

2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão sobre escoamentos bifásicos, em particular do escoamento no padrão intermitente. Inicialmente apresenta-se uma revisão de estudos teóricos e experimentais. A seguir, ênfase é dada na apresentação de estudos numéricos.

2.1

Escoamento Intermitente

Diversos trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de compreender em detalhes os mecanismos de geração de instabilidades e as transições entre os diversos regimes. Atribui-se ao trabalho pioneiro de Baker (1954) o primeiro mapa de padrões de escoamento, aonde os dados experimentais foram agrupados de forma a categorizar os diversos arranjos das fases observados experimentalmente. Posteriormente, Taitel e Dukler (1976) foram os primeiros a racionalizar critérios de transição entre os diversos regimes de escoamento em tubulações horizontais e levemente inclinadas em termos de modelos teóricos. Barnea (1987) estendeu a metodologia para tubulações com quaisquer ângulos de inclinação. Nota-se que os mapas clássicos utilizados em função das vazões volumétricas das fases não são adimensionais, não podendo ser portanto generalizados para outras geometrias e condições de operação.

Os primeiros modelos para estudos sobre escoamento intermitente bifásico em canais fechados visando conhecer as características deste tipo de escoamento tais como a velocidade de deslocamento, o tamanho do pistão de líquido, a frequência, entre outras características foram apresentados por Wallis (1969), utilizando o conceito de célula unitária (chamados *Unit Cell Models*). Dukler e Hubbard (1975) realizaram estudos experimentais e desenvolveram um modelo mecanicista para avaliar o escoamento no padrão intermitente em tubulações horizontais.

Bendiksen (1985) realizou um estudo a respeito da velocidade de propagação de bolhas alongadas em um meio líquido escoando em tubulações de diferentes inclinações. A correlação obtida experimentalmente naquele

trabalho ainda é largamente utilizada para a velocidade de propagação das bolhas no regime de golfadas.

Visando compreender como o fenômeno do escoamento intermitente ocorre, Mao e Dukler (1991) apresentaram um estudo experimental sobre o deslocamento do líquido ao redor da bolha alongada. Diversos parâmetros do escoamento na vertical foram medidos, como as velocidades e comprimentos de bolha e pistões, frações de vazio e as tensões cisalhantes na parede.

Nicklin *et al.* (1962) propuseram uma correlação para descrever o comportamento da velocidade de translação da bolha inserida em um meio líquido escoando verticalmente. De acordo com esta correlação, a velocidade com a qual a bolha se propaga é função da velocidade da mistura das fases, do parâmetro de distribuição e da velocidade de deslizamento.

Correlações para frequência média no padrão intermitente em tubos horizontais foram propostas por diversos autores (Gregory e Scott, 1969; Heywood e Richardson, 1979; Tronconi, 1990). Para tubos verticais, pode-se citar os trabalhos de Zabaras (2000), Sakaguchi *et al.* (2001) e Kaji *et al.* (2009); em particular, a correlação de Kaji *et al.* (2009) permite também avaliar a evolução da frequência ao longo da tubulação. Al-Safran (2009) realizou uma revisão das diversas correlações disponíveis na literatura para a frequência das golfadas e uma nova correlação foi proposta. Um grande espalhamento foi observado para as diversas correlações existentes na literatura.

Um parâmetro importante no escoamento intermitente é o comportamento da pressão. Tutu (1982) apresentou um estudo sobre a variação da pressão no escoamento bifásico e propôs a sua utilização para detectar a ocorrência do regime de golfadas em tubulações. Pinto e Campos (1996) mediram a variação temporal da pressão utilizando um medidor de pressão diferencial em uma posição do tubo no escoamento vertical.

A perda de carga durante o escoamento em golfadas também é de extrema importância para as diversas aplicações industriais. Taitel e Barnea (1990a) apresentaram um modelo para o escoamento intermitente horizontal assumindo que a variação de pressão ao longo do pistão de líquido e da bolha pode ser calculada a partir de um balanço global entre as forças gravitacionais e de atrito. A geometria da bolha é calculada através de uma equação para a variação do filme de líquido. Cook e Behnia (2000) estenderam o modelo proposto, considerando também as perdas de carga devido à região de mistura na cauda da bolha e à expansão do gás. Além disso, a presença de bolhas

dispersas no pistão de líquido é levada em consideração, relaxando a hipótese usualmente utilizada de escoamento homogêneo.

