

# 1

## Introdução

Escoamentos envolvendo líquido e gás em tubulações ocorrem com frequência em aplicações de engenharia nas mais diversas áreas. Da indústria nuclear, onde o escoamento gás-líquido ocorre nos geradores de vapor que alimentam os reatores nucleares para a produção de energia, à indústria petrolífera, onde ocorre na produção de hidrocarbonetos nos poços e nas linhas de transporte e processamento, a busca de um entendimento sólido e fundamentado dos mecanismos físicos que regem esta classe de escoamento é muito além de necessária: é indispensável.

No entanto, consolidar tal nível de conhecimento a fim de construir modelos de engenharia que permitam prever o seu comportamento com uma relação adequada entre precisão e simplicidade ainda é um enorme desafio. Boa parte dessa dificuldade provém da geometria que se desenvolve na interface: sob determinadas condições, as fases líquida e gasosa distribuem-se geometricamente de várias formas distintas e intrigantes. A esta configuração topológica dá-se o nome de padrão ou regime de escoamento (*Hewitt, 1982*).

A figura a seguir apresenta de forma ilustrativa alguns dos principais padrões de escoamento gás-líquido para uma configuração horizontal, ocorrendo configurações semelhantes no escoamento vertical e inclinado. Vale ressaltar que no caso horizontal há um fator complicador adicional: a presença da gravidade tende a estratificar as fases, causando uma assimetria axial no escoamento. Um maior detalhamento e discussão a respeito dos diversos padrões de escoamento é encontrado no texto de *Hewitt (1982)*. Aqui, somente uma breve descrição é apresentada:

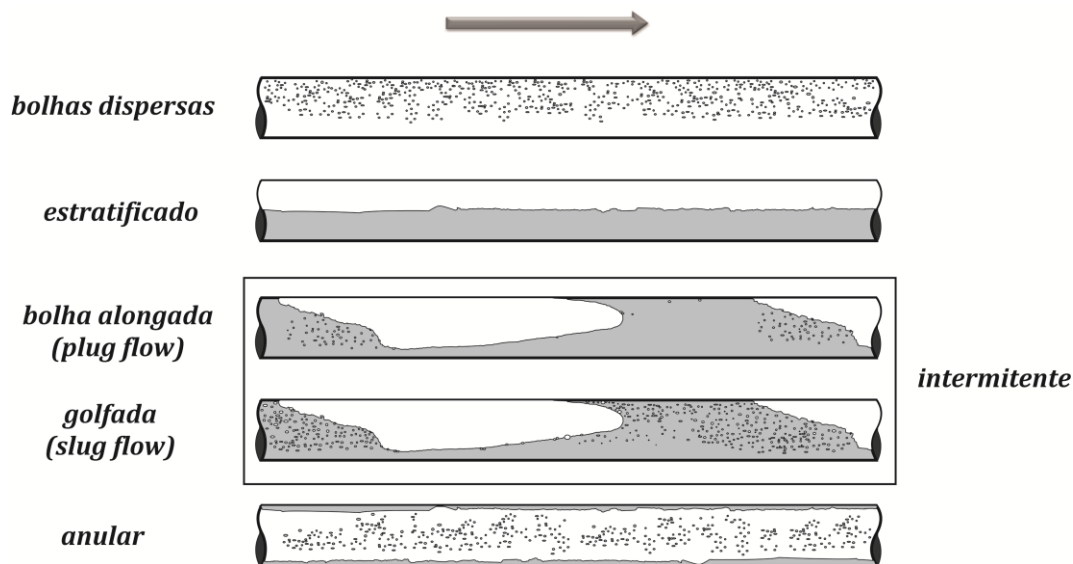


Figura 1.1 – Desenho esquemático de alguns dos principais padrões de escoamento gás-líquido na configuração horizontal onde a fase de cor cinza denota líquido e a branca gás, escoamento da esquerda para a direita. (Baseado em Hewitt, 1982)

