

1 Introdução

Escoamentos multifásicos ocorrem quando uma mistura de duas ou mais fases (sólido, líquido ou gás), as quais não se encontram totalmente diluídas, escoam simultaneamente numa dada geometria.

Na indústria do petróleo, a produção de óleo e gás natural envolve o transporte de fluidos (provenientes do reservatório) nas fases líquida (óleo e água) e gasosa – eventualmente com grãos de areia dispersos – até a unidade de processamento onde será realizada a separação das fases (Fig. 1.1). Nos últimos anos, as operações de produção *offshore* vêm se expandindo para profundidades cada vez maiores, tornando os custos associados ainda mais altos e fazendo-se imprescindíveis estudos detalhados de viabilização e otimização dos equipamentos e processos relacionados. Convém ressaltar que, no Brasil, cerca de 85% da produção de óleo bruto advém de campos de petróleo *offshore*, situados em sua maioria na Bacia de Campos, no Rio de Janeiro.



Figura 1.1– Plataforma semi-submersível situada na Bacia de Campos.

A importância da previsão de escoamentos multifásicos em tubulações de petróleo é notável e ao mesmo tempo uma tarefa extremamente complicada, especialmente devido à complexa interação entre as diversas fases escoando. A descrição rigorosa do fenômeno demanda esforços tão grandes para a solução dos

modelos matemáticos, que alternativas respeitando um compromisso entre acurácia e rapidez são normalmente procuradas.

Neste contexto, de forma a compreender os mecanismos fundamentais governantes, muitas vezes é suficiente considerar apenas duas fases escoando; i.e., apenas líquido e gás. Convém ressaltar, no entanto, que em situações onde há uma “produção” simultânea de água, por exemplo, óleo e água não constituirão uma mesma fase líquida na mistura. Neste caso, esta simplificação não se justificaria.

As fases podem se arranjar em diversas configurações na tubulação, as quais influenciarão diretamente as características do escoamento associado. 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. Esquemas contendo o arranjo das fases em cada padrão de escoamento existente são mostrados na Fig. 1.2. No caso do fluxo horizontal, os padrões encontrados são: bolhas de gás dispersas no líquido (“*dispersed bubble flow*” ou “*bubbly flow*”), bolhas alongadas (“*elongated bubble flow*”), estratificado e estratificado ondulado (“*stratified flow*” e “*wavy-stratified flow*”), golfadas (“*slug flow*”), e anular (“*annular flow*”). Para o fluxo vertical, há ainda o padrão caótico (“*churn flow*”), mas não ocorre o regime estratificado.

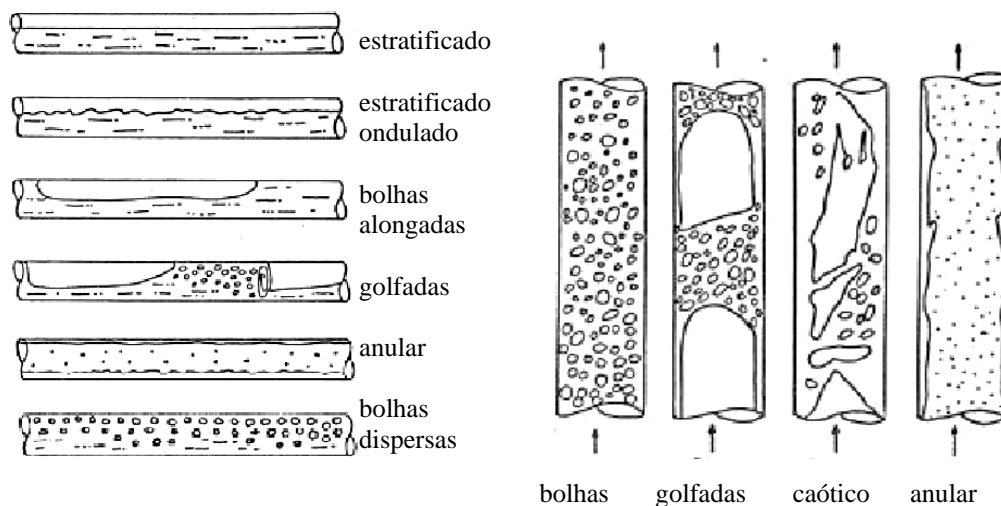


Figura 1.2 – Diagramas esquemáticos dos padrões de escoamento para os fluxos horizontal e vertical.

Dentre os diversos padrões de escoamento bifásico possíveis, o escoamento em regime de golfadas se destaca por ser encontrado em diversas aplicações de

engenharia, como por exemplo o transporte de hidrocarbonetos em tubulações e o escoamento de líquido-vapor em usinas de geração de energia. Além de ser bastante comum, ocorrendo para uma grande variedade de condições, altas perdas de carga estão normalmente associadas a este regime. Ainda, ele possui um caráter intermitente, o qual lhe confere altíssima complexidade.