Fernandes *et al.* (1983) realizaram um estudo de escoamento intermitente na vertical. O trabalho segue a linha proposta por Dukler e Hubbard (1975), porém inclui algumas características importantes do escoamento vertical. Os autores também propõem um conjunto de equações para solução do escoamento, porém são necessárias equações de fechamento. Taitel e Barnea (1990b) apresentaram um modelo para escoamento intermitente geral (horizontal, vertical e inclinado). Os autores propuseram três modelos para levar em consideração o formato da bolha alongada. No entanto, as equações necessitam de relações de fechamento, com uma forte dependência das correlações de fechamento para essas modelagens.

A determinação de golfadas induzidas por irregularidades do terreno (Golfadas Severas), é muito importante para o projeto e operação de tubulações, pois são caracterizadas pela presença de pistões de líquido de grandes dimensões (Taitel *et al.*, 1990, Al-Safran *et al.*, 2005 e Nemoto e Baliño, 2012). As golfadas se formam pelo acúmulo de líquido no ponto inferior das tubulações, levando a obstrução da seção transversal, o que induz um aumento de pressão, até o limite em que o gás exerce força suficiente para deslocar o líquido acumulado, formando uma grande golfada.

Nydal *et al.* (1992) estudaram as estatísticas dos pistões em tubulações horizontais. Naquele trabalho, os autores verificaram que, após determinado trecho de entrada, as golfadas atingem comprimentos estáveis, embora a velocidade de translação da bolha seja praticamente constante ao longo da tubulação. Os autores também observaram que o comprimento do pistão de líquido e a fração de gás da golfada possuem distribuição log-normal, ao passo que a velocidade da bolha apresenta distribuição normal.

Um estudo da distribuição do comprimento da golfada ao longo da tubulação foi realizado por Barnea e Taitel (1993), que obtiveram resultados em concordância com Nydal *et al.* (1992). Segundo os autores, golfadas de pequenas dimensões se formam no início da tubulação, e estas eventualmente desaparecem ao escoar pelo duto. Novamente, observou-se que a partir de um determinado comprimento, as golfadas se estabilizam.

Cook e Behnia (2000) propuseram uma relação entre as velocidades de translação da frente e da cauda no padrão intermitente, a qual depende apenas do comprimento adimensional da mesma. De acordo com esta relação, a

diferença entre a velocidade da cauda e da frente para os comprimento de 5 vezes o diâmetro é igual a 5%.

Zhang e Sarica (2006) desenvolveram um modelo mecanicista aplicável a diversos padrões de escoamento e a diferentes inclinações da tubulação. O modelo foi validado com dados experimentais de escoamentos bifásicos com óleo morto e gás natural em tubulações horizontais e verticais ascendentes.

Van Hout *et al.* (2001) realizaram estudos experimentais em tubulações verticais com diferentes diâmetros. Foi observado que a distribuição do comprimento do pistão também pode ser modelada por distribuições gama, ou inversa gaussiana, além da distribuição *log-normal*. Também observou-se que a velocidade superficial do gás aumenta ao longo do duto com a expansão do gás, o que foi levado em conta na comparação de medidas para a velocidade de propagação da bolha com típicas correlações da literatura.

Estudos experimentais foram conduzidos por Wang *et al.* (2007), utilizando ar-água em uma tubulação horizontal. Os autores confrontaram as principais correlações disponíveis na literatura para as características físicas das golfadas, e propuseram correções.

Mayor *et al.* (2008) realizaram estudos experimentais para analisarem a hidrodinâmica das características do escoamento intermitente vertical em regime turbulento. Os autores propuseram uma correlação simples para determinar a interação entre duas bolhas de gás, relacionando a velocidade da bolha na cauda do pistão com a que está a frente da bolha. A correlação proposta considera que esta interação é independente do diâmetro do duto, do ângulo do duto, das velocidades superficiais do líquido e do gás e do comprimento da bolha.

