por uma estrutura contínua e homogênea, aparentemente já caracterizando o escoamento em espuma. Esta seqüência de imagens também pode ser usada para mostrar a grande instabilidade do escoamento, caracterizada pelos diferentes padrões observados. A instabilidade pode ser comprovada pela grande flutuação da pressão observada no gráfico apresentado acima das imagens. É interessante notar que as distribuições de pressão e de temperatura ainda não indicam a predominância de escoamento bifásico nesta região, embora deva ser levado em consideração que o diâmetro e a rugosidade do tubo de aço cobreado (onde são realizadas as medições) são diferentes do diâmetro e da rugosidade do tubo de vidro (onde as imagens são adquiridas). O diâmetro do tubo de vidro é um pouco menor ( $3,03 \pm 0,03$  mm) do que o diâmetro do tubo de aço ( $3,22 \pm 0,03$  mm), o que talvez esteja antecipando a formação de bolhas no tubo de vidro, embora a sua rugosidade seja menor. Para as posições 4380-4420 mm e 4840-4870 mm, as imagens indicam padrões semelhantes aos obtidos na posição anterior. A distribuição de temperatura na região de 4840-4870 mm já apresenta uma pequena queda, indicando a presença de escoamento bifásico. As quatro imagens seguintes, referentes às posições 5320-5360 mm e 5800-5830 mm, mostram que o escoamento em espuma é predominante quando existe o escoamento bifásico. Nestas regiões, ocorre uma grande redução de pressão e de temperatura.

Contrariamente ao observado em escoamento de refrigerante contaminado com pequenas quantidades de óleo, onde são identificados vários padrões de escoamento, como o estratificado, anular e pistonado, o escoamento da mistura óleo-refrigerante com pequenas quantidades de refrigerante apresenta, predominantemente, apenas o padrão de escoamento em bolhas e o padrão de escoamento em espuma. Eventualmente, algumas bolhas maiores, preenchendo quase toda a secção do tubo, são observadas.

A Figura (6) apresenta resultados da visualização do ensaio realizado com pressão no VAP de  $5,50 \pm 0,02$  bar, pressão no VBP de  $1,50 \pm 0,02$  bar e temperatura da mistura no VAP de  $31,5 \pm 0,5$  °C, resultando em  $Re = 4550 \pm 670$ . A fração mássica de refrigerante no VAP foi calculada em  $0,46 \pm 0,01$ . Os resultados de visualização apresentados na Fig. (6) são melhores do que os da Fig. (5), uma vez que uma seqüência mais lógica é observada na evolução do surgimento de bolhas. Além disso, observa-se uma melhor relação entre as imagens e os dados de distribuição de temperatura e de pressão. Note-se que a partir de  $x = 5$  m o escoamento bifásico é predominante, tanto nos resultados da visualização, como nos dados de temperatura e de pressão. As demais características do escoamento são semelhantes às descritas para o ensaio apresentado na Fig. (5).

