

1

Introdução

Uma fase é simplesmente um estado da matéria e pode ser tanto gás, líquido ou sólido. Entende-se por escoamento multifásico como sendo o escoamento onde há presença de mais de uma fase, sendo sua configuração mais simples o escoamento bifásico.

Escoamentos multifásicos acontecem em toda parte e a todo instante na natureza como em chuvas, ciclones, poluição atmosférica, sendo igualmente parte importante de inúmeros processos industriais como plantas de geração de energia convencional e nuclear, combustão interna, transporte e produção de óleo e gás e outras aplicações.

Na indústria de petróleo, o escoamento multifásico ocorre durante o processo de produção e transporte do óleo e do gás, tanto nos poços quanto nas linhas que interligam o poço à plataforma. Durante a produção do poço, o fluxo desde o reservatório até a chegada à plataforma de produção passa por um processo de despressurização. Consequentemente, uma parte do hidrocarboneto líquido dissocia-se e passa a se apresentar na forma gasosa, escoando junto com a parte líquida inicial. Considerando-se que diversos equipamentos e linhas de produção devem ser adequadamente projetados para o transporte e recebimento destes fluidos na plataforma, percebe-se a importância de um conhecimento sólido sobre física do escoamento multifásico.

Escoamentos multifásicos são caracterizados pela existência de diversos padrões de escoamento. Quando gás e líquido escoam simultaneamente em uma tubulação, várias configurações de escoamento podem existir. Estes padrões dependem de variáveis operacionais, notadamente da velocidade do líquido e do gás, das propriedades dos fluidos e de alguns aspectos geométricos, tais como, diâmetro da tubulação e ângulo de inclinação. Os aspectos hidrodinâmicos do escoamento mudam drasticamente para cada padrão de escoamento que prevalece.

O entendimento correto de um processo envolvendo o escoamento de duas fases depende primeiramente do conhecimento do padrão de escoamento das fases observado. Este é o primeiro passo para o desenvolvimento de

modelos para a previsão da perda de carga, troca de calor e massa, além de outros parâmetros globais de interesse do escoamento multifásico.

1.1. Classificação dos padrões de escoamento

O escoamento observado quando duas fases escoam em uma tubulação pode assumir várias configurações diferentes no que diz respeito à distribuição da interface das fases. Algumas são caóticas e difíceis de serem classificadas, enquanto outras podem ser claramente definidas. Transições entre as configurações são geralmente associadas a mudanças nas vazões ou à inclinação da tubulação.

A principal tarefa na classificação dos padrões de escoamento está em agrupar configurações que apresentam características comuns. Esta não é uma tarefa simples ou única e depende amplamente da interpretação individual de diferentes pesquisadores. Enquanto alguns tratam as configurações da forma mais básica possível, outros buscam agrupar os padrões da forma mais detalhada possível.

Até hoje, esta classificação entre os padrões de escoamento ainda não apresenta uma definição uniformizada entre os pesquisadores. Porém, busca-se minimizar o número de padrões existentes na literatura de forma que dados de diferentes laboratórios possam ser comparados.

Uma tentativa para definir uma quantidade razoável de padrões foi feita por Shoham (1982). As definições são baseadas em dados experimentais adquiridos para uma grande faixa de ângulos de inclinação, separando-os em vertical e horizontal e são apresentados nas Figuras 1.1 e 1.2 respectivamente. A seguir, será feita uma breve descrição dos mesmos.