O regime de golfadas caracteriza-se pelo escoamento de pacotes de líquido separados por grandes bolhas de gás na tubulação (Fig. 1.3). O que determina se a golfada está livre (regime de bolhas alongadas) ou não de pequenas bolhas de gás dispersas ao longo de seu corpo é um balanço entre as forças turbulentas, que tendem a quebrar as bolhas maiores, e as forças de empuxo e tensão superficial, as quais controlam a aglomeração e coalescência destas pequenas bolhas (Barnea e Brauner, 1985).

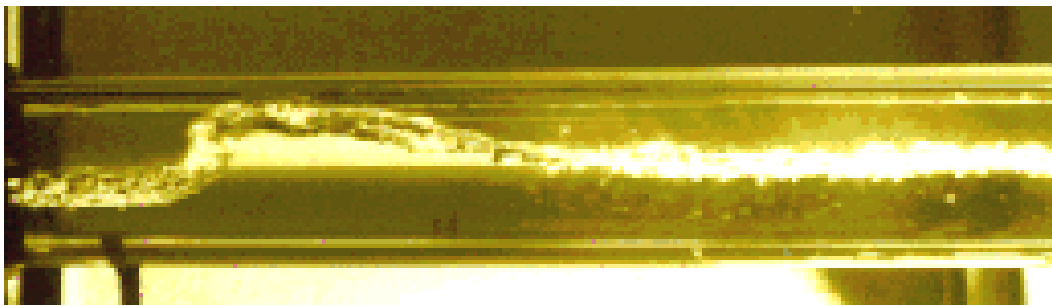


Figura 1.3 – Ilustração do regime de golfada.

O desenvolvimento do regime de golfadas se dá a partir do escoamento estratificado em decorrência de dois fatores: do crescimento natural de pequenas perturbações presentes no escoamento (por um mecanismo de instabilidade de *Kelvin-Helmholtz*, Fig. 1.4a) ou devido à acumulação de líquido causada por mudanças de inclinação no perfil do duto (Fig. 1.4b). Conforme mencionado anteriormente, o regime estratificado não ocorre em tubulações verticais. Neste caso, o regime de golfadas se estabelece como resultado da coalescência das bolhas de gás (Taitel e Dukler, 1976).

Sob o ponto de vista da operabilidade das plantas de processamento de óleo e gás, a intermitência na produção pode ser um fator bastante problemático. 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 do gás

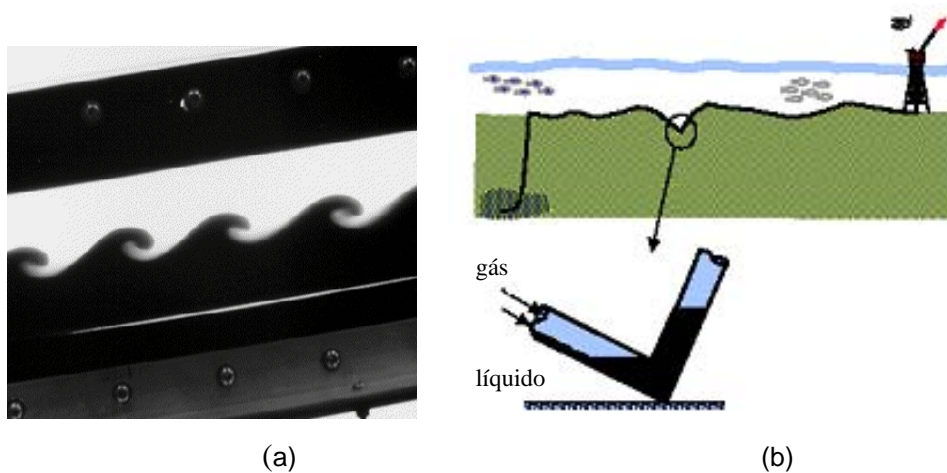


Figura 1.4 – Mecanismos de formação de golfadas: (a) instabilidades de *Kelvin-Helmholtz*; (b) acumulação de líquido devido à mudança de inclinação.

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 (Fig. 1.5). Este fenômeno é comumente chamado de “golfada severa”. Quando esta situação ocorre, variações cíclicas nas vazões de líquido e gás serão observadas pelo separador, podendo ser consideravelmente maiores do que a vazão média para a qual ele está projetado. O processamento destas golfadas pode ser extremamente complicado se o volume de líquido recebido for muito grande. Isto pode levar à necessidade da adição de um outro equipamento denominado “*slug catcher*”, de modo a evitar a inundação do separador e prevenir a entrada de líquido na corrente gasosa, extremamente prejudicial ao compressor para onde o gás estará sendo transportado. Assim, o comprimento das golfadas é um parâmetro crítico de projeto do sistema de separação. Por outro lado, mesmo as golfadas de comprimentos menores, se ocorrerem em frequências suficientemente altas podem causar o mesmo problema ao sistema.