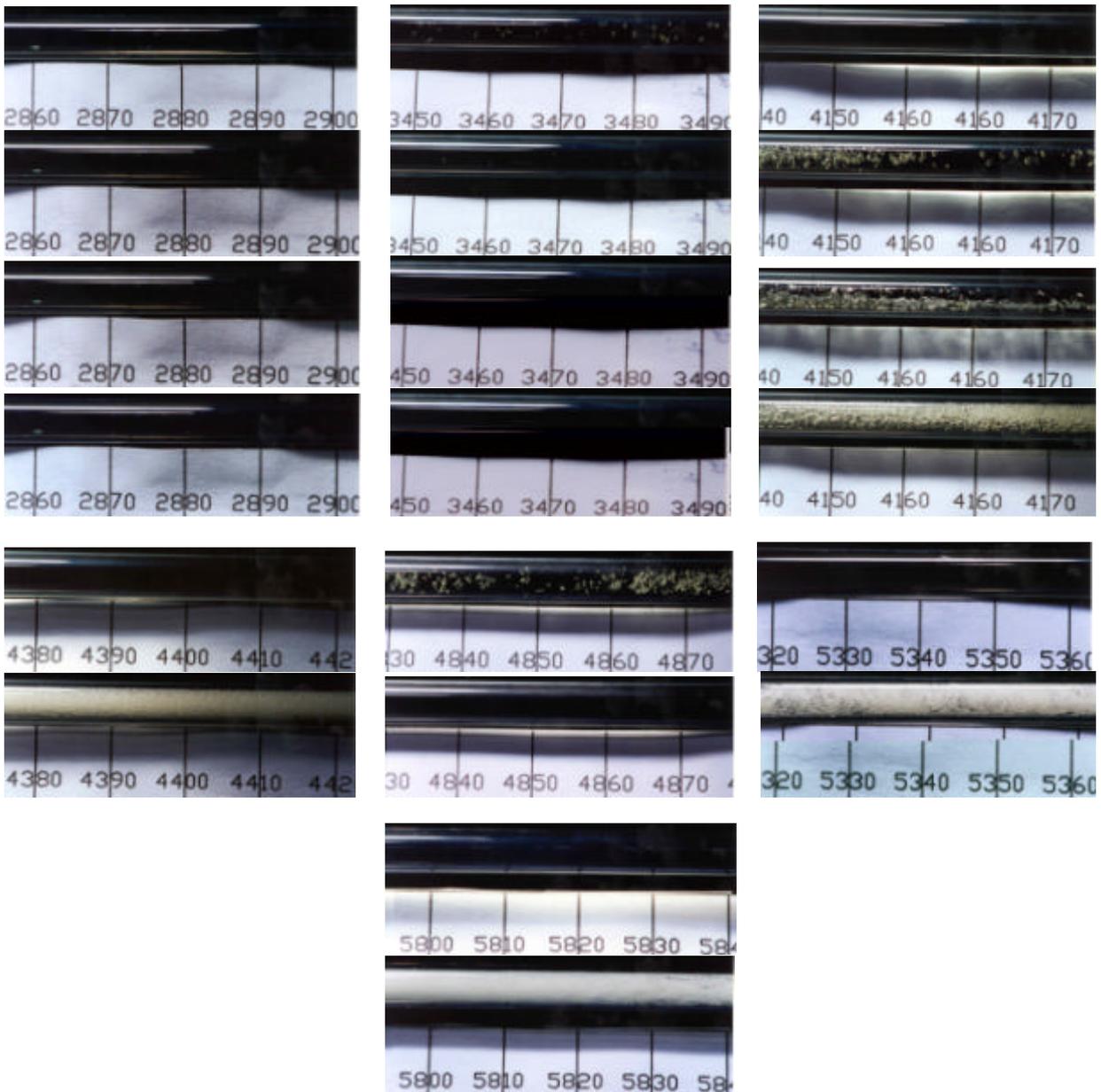
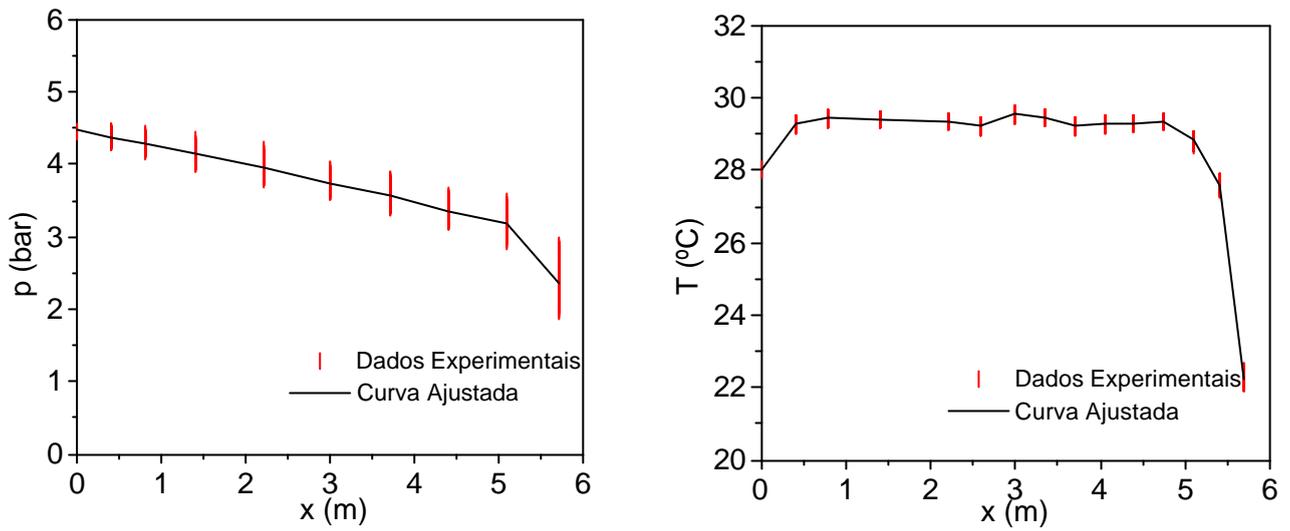


Figura 5. Distribuições de pressão e de temperatura e visualização do escoamento para  $Re = 2440$ .