- ✓ Padrão bolhas dispersas (*dispersed bubble flow*): as bolhas são dispersas numa fase líquida contínua tendendo a aglomerar-se próximo a parte superior da tubulação; aumentando-se as velocidades das fases, as bolhas distribuem-se mais uniformemente, semelhante ao aspecto de espuma.
- ✓ Padrão estratificado (*stratified flow*): a separação gravitacional é completa, com líquido distribuindo-se ao longo da parte inferior da tubulação e o gás na parte superior; se a velocidade do gás aumenta, ondas formam-se na interface gás-líquido, originando o padrão conhecido como ondulado-estratificado (*stratified-wavy flow* ou *wavy flow*).
- ✓ Padrão intermitente (*intermittent flow*): caracterizado pela alternância no tempo e no espaço de *pistões* ou *golfadas* de líquido e bolhas alongadas de gás, comumente chamadas de bolhas de *Benjamim* no caso horizontal e bolhas de *Taylor* no caso vertical; a vazões relativamente baixas de líquido e principalmente de gás, os pistões de líquido podem apresentar-se praticamente livres de pequenas bolhas dispersas e acompanhados por longas bolhas de *Benjamim*, sendo o escoamento denominado "bolha alongada" (*elongated*

*bubble flow* ou *plug flow*); quando as vazões das fases aumentam, o escoamento então transita para um padrão mais complexo onde os pistões de líquido podem conter grandes quantidades de bolhas dispersas (pistões aerados) com as bolhas de *Benjamim* se afastando do topo da tubulação; este padrão é denominado "golfada" ou *slug flow*. É comum denominar ambos os padrões de intermitente.

✓ Padrão anular (*annular flow*): ocorre para elevadas velocidades de gás; a fase gasosa concentra-se na parte central da tubulação formando um núcleo gasoso, enquanto que a fase líquida escoar em forma de um filme fino, próximo à parede. A interface entre o filme líquido e o núcleo de gás é dinâmica, apresentando um perfil ondulatório. Elevadas velocidades de gás podem “arrancar” pequenas gotículas do filme de líquido, podendo penetrar na fase gasosa e sendo carregadas pelo núcleo. Devido ao efeito da gravidade, a espessura do filme de líquido na parte inferior é maior que no topo, dependendo das vazões relativas de gás e líquido. Para baixas razões de vazão de gás e de líquido, a maior parte do líquido concentra-se na parte inferior da tubulação, enquanto ondas estáveis de líquido cobrem a superfície restante, eventualmente molhando a parte superior da tubulação (*Farias, 2010*).

Uma metodologia para a distinção entre os diversos padrões e por que e quando ocorre a transição de um padrão para o outro ainda é um tema de discussão teórica e experimental em aberto na literatura (*Hewitt, 1982; Ruder e Hanratty, 1990; Hurlburt e Hanratty, 2002; Woods et al., 2006; Schubring, 2010*). Dentre os mecanismos conhecidos que têm notável influência sobre os padrões alguns destacam-se em maior ou menor grau. Como por exemplo, os parâmetros associados a geometria, tais como a inclinação da tubulação, diâmetro, etc; bem como aqueles associados ao escoamento, que são as velocidades das fases e as frações mássicas; existe ainda a influência das propriedades dos fluidos envolvidos (*Barbosa Jr., 2010*). Devido a ampla variação desses parâmetros, a maioria dos dados experimentais são obtidos para fluidos simples como água e ar, em tubulações relativamente pequenas, cujos diâmetros variam tipicamente na faixa de 20 a 50 milímetros. Uma base importante de dados reconhecida na literatura foi proposta no trabalho de *Mandhane, Gregory e Aziz (1974)*, que através de 5935 observações visuais, construíram o mapa de padrões de

escoamento mais citado na literatura para escoamento bifásico água-ar (Hewitt, 1982). A configuração utilizada naquele trabalho foi horizontal. Os padrões foram determinados em função das velocidades superficiais de cada fase, que por sua vez é um parâmetro dimensional de fácil medição e que será definido formalmente no capítulo seguinte. A figura a seguir apresenta uma comparação entre as previsões semi-teóricas para as transições propostas por um modelo de Taitel e Dukler (1976) e as observações experimentais de Mandhane et al. (1974).