Mazza *et al.* (2010) analisaram diferentes modelos para avaliar o filme de líquido do escoamento intermitente, em tubulações horizontais e levemente inclinadas. Uma análise comparativa é realizada ressaltando as diferenças das formulações e influência nas grandezas características das golfadas. Comparações com experimentos foram realizadas para identificar a capacidade de previsão das grandezas estatísticas com a utilização adequada dos termos de fechamento.

Fonseca (2009) e Oliveira (2012) analisaram experimentalmente o escoamento intermitente horizontal e além das grandezas estatísticas, apresentaram uma análise detalhada do formato da bolha de Taylor e mediram com PIV os perfis de velocidade no filme líquido e na golfada.

As análises acima auxiliam no entendimento fundamental acerca de diversos aspectos importantes envolvidos no escoamento intermitente como a queda de pressão, além das características das golfadas como frequência, velocidade de translação e comprimento. Estes parâmetros são bastante importantes, pois servem de base para a correta modelagem do fenômeno. Os estudos a seguir dizem respeito à estratégias de simulação numérica do escoamento intermitente.

2.2

Simulação Numérica do Escoamento Intermitente

Duas grandes classes de modelagem podem ser encontradas na literatura (Prosperetti e Tryggvason, 2009). Na primeira, o escoamento é determinado através de uma formulação de “um fluido”, onde um único conjunto de equações é utilizado para simular o escoamento. Em geral, estes modelos necessitam de alguma função indicadora para determinar a região ocupada por cada fluido. Nesta classe encontram-se os modelos de *Volume of Fluid (VOF)*, *Level-Set*, *Embedded Mesh*, etc. Na outra classe, equações médias temporais de conservação são resolvidas. Como em um determinado instante de tempo só uma fase pode existir em uma determinada coordenada, nesta classe, analisa-se equações de conservação para cada fase. No presente trabalho, para analisar o escoamento unidimensional ao longo de tubulações, esta segunda classe foi selecionada.

Taha e Cui (2006) realizaram simulações no regime intermitente em uma tubulação vertical, usando o modelo VOF em um domínio computacional bidimensional simétrico e outro tridimensional. Ambos os domínios foram definidos longos o suficiente para se obter uma bolha de Taylor parada, com uma velocidade na parede igual à velocidade teórica da bolha, de forma a conseguir que esta não se deslocasse e assim diminuir a malha computacional.

Febres (2009) analisou uma golfada unitária em um tubulação horizontal utilizando uma formulação tridimensional juntamente com o modelo VOF. Bons resultados para a forma da bolha e perfil de velocidade no filme líquido e no pistão foram obtidos quando comparados com as medidas experimentais de Fonseca (2009).

Dentro da modelagem de equações médias, para analisar escoamentos bifásicos existem três principais abordagens (Rosa, 2012): (i) Modelo Homogêneo sem Escorregamento; (ii) Modelo de Escorregamento (*Drift-Flux*

Model) (Zuber e Findlay, 1965) e (iii) Modelo de Dois Fluidos (Ishii e Hibiki, 2011).

Os Modelos Homogêneos sem Escorregamento tratam as duas fases como um único fluido, assumindo que as fases escoam com a mesma velocidade na tubulação. O modelo necessita de correlações empíricas para, por exemplo, prever a perda de carga no escoamento, que são dependentes do padrão de escoamento vigente. Este é o modelo mais rudimentar de escoamento bifásico, e sua incapacidade de tratar o escorregamento entre as fases pode resultar em grandes erros.