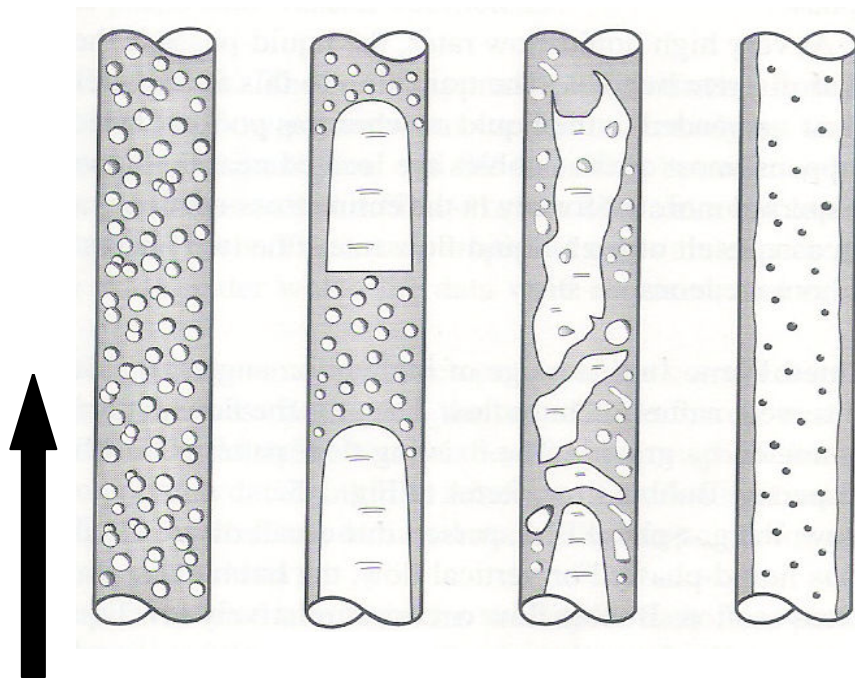


Figura 1.1 - Padrões do escoamento para tubulações na posição vertical

Padrão Bolhas (*bubble flow*): A fase gasosa é aproximadamente uniformemente distribuída na forma de bolhas discretas em uma fase líquida contínua. Este escoamento é definido como padrão bolhas (*bubble flow*) quando há baixas vazões de líquido e bolhas dispersas (*dispersed bubble*), quando a vazão de líquido aumenta. Apesar disso, não é simples observar tal diferença entre os padrões;

Padrão Golfada (*slug flow*): A maior parte da fase gasosa encontra-se localizada numa larga bolha de gás com formato de um “projétil”, chamada de “bolha de Taylor”, com um diâmetro próximo ao diâmetro da tubulação. O escoamento consiste uma sucessão de bolhas e pistões de líquido que ocupam toda a tubulação e carregam bolhas dispersas em seu interior. No escoamento vertical, uma fina camada de líquido escoar no sentido contrário no espaço anular entre a bolha e a parede do tubo. O filme penetra no pistão de líquido seguinte, formando uma zona de mistura aerada por pequenas bolhas de gás. Quando a região ocupada pelo líquido escoar sem a presença de gás disperso em seu interior, o escoamento também é denominado de *plug flow*.

Padrão Caótico (*Churn flow*): É similar ao padrão golfada, porém apresenta-se mais desordenado. Com aumento da vazão de gás, uma quebra das bolhas do escoamento golfada leva a um padrão de escoamento instável. A

velocidade do gás aumenta e as bolhas de Taylor perdem seu formato ordenado por conta do aumento da concentração de gás no pistão e a continuidade do escoamento é perdida, com o líquido ora subindo, ora descendo;

Padrão Anular (*Annular flow*): O líquido escoar na parede do tubo como um filme de espessura uniforme, enquanto que a fase gasosa flui pelo centro. É possível a ocorrência de bolhas dispersas no filme líquido;

O escoamento horizontal tende a ser mais complexo que o vertical, por conta da assimetria no escoamento induzida pela gravidade agindo normal à direção do escoamento. Por conta desta força, o fluido mais denso (líquido) tende a ocupar o fundo da tubulação. Os padrões de escoamento observados para este tipo de escoamento são exemplificados na Figura 1.2 e serão brevemente caracterizados a seguir.