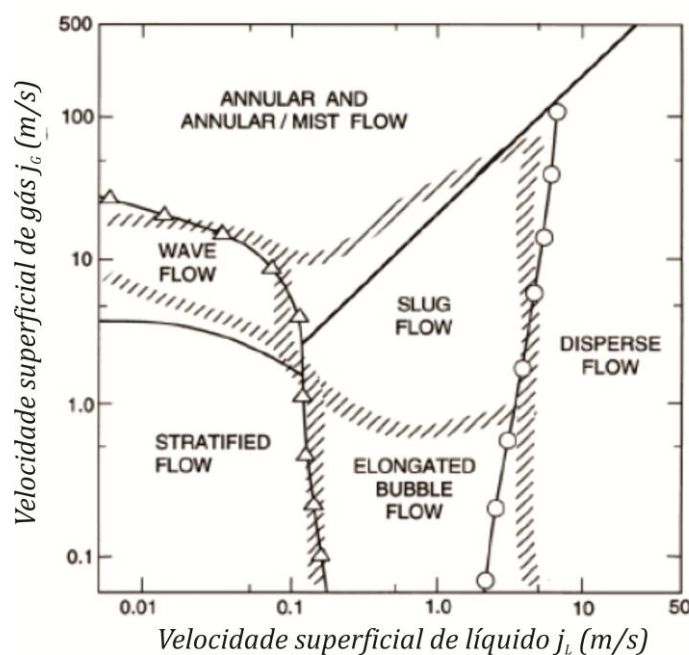


Figura 1.2 – Comparação entre a previsão teórica de Taitel e Dukler (1976) (linhas contínuas) e os experimentos de Mandhane et al. (1974) para uma tubulação horizontal com 25 mm de diâmetro interno (linhas hachuradas) (Adaptado de Taitel e Dukler, 1976).

Dentre os padrões de escoamento discutidos, o padrão intermitente se destaca por ocorrer com frequência em diversas aplicações industriais, sobretudo, na indústria nuclear, química e petrolífera. Especificamente para a indústria do petróleo, este padrão geralmente traz grandes problemas associados às linhas de produção e processamento, onde as fases são separadas e condicionadas. A variação da vazão e pressão causadas por este padrão interfere de maneira crítica no dimensionamento de equipamentos: um exemplo são os separadores, que devem ser projetados ora para lidar com grandes quantidades de gás, ora com

grandes quantidades de líquido. Como consequência, estes equipamentos devem ser projetados com elevado comprimento para que operem de maneira segura. Isso é um problema nas unidades de produção *offshore* onde o espaço é substancialmente reduzido. Outro problema associado à ocorrência do padrão intermitente se deve as vibrações induzidas pela alternância de regiões de pistão de líquido e de bolhas alongadas de ar. As frequências dessas vibrações devem ser cuidadosamente monitoradas para evitar possíveis danos à linha de produção e aos equipamentos envolvidos.

Estes e outros fatores justificam o interesse na elaboração de pesquisas a fim de elucidar os mecanismos físicos que governam o padrão intermitente, objetivando o desenvolvimento de modelos que permitam prever o seu comportamento. Construir tais modelos não é uma tarefa simples e em algum momento restrições devem ser assumidas em detrimento da precisão para que uma resposta rápida possa ser obtida ou estimada.

Este presente trabalho teve como finalidade uma investigação experimental do escoamento intermitente na configuração horizontal, utilizando água e ar como fluidos de trabalho em uma tubulação com 50,8 mm de diâmetro interno. Foi realizada uma extensa análise e validação das medições de parâmetros estatísticos importantes para a caracterização do escoamento intermitente, através de uma ampla comparação com diversos dados disponíveis na literatura. Em sequência, a forma da interface gás-líquido na frente e na traseira da bolha alongada foi investigada, através da utilização de uma técnica óptica não intrusiva em conjunto com procedimentos de processamento de imagens. Os procedimentos desenvolvidos no âmbito desse trabalho permitiram a extração de dados quantitativos acerca das interfaces de uma forma ainda não abordada na literatura.

## **1.1. Organização do trabalho**

Esta dissertação está organizada em *sete* capítulos. No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos disponíveis na literatura, que contribuíram para a elucidação de fatos e dúvidas importantes que surgiram ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

O capítulo 3 descreve as características de toda a montagem experimental, enquanto o capítulo 4 apresenta os procedimentos experimentais adotados para a realização dos ensaios experimentais. Em conjunto, é apresentada a metodologia para a redução da grande quantidade de dados obtidos.

O capítulo 5 dedica-se a descrição detalhada da técnica óptica adotada e dos procedimentos desenvolvidos para o processamento das imagens.

O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos em conjunto com uma extensa comparação com dados disponíveis na literatura.

O capítulo 7 finaliza as discussões desenvolvidas ao longo dessa dissertação, detalhando as conclusões provenientes dos resultados obtidos.