

# 1 Introdução

A expressão *escoamento multifásico* caracteriza escoamento simultâneo de diferentes fluidos, consistindo de mais de uma fase (sólido, líquido ou gás) da mesma substância ou de fluidos diferentes. As diferentes fases podem ser da mesma substância pura, como um líquido e seu vapor, ou de diferentes substâncias, como um líquido e um gás ou dois líquidos ou qualquer combinação de líquido, gás e sólido.

Um número significativo de aplicações envolve escoamentos com mais de uma fase. A ocorrência de escoamentos multifásicos em tubulações verticais, horizontais e inclinadas é muito comum em diversas atividades industriais, entre as quais encontram-se a indústria química, a indústria de geração de energia (nuclear, térmica) e a indústria do petróleo. Conseqüentemente, o estudo de escoamento multifásico constitui uma área de pesquisa que desperta grande interesse em vários ramos da ciência.

As fases de um escoamento multifásico podem se arranjar de diversas formas, dando origem a diferentes configurações de escoamento com características diversas. A Figura 1.1 ilustra possíveis arranjos das fases, i.e., diferentes padrões de escoamento. Para o caso do fluxo horizontal, os padrões encontrados são: estratificado e estratificado ondulado (“*stratified flow*” e “*wavy-stratified flow*”), bolhas alongadas (*Elongated Bubble Flow*), golfadas (“*slug flow*”), anular e anular ondulado (“*annular flow*” e “*wavy-annular flow*”) e bolhas de gás dispersas no líquido (“*dispersed bubble flow*” ou “*bubbly flow*”). Para o fluxo vertical, são encontrados os regimes no padrão bolhas, bolhas dispersas e os padrões intermitentes como golfada e o padrão caótico (“*churn flow*”), assim como o padrão anular.

O escoamento multifásico é um fenômeno cuja análise é mais complexa que a aplicada ao escoamento monofásico e, portanto demanda um esforço maior que no caso monofásico. Os motivos são variados:

- 1- A presença de mais de uma fase no escoamento introduz um número

maior de incógnitas, exigindo um número adicional de equações para a definição dos modelos matemáticos que expressam o fenômeno físico;

2- Geralmente a distribuição espacial das fases não é conhecida "a-priori". A distribuição espacial das fases não deixa de ser um fenômeno de difícil quantificação. Em muitos casos a interface gás-líquido que separa as fases tem forma complicada, além de apresentar movimento aleatório;

3- Adicionalmente, ocorrem mudanças de padrões de escoamento que dependem de características físicas e operacionais do sistema. Estes padrões (algumas vezes também denominados de "regimes do escoamento bifásico") influenciam os fenômenos de transferência interfacial, isto é, os processos de transferência de massa, de quantidade de movimento e energia entre as fases;

4- Finalmente, na medida em que há grande influência do escoamento de cada uma das fases no escoamento da outra, a realidade mostra que as variáveis locais (referentes a uma posição espacial) de cada fase, como a velocidade, a pressão, etc., podem flutuar no tempo com amplitude considerável. Conseqüentemente, definir, calcular ou mesmo medir o valor médio de uma variável requer procedimentos em geral mais complexos que aqueles aplicados às variáveis de escoamentos monofásicos.

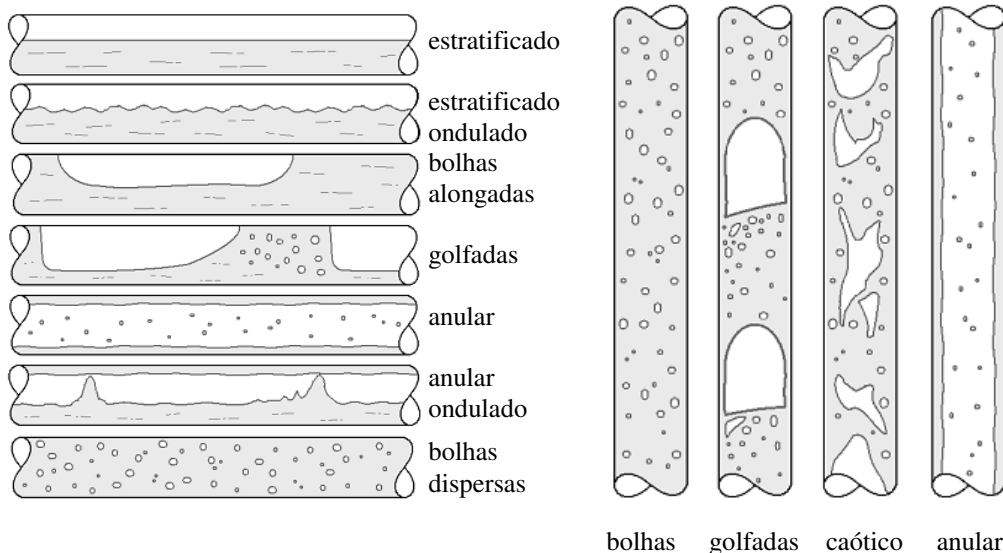


Figura 1.1 – Padrões de escoamento para os fluxos horizontal e vertical.