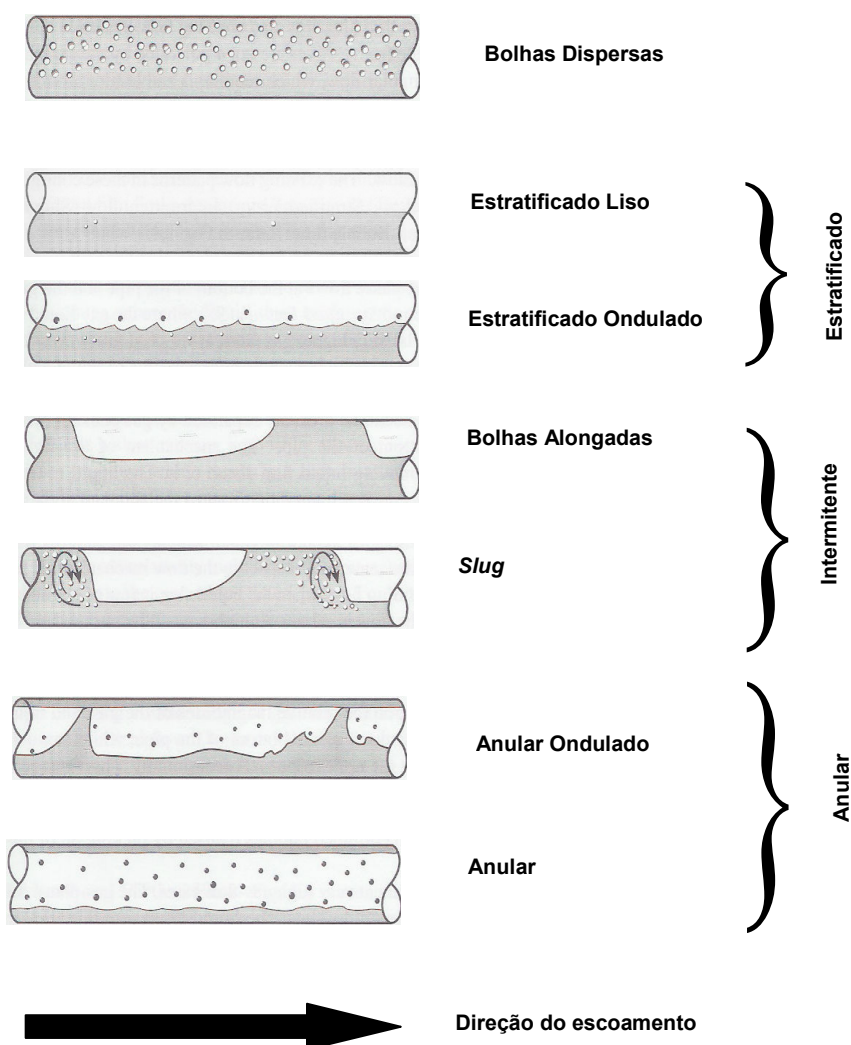


Figura 1.2 - Padrões do escoamento para tubulações na horizontal ou pouco inclinada

Padrão Bolhas Dispersas (*Dispersed Bubble Flow*): Para vazões muito altas de líquido, a fase gás é distribuída como bolhas discretas no interior de uma fase líquida contínua, com a tendência de se aglomerarem na parte superior da tubulação. Ambas as fases movem-se com a mesma velocidade e o escoamento é considerado homogêneo sem escorregamento.

Padrão Estratificado (*Stratified Flow*): Ocorre para baixas vazões de gás e líquido. A separação gravitacional é completa. O líquido escoar no fundo e o gás na parte superior. Apresenta-se subdividido em estratificado liso, onde a interface gás-líquido é suave e estratificado ondulado, que ocorre para maiores vazões de gás na qual ondas estáveis formam-se na interface;

Padrão Intermitente (*Intermittent Flow*): É caracterizado pela alternância entre líquido e gás. Pistões de líquido, que ocupam todo o diâmetro do tubo são separados por bolhas de gás, que contêm uma camada de líquido estratificada escoando no fundo do tubo. O mecanismo do escoamento é caracterizado por uma alta velocidade do pistão de líquido, ultrapassando o líquido presente no filme que escoar lentamente à sua frente. O padrão apresenta-se subdividido em *Slug* e Bolhas Alongadas. O comportamento do escoamento é o mesmo para os dois padrões no que diz respeito aos mecanismos hidrodinâmicos envolvidos. O escoamento de bolhas alongadas é considerado como um caso limite do escoamento *slug*, quando o pistão de líquido apresenta-se livre de bolhas em seu interior. Isto ocorre para baixas velocidades de mistura, quando o escoamento é mais suave. Para altas vazões de gás, o líquido se apresenta aerado por pequenas bolhas, as quais se concentram na frente do pistão de líquido e na parte superior da tubulação.

Padrão Anular (*Annular Flow*): Ocorre para altas vazões de gás. Padrão semelhante ao observado para escoamento vertical, com exceção que a espessura do filme de líquido é maior no fundo do tubo. O líquido também pode escoar no centro do tubo, sob a forma de gotas dispersas no gás. A interface é ondulada, resultando em alta tensão interfacial. Para baixas vazões de gás, a maior parte do líquido escoar na parte de baixo da tubulação, enquanto ondas instáveis são formadas, indo de encontro à parte superior do tubo, caracterizando o escoamento anular ondulado.

1.2.

Mapas dos padrões de escoamento

A abordagem inicial para caracterização dos padrões de escoamento foi feita a partir de observações visuais. Geralmente, os dados são mapeados em um gráfico bidimensional e as regiões de transição entre os diferentes padrões de fluxo determinadas. Com isso, define-se o que se chama de mapa de padrão de escoamento. Na maioria dos casos, espera-se que estes mapas sejam confiáveis para as condições em que são determinados.

A construção de um mapa de padrão de escoamento varia de acordo com o interesse do autor que o está estudando. Existem três modos básicos de se construir um mapa de padrão de escoamento. O primeiro modo a ser citado consiste da utilização de variáveis adimensionais. Este tipo de mapa permite uma utilização mais generalizada, por não estar associado às propriedades físicas dos fluidos ou ao diâmetro da tubulação. Como exemplo, pode ser a utilização do número de *Reynolds*, *Froude*, razão entre as vazões das fases, entre outras. Apesar disso, é importante ressaltar que a determinação dos números adimensionais que regem especificamente cada padrão de escoamento multifásico não é uma tarefa simples. Um exemplo desta abordagem adimensional pode ser vista na Figura 1.3 no mapa de padrão de escoamento proposto por Spedding & Nguyen (1980).