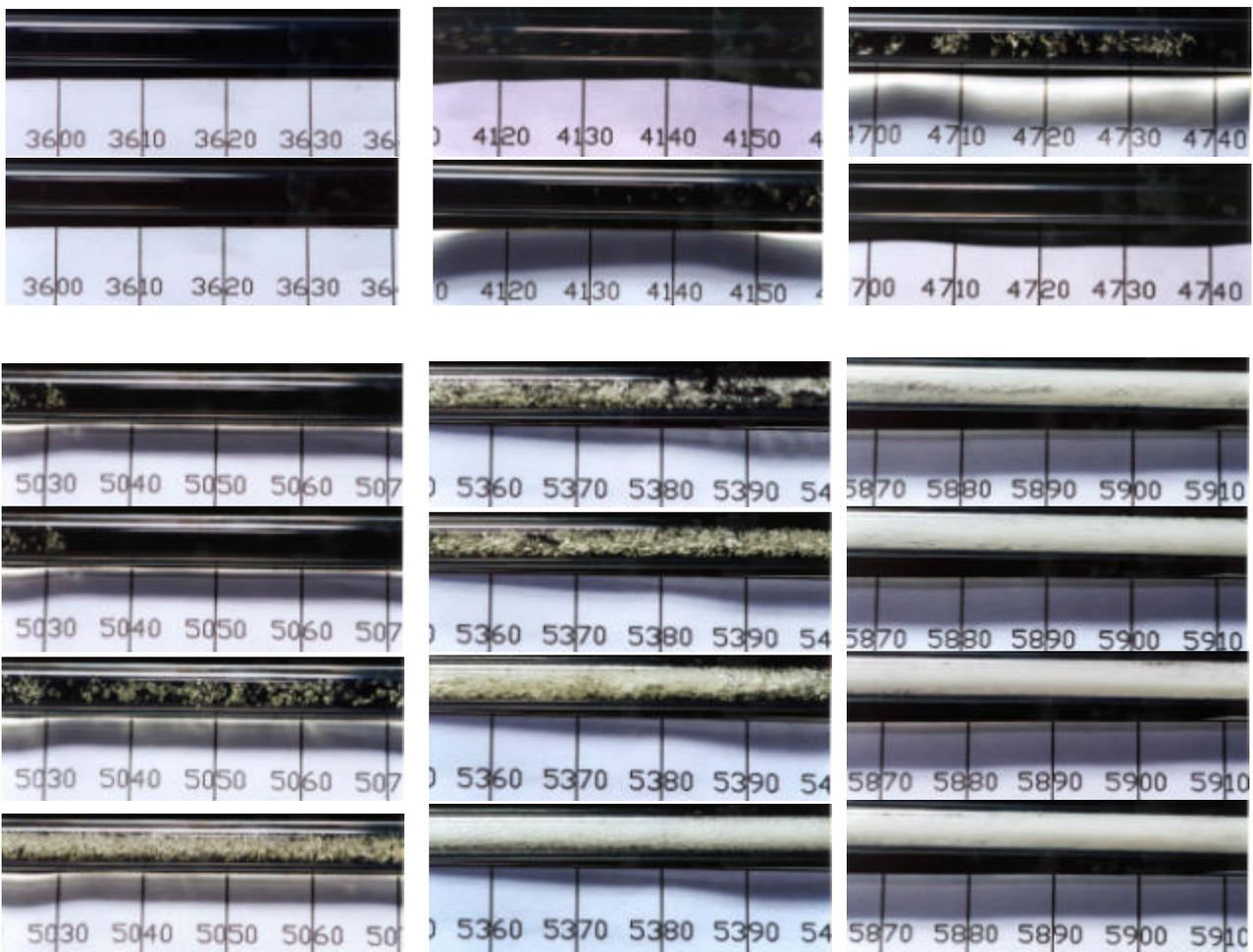
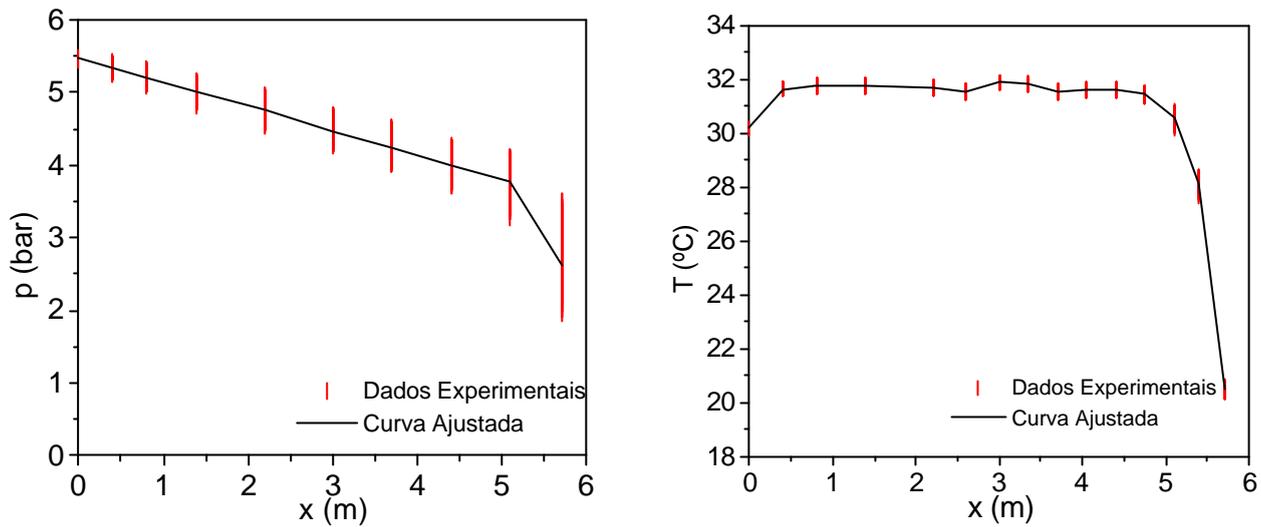