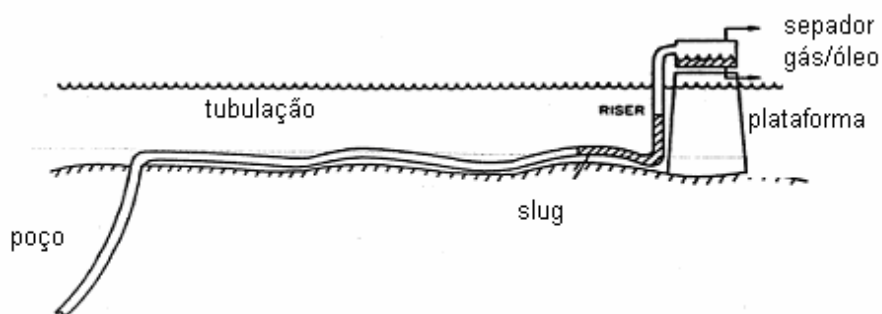


Figura 1.5 – Longa golfada de líquido viajando através do *riser* : golfada severa.

Além disso, as golfadas de líquido viajam a velocidades razoavelmente altas. Portanto, longas golfadas carregam considerável quantidade de movimento. Em trechos de curvatura acentuada, é possível que surjam forças de reação anormalmente altas, devendo sua consideração ser importante no projeto mecânico do sistema (Bonizzi, 2003).

Convém comentar que, obviamente, apesar de ser intrinsecamente transiente, uma vez que é caracterizado pela alternância de bolhas de gás e pacotes de líquido na tubulação, freqüentemente se classifica o regime de golfadas em permanente ou transiente. Está-se, de fato, referindo às características médias dos parâmetros das golfadas, as quais oscilam em torno de um valor constante. É de crucial importância que se consiga prever não só o surgimento das golfadas em tubulações, mas também o desenvolvimento deste regime “estatisticamente permanente” e as suas principais características, como comprimento, freqüência e velocidade média golfadas.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho consiste na modelagem e simulação de escoamentos bifásicos em tubulações horizontais e levemente inclinadas utilizando o modelo de dois fluidos, com a caracterização das golfadas de acordo com comprimento, freqüência e velocidade de translação, para o regime estatisticamente permanente.

Para alcançar este objetivo, utilizou-se como primeiro passo a implementação de um código computacional baseado no Modelo de Dois Fluidos, tomando como ponto de partida as rotinas desenvolvidas no trabalho de Ortega Malca (2004). Neste trabalho, a captura da transição estratificado-golfadas foi obtida com êxito, no entanto o regime estatisticamente permanente não foi determinado. No presente trabalho, rotinas para o cálculo dos parâmetros estatísticos das golfadas foram implementadas e a metodologia foi validada através de comparações com as simulações realizadas por Issa e Kempf (2003) e Bonizzi (2003), que também utilizaram o Modelo de Dois Fluidos, assim como através de comparações com correlações experimentais obtidas da literatura. Adicionalmente, como ferramenta de auxílio às simulações, desenvolveu-se um

programa para determinar os mapas de padrões de escoamento em tubulações horizontais e levemente inclinadas, baseado em estudos anteriores da literatura (Taitel e Dukler, 1976; Barnea e Taitel, 1994).

A implementação de uma relação de fechamento para relacionar as pressões de líquido e gás na interface foi realizada com o intuito de verificar se a introdução de um salto de pressão na interface (devido à tensão superficial) pode aumentar a região para a qual o Modelo de Dois Fluidos é bem-posto.

Finalmente, alguns casos em que a tubulação apresenta uma leve inclinação com relação à posição horizontal são aqui analisados e comparados com resultados do estudo experimental realizado por Al Safran et al. (2005).

1.2

Organização do Trabalho

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura disponível relativa à simulação do escoamento bifásico em dutos no regime de golfadas. A importância do conhecimento dos mapas de padrões de escoamento é destacada. Além disso, as diversas metodologias que utilizam o Modelo de Dois Fluidos são discutidas.

No Capítulo 3, encontra-se matematicamente descrito o 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 inteiramente dedicado à análise da hiperbolicidade do modelo de dois fluidos. Uma análise teórica é realizada à cerca do caráter matemático das equações e a influência do salto de pressão na interface é discutida.

Os resultados das simulações realizadas são apresentados no Capítulo 6. A influência do *hold-up* de líquido inicial é primeiramente avaliada. Em seguida, os testes para o caso horizontal, sem e com o salto de pressão na interface são mostrados. Por último, uma comparação dos casos para tubulações levemente inclinadas com um estudo experimental da literatura é apresentada.