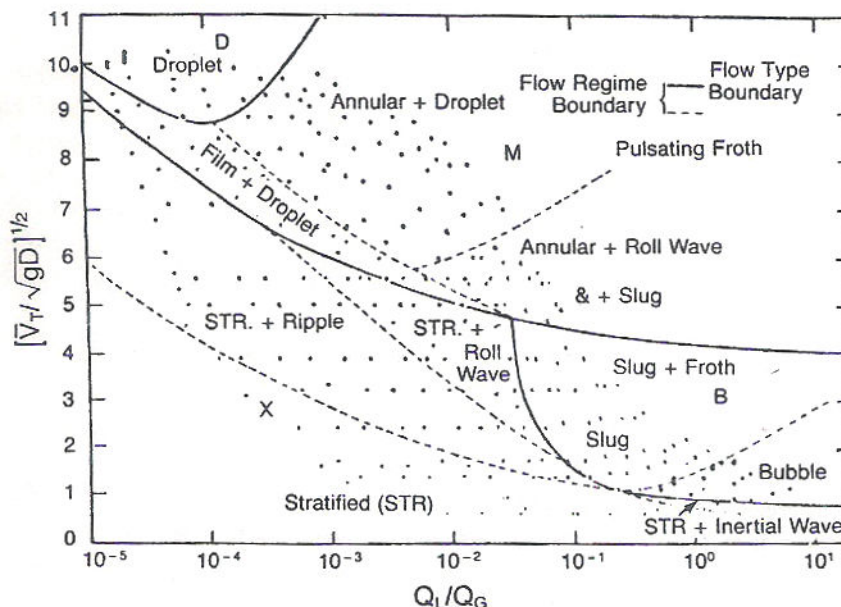


Figura 1.3 – Mapa de padrões de escoamento horizontal proposto por Spedding & Nguyen (1980).

Alguns autores utilizam tanto variáveis adimensionais quanto dimensionais na montagem do mapa de padrões de escoamento. Um exemplo deste caso está no tradicional modelo proposto por Baker (1954) que pode ser visto na Figura 1.4 a seguir.

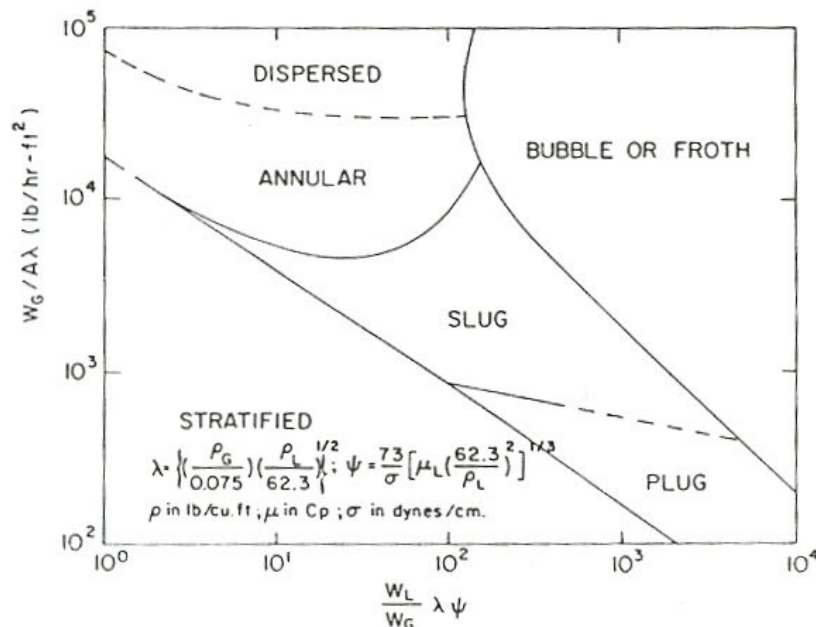


Figura 1.4 – Mapa de padrões de escoamento horizontal proposto por Baker (1954).

Outra forma de construção de mapas de padrão de escoamento consiste no uso de variáveis dimensionais (por exemplo, as velocidades superficiais das fases). Apesar deste tipo de mapa ser limitado aos fluidos utilizados, ao diâmetro da tubulação e à faixa de vazão estudada, é o tipo de abordagem largamente utilizada por conta da sua fácil implementação. Na Figura 1.5 a seguir (Mandhane et al 1974) este tipo de mapa de padrão de escoamento é apresentado, onde as velocidades superficiais das fases foram utilizadas como eixo dos gráficos. No trabalho desenvolvido por Mandhane et al, a construção do mapa de padrão de escoamento baseou-se em um extenso banco de dados (*American Gas Association (AGA) – American Petroleum Institute (API) Data Bank*) e na utilização de 1.178 pontos para sistema água-ar de pequeno diâmetro, na faixa de 1,27 a 5,1cm.