Figura 6. Distribuições de pressão e de temperatura e visualização do escoamento para  $Re = 4550$ .

**5. Conclusões**

Este trabalho refere-se ao estudo experimental do escoamento bifásico de uma mistura líquida composta por óleo mineral (SUNISO 1GS) e refrigerante R12 (mistura usada em sistemas de refrigeração a ar condicionado), ao longo de um tubo reto de seção circular. Para este propósito, foi construída uma bancada experimental para promover o escoamento da mistura ao longo de dois tubos retos, horizontais e de diâmetros constantes. Um dos tubos foi usado para medir a distribuição de pressão e de temperatura do escoamento para diversas vazões da mistura e para várias temperaturas e concentrações de refrigerante no óleo na entrada do tubo. Paralelamente, efetuou-se a visualização do mesmo escoamento através de um tubo de vidro com características geométricas semelhantes, com o objetivo de relacionar as distribuições de pressão e de temperatura medidos com os padrões de escoamento observados.

Os resultados mostram um escoamento líquido monofásico da mistura na região de entrada do tubo, com o aparecimento eventual de pequenas bolhas. Nesta região, a temperatura da mistura permanece praticamente constante e o escoamento apresenta uma queda de pressão linear. À medida que o escoamento prossegue, uma pequena quantidade de bolhas começa a surgir devido à redução de solubilidade do refrigerante no óleo como resultado da queda de pressão do escoamento. O número de bolhas aumenta com a contínua queda de pressão até que uma região de escoamento de espuma é observada próxima da saída do tubo. Na região de escoamento bifásico observa-se uma grande redução não linear de pressão e de temperatura. É importante destacar que o padrão de escoamento em espuma, visualizado tanto neste trabalho, como por Lacerda *et al.*, não é observado em escoamentos de misturas óleo-refrigerante com pequenas concentrações de óleo.

Uma característica importante observada em todos os testes efetuados diz respeito à instabilidade do escoamento. Nos testes de visualização, observou-se diversos padrões de escoamento numa mesma posição do tubo em diferentes instantes de tempo. Esta mudança constante de padrão de escoamento numa mesma posição foi refletida nas medidas de pressão, que sofreram oscilações significativas, comprovando a instabilidade.