Por outro lado, o Modelo de Escorregamento incorpora relações para determinar o movimento relativo entre as fases. Neste modelo, o escoamento do fluido é modelado através de equações de conservação para a mistura (massa, quantidade de movimento e energia), utilizando relações constitutivas (ajustadas por correlações empíricas) para determinar o movimento relativo entre fases. O modelo é relativamente simples, sendo capaz de prever a dinâmica do escoamento quando o movimento entre as fases é fortemente acoplado. No entanto, o modelo é dependente de correlações empíricas para a determinação do movimento relativo entre as fases. Os primeiros simuladores de escoamento bifásico foram baseados na modelagem de célula unitária (*“Unit Cell Model”*). Esta abordagem utiliza correlações empíricas para as características das golfadas, tais como comprimento e frequência, e necessitam de mapas de padrão de escoamento para ajustar o modelo físico. Uma característica deste tipo de modelagem é o baixo custo computacional envolvido. Todavia, ela é fortemente dependente das correlações escolhidas para descrever as características das golfadas, incorporando incertezas nos resultados. Um exemplo de simulador comercial que emprega tais técnicas é o TACITE® (Pauchon *et al.*, 1994), em que as equações governantes são modeladas através do Modelo de Escorregamento. No Modelo de Dois Fluidos, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são resolvidas para cada fase, sendo o acoplamento entre fases modelado através de termos interfaciais nas equações. O modelo exige um número maior de equações, exigindo maior esforço computacional em sua solução (quando comparado aos demais modelos). Entretanto, é capaz de descrever as interações entre fases com um maior grau de sofisticação. O Modelo de Dois Fluidos foi introduzido por Ishii em 1975 (Ishii e Hibiki, 2011), com aplicações na indústria nuclear. Posteriormente passou a ser também utilizado na indústria do petróleo. Outra abordagem, que possui menor dependência com correlações empíricas, é o

método de seguimento de pistão ou *slug tracking* (Bendiksen *et al.*, 1991, Nydal e Banerjee, 1995). Neste método, um sistema de coordenadas Lagrangeano é adotado, de forma a acompanhar a intermitência no escoamento. O escoamento é resolvido através da técnica de volumes finitos (Patankar, 1980), onde o volume de controle é ajustado para confinar o pistão.

Existem na literatura vários trabalhos de seguimento de pistão. Um dos primeiros trabalhos foi realizado por Barnea e Taitel (1993). Os autores apresentaram um modelo simplificado, em que o líquido e o gás são considerados como incompressíveis, os pistões não possuem bolhas de gás dispersas, e a fração de líquido no filme abaixo da bolha é constante. Os autores testaram o modelo em uma tubulação horizontal e para o avanço das frentes das bolhas foi utilizado o método de discretização por diferenças finitas explícito no tempo. Posteriormente Taitel e Barnea (1998) propuseram um novo modelo de seguimento de pistões em tubulações horizontais, considerando o gás como compressível e ideal e a fração de líquido no filme variável e calculada igual à altura de filme de equilíbrio. Observou-se que o comprimento da célula unitária aumenta devido à expansão da bolha, porém o comprimento do pistão de líquido não é afetado.

Franklin e Rosa (2004) apresentaram um modelo de seguimento de pistões, fazendo uso das equações de conservação da massa e quantidade de movimento na forma integral a volumes de controles que acompanham tanto as bolhas de gás quanto os pistões de líquido. Os autores argumentaram que o fluxo de quantidade de movimento pode ser escrito em termos da diferença de pressão hidrostática entre o filme de líquido e o pistão além da contribuição da aceleração do líquido na região de mistura no pistão. A equação de conservação da massa é aplicada à fase gasosa na célula de golfada resultando em uma equação para a variação da pressão com o tempo na região da bolha. A equação de quantidade de movimento é resolvida para o pistão de líquido de forma a obter a evolução da velocidade do pistão. Bolhas e pistões de comprimento constante são introduzidas periodicamente na tubulação.

Rodrigues (2006a,b) estendeu o modelo proposto por Franklin e Rosa (2004), considerando as bolhas de gás dispersas no interior do pistão de líquido e resolvendo a equação de conservação da quantidade de movimentos para a região da bolha e do pistão. Um modelo para a introdução de golfadas de forma intermitente também foi introduzido. Rodrigues *et al.* (2010) apresentam diversos resultados para tubulações horizontais e verticais, com boa concordância obtida com relação a dados experimentais.

Os simuladores baseados em *slug tracking* são amplamente utilizados na indústria, pois permitem a simulação de transientes em dutos de grandes dimensões com um custo computacional moderado. Um exemplo de simulador comercial que emprega *slug tracking* é o OLGA[®].