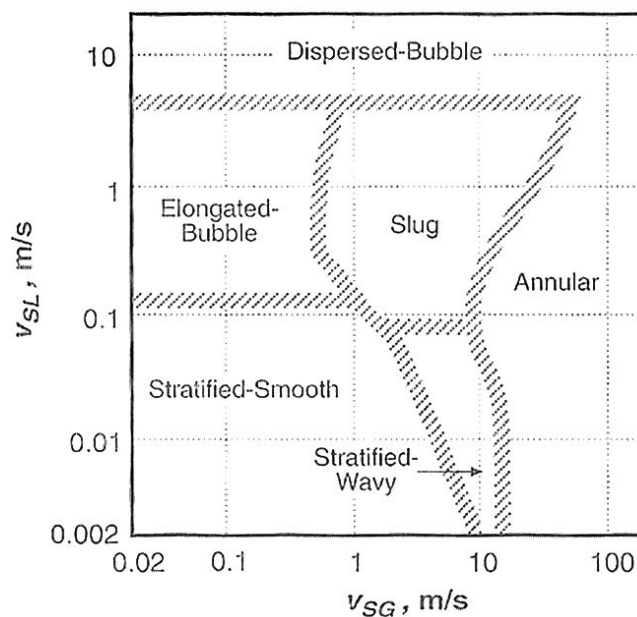


Figura 1.5 - Mapa de padrão de escoamento para escoamento horizontal (Mandhane et al 1974).

Em termos de aplicações na indústria de petróleo, é importante citar que devido à ocorrência de descobertas em águas cada vez mais profundas, as plataformas estão ficando cada vez mais distantes dos poços de petróleo e as linhas de produção estão se tornando cada vez mais longas para possibilitar a ligação do poço à plataforma de petróleo. Assumindo estes longos trajetos, há uma tendência que o escoamento entre as fases óleo, água e gás apresente-se com as diversas configurações mencionadas anteriormente.

Dentre os diversos padrões observados nas figuras anteriores, o padrão de escoamento horizontal intermitente é observado com grande frequência ao longo do escoamento em um sistema típico de produção de petróleo. Por esta razão, o escopo deste trabalho, conforme será discutido mais detalhadamente adiante, irá se concentrar neste padrão de escoamento, variando o grau de inclinação do sistema entre 0 e 5 graus ascendente (horizontal e pouco inclinado).

Para esta configuração horizontal ou pouco inclinada, o escoamento intermitente pode ser gerado a partir do escoamento estratificado através de dois mecanismos: (i) crescimento natural de instabilidades hidrodinâmicas e (ii) acúmulo de líquido devido às ondulações do terreno. No primeiro caso, pequenas perturbações aleatórias crescem naturalmente, podendo gerar ondas na superfície do líquido. O mecanismo responsável por este crescimento é a clássica instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Estas ondas podem continuar a crescer, até que o líquido preencha todo o diâmetro interno da tubulação, formando um “pistão”. Estes pistões podem aumentar de tamanho se a sua

frente viajar mais rápido que sua cauda. Caso contrário, eles podem desaparecer. O escoamento intermitente estável ocorre quando a parte da frente do pistão escoar com a mesma velocidade de sua cauda (Issa & Kempf 2003).

A principal característica desse padrão de escoamento é o fato que os pistões de líquido bem como as bolhas de gás não ocorrem com tamanhos e frequências definidos. Essa irregularidade é oriunda de interações entre bolhas vizinhas e também devido ao seu processo de formação.

1.3.

Determinação experimental dos padrões de escoamento

A determinação experimental dos padrões de escoamento, das regiões de transição entre eles e sua associação aos parâmetros do escoamento é uma tarefa complexa muitas vezes associada a um grau elevado de incerteza experimental. Para várias condições de operação, o escoamento é rápido e caótico, dificultando a interpretação do resultado experimental. As técnicas experimentais normalmente utilizadas na determinação de padrões de escoamento são brevemente descritas a seguir.

- **Observação Visual e Fotográfica** – Nesta técnica busca-se obter imagens do escoamento que são interpretadas visando-se a identificação dos padrões de escoamento predominantes. Para este tipo de técnica, não é possível uma observação clara para altas vazões de líquido e gás, a não ser a partir da utilização de câmeras de alta velocidade. Caso o fluido escoando no interior do tubo seja opaco, pode-se utilizar técnicas de raio-X ou raios gama para identificar as fases. Geralmente, este tipo de observação é associado a níveis elevados de incerteza por ser baseado em avaliação visual, muitas vezes subjetiva.

- **Anemometria por Fio ou Filme Quente** - Outra técnica que pode ser adotada é baseada na utilização de sondas de fio ou filme quente. Nesta técnica, a taxa de dissipação do calor a partir de uma sonda quente, exposta alternadamente ao líquido e ao gás é medida através da variação da resistência elétrica da sonda sentida por uma ponte de medição de resistência. Como os fluidos apresentam propriedades termo-físicas diferentes, podem-se detectar grandes variações na resistência da sonda associando-as à passagem de cada fase do escoamento.