Na produção de petróleo, a previsão de escoamentos multifásicos em tubulações desde seu processamento, passando pela produção e transporte é muito importante devido ao constante incremento na demanda por hidrocarbonetos

fósseis. Como ilustrado na Fig. 1.2, o fluxo pode ocorrer em trechos verticais, inclinados ou horizontais e com qualquer ângulo de inclinação. Durante o percurso, não só ocorrem mudanças na topografia, que influenciam no arranjo das fases, mas ocorre queda de pressão e correspondente desprendimento de gás dissolvido no óleo líquido, o que leva a uma multiplicidade de arranjos ao longo do trajeto.

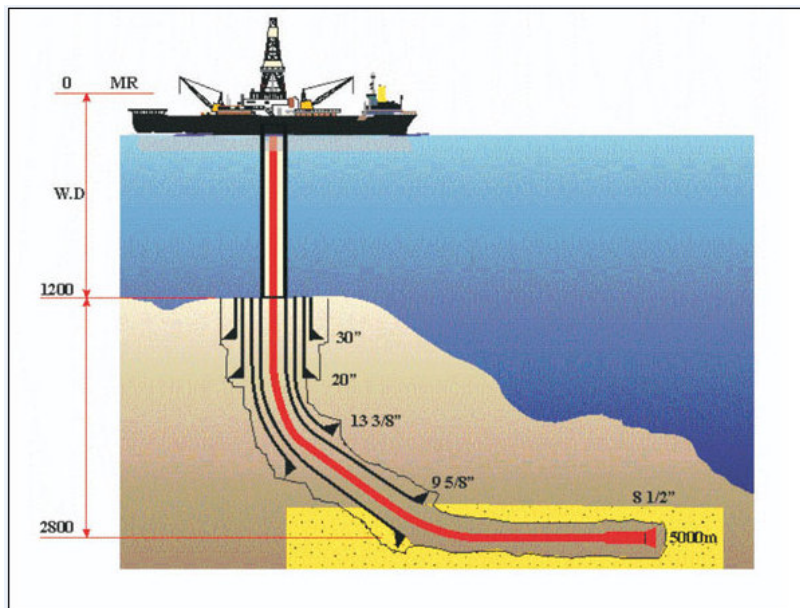


Figura 1.2– Sistema de produção de óleo na indústria do Petróleo.

Nos últimos anos, muitos estudos se dedicaram ao escoamento bifásico em tubulações, principalmente na indústria de petróleo. A complexidade do tema está associada à existência de arranjos diferenciados das fases presentes e como consequência, a necessidade de modelagens diferenciadas para os fenômenos de transferência interfacial dependendo do padrão de escoamento. Inúmeros estudos têm sido realizados ao longo dos anos para mapear os regimes possíveis de acordo com as propriedades dos fluidos, geometria do escoamento e condições de operação.

Entre os diversos regimes de escoamento bifásico, o padrão de golfadas se destaca por ser um dos que requer maior esforço em sua caracterização e modelagem, devido às características marcantes da distribuição espacial entre fases, que gera intermitência ao escoamento. Este escoamento ocorre em larga faixa de vazões de gás e líquido em tubulações de diâmetro médio e pequeno, com variação periódica da densidade, fração de vazio e pressões na seção transversal da tubulação.

## 1.1 Regime de Golfadas

O escoamento no regime de golfadas é intermitente, possuindo uma natureza estocástica, pois a distribuição espacial das fases induz a intermitência local em uma seção transversal da tubulação a qual leva à variação temporal dos parâmetros de escoamento. Com muita frequência uma descrição física simplificada é realizada em termos dos valores médios do comprimento, velocidade e frequência das golfadas. Há, contudo, casos em que informações sobre os valores médios não são suficientes, sendo importante conhecer dados sobre a distribuição das variáveis e o máximo valor possível alcançado. O valor máximo do comprimento da golfadas de líquido, por exemplo, é uma informação essencial no projeto de separadores gás-líquido (Taitel. 1994).