Apesar de a abordagem *slug tracking* ser capaz de prever razoavelmente, por exemplo, a evolução dinâmica das bolhas de Taylor e dos pistões de líquido, ainda se faz necessária a larga utilização de correlações empíricas para determinar as características físicas do escoamento (e.g. velocidade de translação da bolha, frequência de formação das golfadas) e de critérios que determinem quando as golfadas se formam.

Outra metodologia para a simulação de escoamentos bifásicos foi introduzida por Issa e Woodburn (1998) e Issa e Kempf (2003), sendo denominada *slug capturing*. Nesta abordagem, as equações de conservação do Modelo de Dois Fluidos são resolvidas pelo método dos volumes finitos (Patankar, 1980), empregando uma malha de alta resolução.

O *slug capturing* se diferencia das demais metodologias por não necessitar de mapas de padrão de escoamento ou de correlações empíricas para as características físicas das golfadas. No trabalho de Issa e Kempf (2003), considerou-se os fluidos isotérmicos, tendo sido demonstrado que a abordagem *slug capturing* é capaz de prever a evolução de perturbações de longo comprimento de onda na interface gás-líquido, com a ocorrência da golfada pela própria evolução destas perturbações.

A metodologia foi aprimorada pelo trabalho de Bonizzi e Issa (2003), onde o modelo foi estendido para escoamentos trifásicos (líquido-líquido-gás). As equações de conservação das fases líquidas foram combinadas através do Modelo de Escorregamento. Resultados obtidos com o código desenvolvido foram comparados com dados experimentais disponíveis na literatura, obtendo resultados satisfatórios.

Ortega e Nieckele (2005) estudaram a metodologia *slug capturing*, conforme proposta por Issa e Kempf (2003). Os autores realizaram testes com os algoritmos de solução PISO (Issa, 1986) e PRIME (Maliska, 1981), tendo ambos apresentado resultados similares, sendo porém o último procedimento numérico mais simples. Com o surgimento das golfadas, a equação de conservação de quantidade de movimento do gás torna-se singular. Visando evitar esta singularidade, investigou-se o desempenho do modelo utilizando as equações governantes na forma não conservativa. No entanto, a forma conservativa mostrou-se mais robusta.

Carneiro *et al.* (2011) estimaram as grandezas estatísticas das golfadas, em uma tubulação horizontal, ao resolver numericamente o escoamento com o Modelo de Dois Fluidos através da metodologia *slug capturing*, e compararam com dados experimentais, obtendo boa concordância.

A formulação matemática do Modelo de Dois Fluidos o faz constituir um problema mal-posto sob determinadas condições, o que tem sido extensivamente estudado na literatura. Uma revisão é apresentada por Montini (2011).

Song e Ishii (2000) analisaram o Modelo de Dois Fluidos uni-dimensional e exploraram com detalhes a influência do escoamento transversal, sugerindo a introdução de um coeficiente nos termos convectivos das equações de conservação de quantidade de movimento. O termo foi denominado “parâmetro de fluxo de quantidade de movimento” e o efeito do mesmo na natureza das equações foi discutido. Issa e Montini (2010) mostraram que para escoamento horizontais, o parâmetro de fluxo de quantidade de movimento para o líquido auxilia a tornar o sistema de equações bem posto, porém cuidados devem ser tomados a respeito dos valores utilizados e da sua interpretação física.

Carneiro *et al.* (2005) realizaram uma análise da hiperbolicidade do Modelo de Dois Fluidos isotérmico. Os autores também verificaram que a introdução de um salto de pressão na interface não promoveu melhora significativa da estabilidade do modelo para os escoamentos horizontais estudados.

Holmas *et al.* (2008) sugeriram a inclusão de difusão artificial nas equações de conservação de quantidade de movimento do Modelo de Dois Fluidos, visando ampliar a região em que o modelo é bem posto.

De acordo com o levantamento bibliográfico realizado, observou-se que o estudo do padrão intermitente é mais abundante no caso de tubulações horizontais. Observou-se ainda que não existe um consenso sobre os parâmetros de fechamento para o sistema de equações referente ao Modelo de Dois Fluidos Uni-dimensional, especialmente para escoamentos em tubulações verticais. Dessa forma, o foco do presente trabalho será voltado para a previsão do escoamento intermitente em tubulações verticais, investigando diferentes parâmetros de fechamento.