• Sonda de Condutância - Neste tipo de caracterização, sondas muito finas são inseridas no interior da tubulação e a voltagem gerada na ponta destas sondas é medida. A medição da voltagem ao longo do tempo possibilita a interpretação da distribuição das fases (líquido e gás) que passam pelo equipamento. A seguir, na Figura 1.6, é apresentado um exemplo dos resultados experimentais a partir da medição através de sondas para cada padrão de escoamento discutido anteriormente.

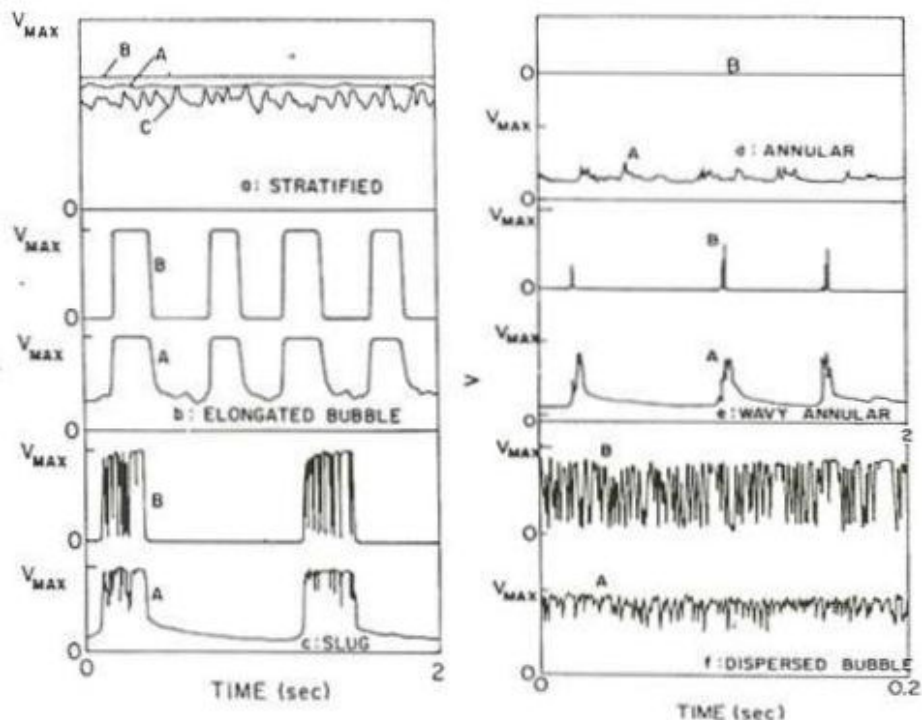


Figura 1.6 – Distribuição da voltagem ao longo do tempo para os diferentes padrões de escoamento no escoamento horizontal bifásico.

Outra metodologia experimental que atualmente vem sendo empregada no escoamento multifásico para determinação do padrão de escoamento consiste na medição da fração de vazios através da utilização de sensores *wire-mesh* (Prasser et al., 1998). O princípio de medição do sensor se baseia na diferença de condutividade elétrica das fases água e ar. O sensor consiste de 2 planos com fios em paralelo, apresentando, cada fio, uma espessura da ordem de *microns*, separados entre si da ordem de milímetros, com um ângulo de 90 graus entre os *grids*. Um esboço pode se visto na Figura 1.7.

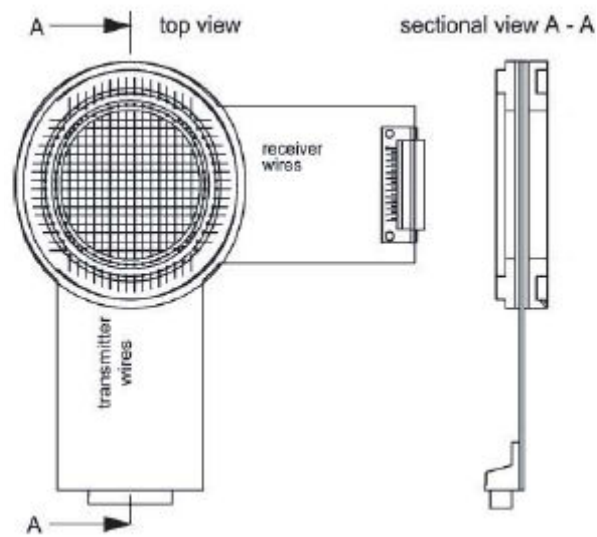
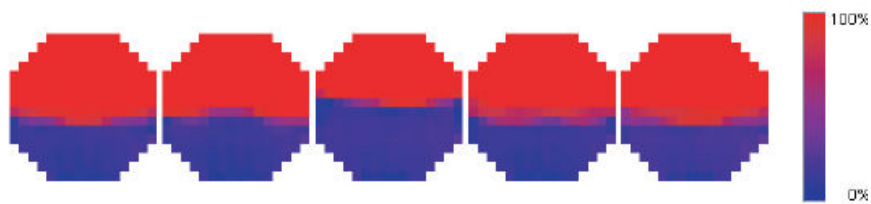


Figura 1.7 – Esboço do sensor *wire-mesh* (Prasser et al 1998).