## 6. Agradecimentos

O desenvolvimento deste trabalho contou com o apoio da FAPESP.

## 7. Referências

- ASHRAE, (1997), "Refrigerants", in ASHRAE Handbook – Fundamentals, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Chapter 18, pp. 18.1-18.10.
- ASHRAE, (1998), "Lubricants in refrigerant systems", in ASHRAE Handbook – Refrigeration, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Chapter 7, pp. 7.1-7.24.
- 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", ASRHAЕ Transactions, Vol. 92, pp. 55-73.
- Baustian, J. J., Pate, M. B. and Bergles, A. E., (1988 a), "Measuring the Concentration of a Oil Refrigerant Mixture Using an Acoustic Velocity Sensor", ASRHAЕ Transactions, Vol. 94, Part 2, pp. 602-614.
- Baustian, J. J., Pate, M. B. and Bergles, A. E., (1988 b), "Measuring the Concentration of a Oil Refrigerant Mixture Using a Bypass Viscometer", ASRHAЕ Transactions, Vol. 94, Part 2, pp. 588-600.
- Baustian, J. J., Pate, M. B. and Bergles, A. E., (1988 c), "Measuring the Concentration of a Oil Refrigerant Mixture Using Vibrating U-Tube Densimeter", ASRHAЕ Transactions, Vol. 94, Part 2, pp. 571-586.
- Baustian, J. J., Pate, M. B. and Bergles, A. E., (1988 d), "Measuring the Concentration of a Oil Refrigerant Mixture Measurement Test Facility and Initial Results", ASRHAЕ Transactions, Vol. 94, Part 1, pp. 167-177.
- Burley, R., Shakarin, M., (1992), "An Experimental Study of Foam Rheology in Straight Capillary Tubes", International Journal of Engineering Fluid Mechanics, Vol. 5, p.115-141.
- Calvert, J. R., (1990), "Pressure Drop for Foam Flow Through Pipes", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 11 N° 3, p.236-241.
- Churchill Churchill, S.W. (1977), "Friction-Factor Equation Spans all Fluid-Flow Regimes, Chemical Engineering", n.7, pp. 91-92.
- Costa, C.M.F., Ferreira, R.T.S., Prata, A.T., (1990). Considerations About the Leakage Through the Minimal Clearance in a Rolling Piston Compressor. International Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, V. II, pp. 853-863.
- Drost, R. T. (1994), "Outgassing and Absorption Rates of Oil/Refrigerant Mixtures", Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, Vol. 1, pp. 361-367.
- Eckels, S. J., and M. B. Pate, (1991), "In-Tube Evaporation and Condensation of Refrigerant-Lubricant Mixtures of HFC-134a and CFC-12", ASHRAE Transactions, Vol. 97, Part 2, pp. 62-70.
- Fukuta, M., T. Yanagisawa, T. Shimizu, and H. Nishijima, (1995), "Transient Mixing Characteristics of Refrigerant with Refrigeration Oil", Proceedings of the International Congress of Refrigeration, Vol. 4, pp. 215-222.
- Gasche, J. L., (1996), "Escoamento de óleo e Refrigerante pela Folga Radial de Compressores Rotativos de Pistão Rolante", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC.
- Goswami, D. Y., D. O. Shah, C. K. Jotshi, S. Bhagwat, M. Leung, and A. S. Gregory, (1997), "Foaming Characteristics of HFC Refrigerants", ASHRAE Journal, June, pp. 39-44.
- Grebner, J. J., and R. R. Crawford, (1993), "The Effects of Lubricant on Evaporator Capacity for Systems Using Mixtures of R-12/Mineral Oil and R-134a/Synthetic Oil", ASHRAE Transactions, Vol. 99, Part 1, pp. 380-386.
- Groll, E. A., (1996), "Update on CFC Substitutes in the USA with Respect to Vapor Compression Technology", Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, Vol. 1, pp. 95-101.
- Hambraeus, K. (1995), "Heat Transfer of Oil-Contaminated HFC134a in a Horizontal Evaporator", International Journal of Refrigeration", Vol. 18, N. 2, pp. 87-99.
- Kraynik, A. M., (1988), "Foam Flows", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 20, p. 325-357.