Este padrão de escoamento é formado por uma sucessão de golfadas de líquidos separadas por bolhas de gás escoando sobre um filme líquido. Esta seqüência representa a configuração básica do escoamento intermitente. A unidade básica da golfada, consiste de uma região de golfada líquida de comprimento  $L_s$  e de uma região de filme líquido de comprimento  $L_f$ . A golfada unitária possui comprimento  $L = L_s + L_f$ . A frente da golfada líquida tem uma velocidade  $U_T$  enquanto que a cauda desta (ou nariz da bolha) possui velocidade  $U_B$ , como mostrado na Fig. 1.3. A região onde se concentra uma mistura de gás e líquido possui uma velocidade  $U_M$ , que é igual à soma da velocidade superficial do gás,  $U_{SG}$ , com a do líquido,  $U_{SL}$ .

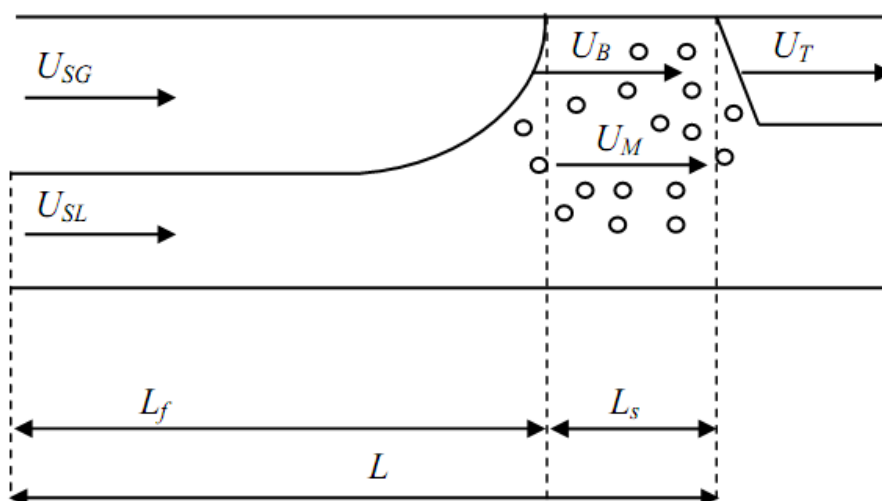


Figura 1.3 – Unidade básica de uma golfada.

Em tubulações horizontais o escoamento no padrão de golfada pode ocorrer a partir do regime de escoamento estratificado, devido ao aumento da vazão de líquido ou do gás. Instabilidades geram ondulações na interface entre as fases, podendo gerar as ondas que passam a ocupar, em alguns casos, toda a seção transversal da tubulação, formando golfadas que são rapidamente deslocadas dentro da tubulação. Golfadas de líquido carreando pequenas bolhas dispersas e grandes bolhas de gás se sucedem na tubulação. O regime de golfadas, em escoamento vertical, é normalmente simétrico em relação à linha de centro da tubulação. Aumentando a vazão da fase gasosa, as bolhas pequenas iniciais tendem a se aglomerar e o diâmetro desta nova bolha atinge dimensão similar ao da tubulação. Quando isto ocorre, formam-se bolhas grandes, denominadas bolhas de Taylor. Entre as bolhas de Taylor e a parede da tubulação uma fina camada de líquido escoar para baixo. Fig. 1.4.