Um exemplo dos resultados da medição da fração de vazios ao longo do tempo a partir da técnica de *wire mesh* pode ser observado na Figura 1.8. A região de cor azul denota a presença de líquido e a região em vermelho consiste na presença da fase gasosa. A Figura 1.8a representa o escoamento estratificado ondulado. Observa-se a fase gasosa na parte superior do tubo com a região da interface entre as fases variando ao longo do tempo.

Na Figura 1.8b é possível observar a evolução temporal do escoamento de bolhas alongadas. A região do pistão de líquido apresenta-se sem a presença de bolhas de gás dissolvidas. Na Figura 1.8c, com o aumento da vazão da fase gasosa, o pistão de líquido torna-se aerado e este fato pode ser comprovado a partir da utilização desta técnica.



(a) Escoamento estratificado ondulado

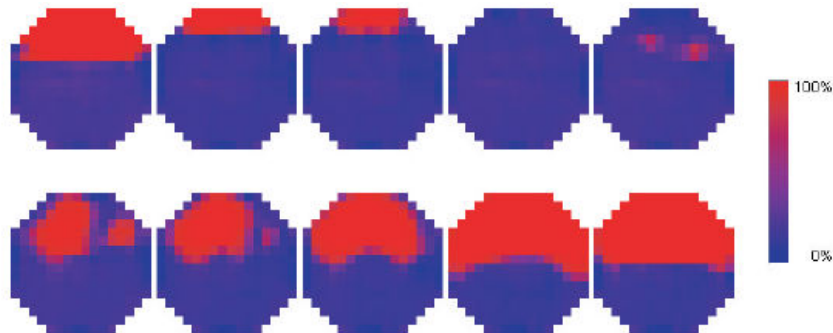
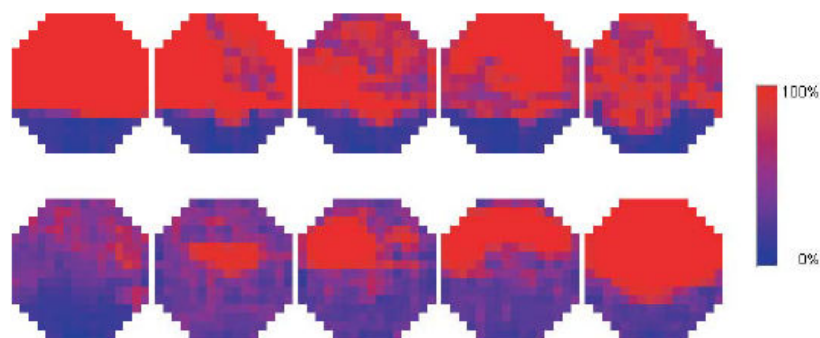
(b) Escoamento de bolhas alongadas (*Plug flow*)(c) Escoamento *Slug* (Pistão aerado)

Figura 1.8 – Variação temporal da fração de vazios a partir da técnica de *wire mesh* na seção transversal do duto.

1.4.

Técnicas de medição específicas aplicadas em escoamento multifásico

Uma referência para métodos experimentais aplicados a escoamentos bifásicos pode ser encontrada na compilação preparada por Hewitt G.F e apresentada em Hetsroni (1982). Neste artigo são mencionadas as técnicas mais utilizadas até aquela data para a medição dos parâmetros de interesse. O autor apresenta uma classificação dos parâmetros de interesse segundo a sua utilização final pelos usuários. São relacionados como parâmetros de interesse

para projetos, a queda de pressão no escoamento, a fração de vazio e a taxa de transferência de calor, no caso de escoamentos bifásicos não isotérmicos. Na lista de parâmetros de interesse para estudos científicos são relacionadas as taxas de escoamento nos filmes de líquido, as taxas de entranhamento de líquido e gás (*entrainment rate*), a tensão cisalhante na parede, as taxas de transferência de massa de líquido para a fase gasosa, a velocidade local das fases e a dimensão de bolhas e gotas. Em seguida, o autor apresenta os métodos disponíveis para a medição destes parâmetros que são classificadas em:

- Métodos ópticos;
- Métodos de espalhamento e absorção de radiação;
- Métodos elétricos baseados em condutância e capacitância;
- Métodos utilizando traçadores;
- Métodos baseados em transferência de calor e massa;
- Métodos baseados na separação das fases do escoamento;
- Métodos utilizando sensores térmicos.