- Lacerda, V. T., PRATA, A. T., (2000 a), “Despreendimento de Refrigerante em Escoamento de Óleo em Tubo Reto Horizontal de Diâmetro Constante”, ENCIT 2000, 8TH Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences, Proceedings in CD-ROM, code SO3p23, Porto Alegre – RS, Brazil, 3-6/10/2000.
- Lacerda, V. T., PRATA, A. T., Fagotti, F., (2000 b), “Experimental Characterization of Oil-Refrigerant Two-Phase Flow”, ASME.
- Leung, M., C. K. Jotshi, and D. Y. Goswami, (1998), “Measurements of Absorption Rates of HFC Single and Blended Refrigerants in POE Oils”, HVAC&R Research, Vol. 4, N. 2, April, pp. 141-151.
- Lilje, K. C., M. Sabahi, and S. Hamid, (1995), “Polybasic Esters: Novel Synthetic Lubricants Designed for Use in HFC Compressors”, ASHRAE Transactions, Vol. 101, Part 2, pp. 935-939.
- Meyer, J.J. e Jabardo, J.M.S., (1994), “An Ultrasonic Device for Measuring the Oil Concentration in Flowing Liquid Refrigerant”, International Journal of Refrigeration, Vol.17, no 7, pp.481-486.
- Moffat, Robert J., (1988), “Describing the Uncertainties in Experimental Results”, Experimental Thermal And Fluid Science, Vol.1, pp.3-17.
- Nutt, C. W., Burley, R. W., (1989), “The Influence of Foam Rheology in Enhanced Oil Recovery Operations”, Chapter 8 in Foams: Physics, Chemistry and Structure, Vol. 45, N° 1, p.39-48.
- Short, G. D., and R. C. Cavestri, (1992), “High-Viscosity Ester Lubricants for Alternative Refrigerants”, ASHRAE Transactions, Vol. 98, Part 1, pp. 789-795.
- Sundaresan, S. G., and W. R. Finkenstadt, (1992), “Polyalkylene Glycol and Polyolester Lubricant Candidates for Use with HFC-134a in Refrigeration Compressors”, ASHRAE Transactions, Vol. 98, Part 1, pp. 796-803.
- Thomas, R. H. P., and H. T. Pham, (1992), “Solubility and Miscibility of Environmentally Safer Refrigerant/Lubricant Mixtures”, ASHRAE Transactions, Vol. 98, Part 1, pp. 783-788.
- Yanagisawa, T., Fukuta, M., Shimizu T., Zushi T., (1991), “Foaming Characteristics of an Oil-Refrigeration Mixture”, International Journal of Refrigeration, Vol. 14, pp. 132-145.
- Yokoeki, A. M., (1994), “Solubility and Viscosity of Refrigeration-Oil Mixtures”, Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue”, Vol. I, pp. 335-340.
- 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 FLOW OF A MIXTURE MINERAL OIL-R12: PRESSURE AND TEMPERATURE DISTRIBUTION AND FLOW VISUALIZATION**

**Edgard Poiate Junior**

PETROBRAS/CENPES/PDEP/MC

Cidade Universitária – Q. 7 – Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ – CEP 21949-900

[poiate@petrobras.com.br](mailto:poiate@petrobras.com.br)

**José Luiz Gasche**

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS/UNESP - Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Brasil Centro 56, Ilha Solteira-SP – CEP 15385-000

[gasche@staff.uiuc.edu](mailto:gasche@staff.uiuc.edu)

**Abstract.** *This work refers to the experimental study of the two-phase flow of a liquid mixture composed by mineral oil (SUNISO IGS) and refrigerant R12 along two horizontal straight tubes of constant diameter. One tube is used for flow visualization and the other is instrumented for pressure and temperature measurements. The results show a predominant liquid mixture flow at the inlet tube region with small bubbles arising eventually. It is noted a mixture temperature practically constant and a linear reduction in the pressure at this single-phase region. As the mixture flows down through the tube a small number of bubbles arise due to the reduction of the solubility of refrigerant in the oil, which is caused by the pressure drop of the flow. The number of bubbles increases with the continuous pressure drop until that a foam flow region is observed close to the exit of the tube. A great reduction in the pressure and temperature is observed at this two-phase region. Besides, it is also observed a great instability in the flow, which is confirmed by several flow patterns at the same position at different instant and by a large pressure oscillation.*

**Keywords.** *Oil-refrigerant mixture, Two-phase flow, Foam, Flow visualization*