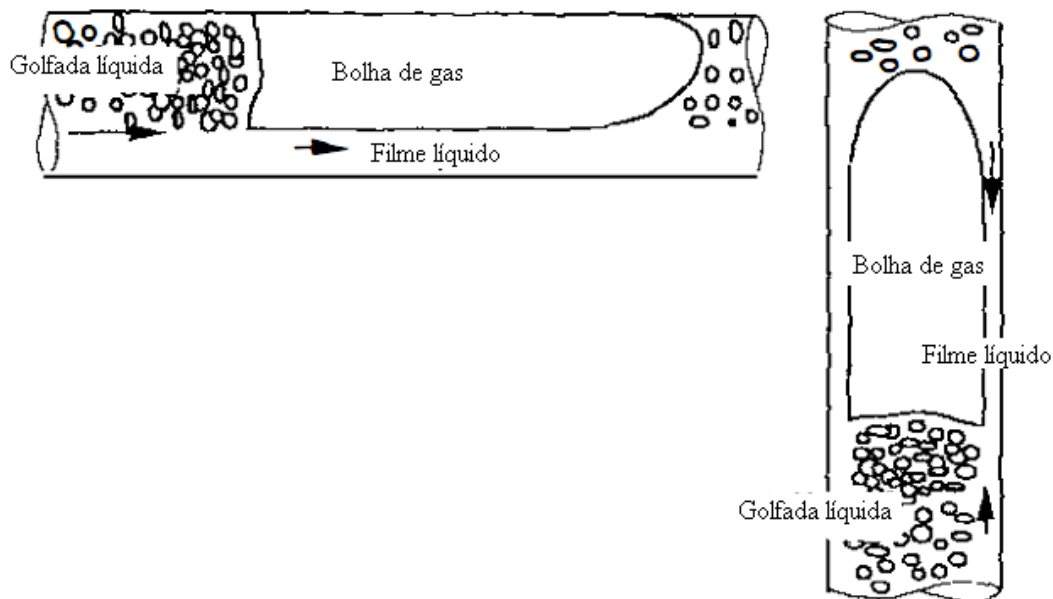


Figura 1.4 – Escoamento em golfada em tubulação horizontal e vertical.

Em tubulações inclinadas o padrão de escoamento em golfadas pode se formar devido ao retardo e à subsequente acumulação de líquido nos declives, levando ao bloqueio da seção transversal com líquido, Fig. 1.5. Um cenário em que isto pode ocorrer de forma crítica surge em poços cuja inclinação da linha de produção é descendente, associado ainda à presença do regime estratificado de escoamento. Nesta situação, pode haver um bloqueio da passagem do gás devido ao acúmulo de líquido na base do *riser*. No entanto, gás continua a ser produzido

pelo poço, ocasionando um aumento de pressão a montante do bloqueio, até o ponto em que há o deslocamento da golfada de líquido, este fenômeno é comumente chamado de “golfada severa”.

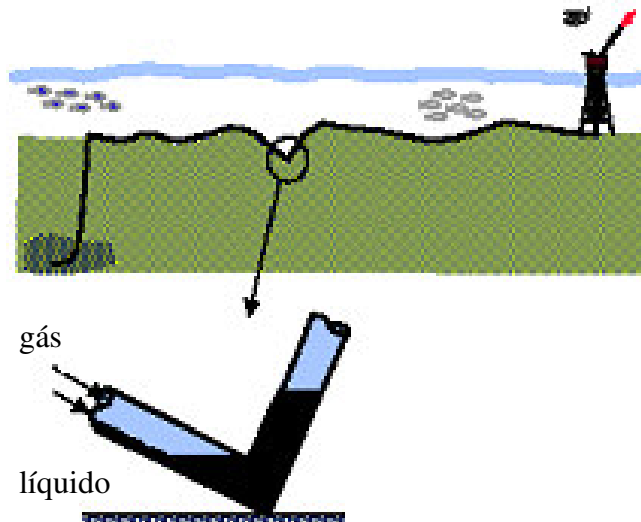


Figura 1.5 – Formação de golfada em tubulação inclinada.

## 1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho consiste na análise das estatísticas do escoamento no padrão de golfadas para o regime estatisticamente permanente. O trabalho envolve a modelagem e simulação de escoamentos bifásicos em tubulações horizontais utilizando o Modelo de Dois Fluidos, com a caracterização das golfadas de acordo com comprimento, frequência e velocidade de translação.

O código utilizado na presente dissertação foi desenvolvido pelo grupo de Dinâmica dos Fluidos Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio (Ortega, 2004 e Carneiro, 2006) e vem sendo continuamente aprimorado.

Os resultados das simulações são comparados com dados experimentais disponíveis na literatura e dados obtidos no Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

### **1.3 Organização do Trabalho**

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura disponível relativa ao escoamento multifásico, estudos teóricos e experimentais para conhecer os padrões de escoamento, sua formação e transições. Ênfase é dada aos estudos experimentais e numéricos do padrão de golfada.

O Capítulo 3 apresenta a descrição matemática do Modelo de Dois Fluidos e as relações de fechamento necessárias à solução de suas equações. O detalhamento das técnicas numéricas aplicadas na discretização das equações através do método dos volumes finitos, assim como o procedimento de solução utilizado, é apresentado no Capítulo 4.

O Capítulo 5 é dedicado à apresentação dos resultados das simulações realizadas para o caso horizontal, sua análise e comparação com os dados experimentais obtidos no laboratório de Mecânica dos Fluidos da PUC e com dados da literatura. Finalmente o Capítulo 6 possui como conteúdo as conclusões e recomendações sobre o tema.