Em particular, para o caso da medição da velocidade locais das fases, o trabalho de revisão de Y. Y. Hsu apresentado também na compilação preparada por Hetsroni (1982) indica que o padrão de escoamento é fator fundamental na escolha da técnica de medição a ser utilizada. Além disto, indica que a escolha da técnica de medição depende da necessidade da medição da velocidade da fase contínua ou da dispersa, ou se acesso óptico ao escoamento é possível.

Três técnicas principais são mencionadas: tubo de Pitot, correlação cruzada de sinais e anemometria Laser-Doppler. No caso do tubo de Pitot, utiliza-se o mesmo instrumento empregado na medição local de velocidade em escoamentos monofásicos, com as devidas correções para a massa específica que é calculada com a hipótese de mistura homogênea de fases. A técnica de correlação cruzada faz uso de sinais transientes obtidos de sondas de temperatura ou fração de vazio, medidos em duas posições distintas com afastamento conhecido. O valor máximo da função de correlação cruzada dos sinais obtidos das duas sondas indica o tempo de trânsito de uma perturbação da grandeza medida, a qual é admitida como possuindo a velocidade do escoamento desejada. De acordo com o autor, a anemometria laser Doppler tradicionalmente utilizada em escoamentos monofásicos necessita de

adaptações para fornecer informações combinadas das fases líquida e gasosa. É sugerido o uso de uma célula fotomultiplicadora para converter o sinal óptico de cada fase.

O progresso observado nas técnicas ópticas desde a publicação do trabalho de compilação de Hetsroni (1982) foi significativo. A disponibilidade de fontes de laser pulsadas de alta energia e de câmeras digitais com resolução espacial e temporal elevadas, aliadas a um aumento exponencial na capacidade de processamento digital de imagens, possibilita a obtenção de medidas instantâneas em áreas extensas de escoamentos. O acesso óptico ao escoamento é uma limitação óbvia destas técnicas, mas que, ainda assim, constituem-se em ferramentas cada vez mais importantes para a investigação detalhada de escoamentos bifásicos. A literatura mostra diversos trabalhos recentes que fazem uso das mais variadas combinações de técnicas que utilizam fontes pulsadas, filtros ópticos, câmeras digitais e processamentos de imagens aplicadas à medição de escoamentos bifásicos (Nogueira et al., 2003; Fujiwara et al., 2004).

1.5. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo geral contribuir para um melhor entendimento dos fenômenos físicos associados ao escoamento horizontal e ligeiramente inclinado ascendente de líquido e gás em padrão intermitente. A contribuição do trabalho se dá na forma de dados experimentais detalhados sobre o campo de velocidade instantâneo da fase líquida na vizinhança das bolhas de gás, assim como informações sobre a forma das bolhas.

Para isso, foi implementada uma técnica experimental óptica avançada baseada na técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas – PIV (do inglês *Particle Image Velocimetry*) utilizada com sucesso em escoamentos monofásicos, porém ainda pouco explorada em escoamentos com mais de uma fase. A adaptação da técnica PIV para escoamento bifásico foi realizada utilizando técnica de Fluorescência Induzida por Laser – LIF (do inglês, *Laser Induced Fluorescence*) para separar opticamente as imagens das fases líquida e gasosa. A correta implementação destas técnicas ópticas não intrusivas é também um dos objetivos principais do presente trabalho.

Outro objetivo complementar do trabalho é o levantamento estatístico de variáveis de interesse para o escoamento intermitente horizontal, como velocidade e comprimento de bolhas gás e pistões de líquido e frequência de passagem destas estruturas. A determinação destas variáveis estatísticas, em conjunto com as informações detalhadas do escoamento instantâneo da fase líquida obtidas na mesma seção de testes é uma contribuição relevante do presente trabalho.

Os dados detalhados disponibilizados como resultados do presente trabalho terão utilidade no aperfeiçoamento da modelagem de escoamentos multifásicos no padrão intermitente.

1.6.

Organização do trabalho

O capítulo 2 apresenta um breve histórico da modelagem do escoamento intermitente, assim como uma descrição dos trabalhos experimentais realizados sobre este assunto.

O capítulo 3 dedica-se a apresentar a metodologia para estimativa da velocidade dos pistões e bolhas e, principalmente, uma descrição das técnicas envolvidas na medição de velocidade por partículas, tanto a velocimetria por imagem de partículas (PIV), quanto da técnica PST (Pulsed Shadow Technique), além do sistema de emissores e receptores de LED's.

No capítulo 4, o aparato experimental é apresentado para posteriormente, no capítulo 5, ser descrito o funcionamento global do sistema. No capítulo 6 serão apresentados os resultados experimentais e, ao final, serão expostas as conclusões do trabalho.