

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma breve revisão da literatura disponível relativa ao escoamento multifásico. Mencionam-se 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.

2.1 Mapas de Padrão de Escoamento

Como mencionado no Capítulo 1, existe uma variedade de possíveis padrões de escoamento quando duas fases escoam ao longo de uma tubulação. A determinação do padrão de escoamento é de grande importância, e pode ser decisiva na escolha do método para o tratamento do escoamento em questão. Por esta razão, foram criados mapas de padrões de escoamento, que são gráficos bidimensionais divididos em regiões que correspondem aos vários padrões de escoamento. Estes mapas são construídos com base em parâmetros que relacionam o escoamento da fase líquida e da fase gás.

Um dos primeiros mapas de padrões de escoamento foi proposto por Baker em 1954 (Wallis, 1969). Foi o primeiro trabalho reconhecendo a importância do conhecimento dos padrões de escoamento para o cálculo da perda de carga, fração de vazio, entre outros parâmetros.

Mandhane et al.(1974), determinou experimentalmente as regiões que definem os diversos regimes de escoamento, usando como coordenadas as velocidades superficiais do gás e líquido. O objetivo do autor foi criar um mapa função somente das velocidades superficiais, eliminando assim a dependência do diâmetro do duto. Deve-se destacar que a maior parte dos experimentos de Mandhane ficou restrita a escoamentos de ar e água sob condições atmosféricas. A Fig. 2.1 mostra os resultados para diversos regimes de escoamento para uma tubulação de 25 mm de diâmetro.

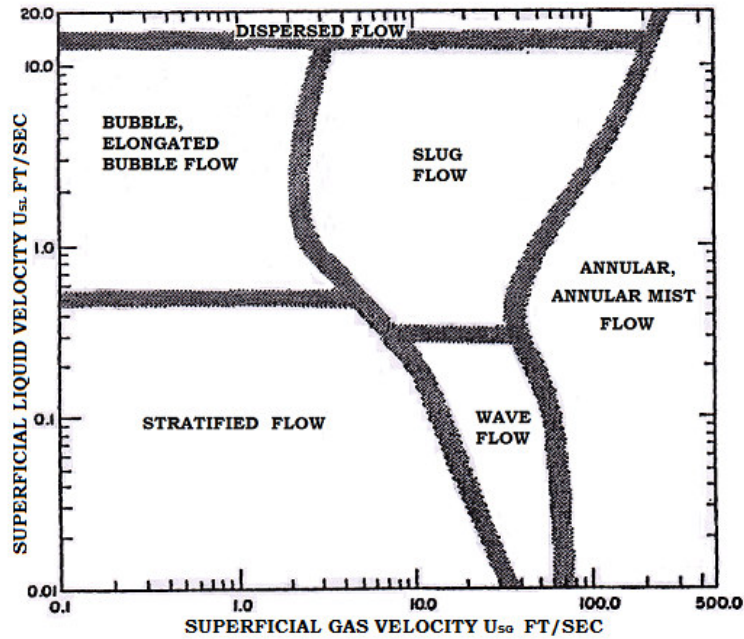


Figura 2.1 – Mapa dos Padrões de Escoamento, Mandhane et al. (1974)

Taitel e Dukler (1976) desenvolveram um modelo teórico mecanicista para determinar os limites da transição entre os diversos regimes de escoamento, para tubulações horizontais e levemente inclinadas, estabelecendo quatro parâmetros adimensionais que representassem razões entre as forças mais importantes governando as transições:

$$X^2 = \frac{(dP/dx)_l}{(dP/dx)_g} \quad ; \quad T = \left(\frac{(dP/dx)_l}{(\rho_L - \rho_G)g \cos \beta} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

$$K = F \left(\frac{\rho_L U_{sL} D}{\mu_l} \right)^{\frac{1}{2}} \quad ; \quad F = \frac{U_{sL}}{\sqrt{D g \cos \beta}} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}} \quad (2.2)$$

O parâmetro X^2 é o conhecido parâmetro de Lockhart e Martinelli, definido pela razão da perda de carga de cada fase $(dP/dx)_l$ e $(dP/dx)_g$. Os outros três dependem da vazão do líquido através da velocidade superficial U_{sL} , a qual é dada pela razão entre a vazão volumétrica da fase líquida Q_l e a área total de escoamento A , propriedades dos fluidos, como massa específica ρ e viscosidade molecular μ ; geometria da tubulação, como diâmetro D e inclinação da tubulação β e a gravidade g .

As fronteiras entre os padrões são previstas analiticamente, mostrando-se ainda que, para cada ângulo de inclinação da tubulação, são necessários apenas dois parâmetros adimensionais para descrever a transição entre dois padrões quaisquer, como mostrado na Fig. 2.2. O trabalho de Taitel e Dukler (1976) além de apresentar boa concordância com dados experimentais para tubulações horizontais (Mandhane et al., 1974), mostrou ser capaz de prever os efeitos de pequenas mudanças no diâmetro e na inclinação do tubo, além das propriedades dos fluidos, na transição entre os regimes.

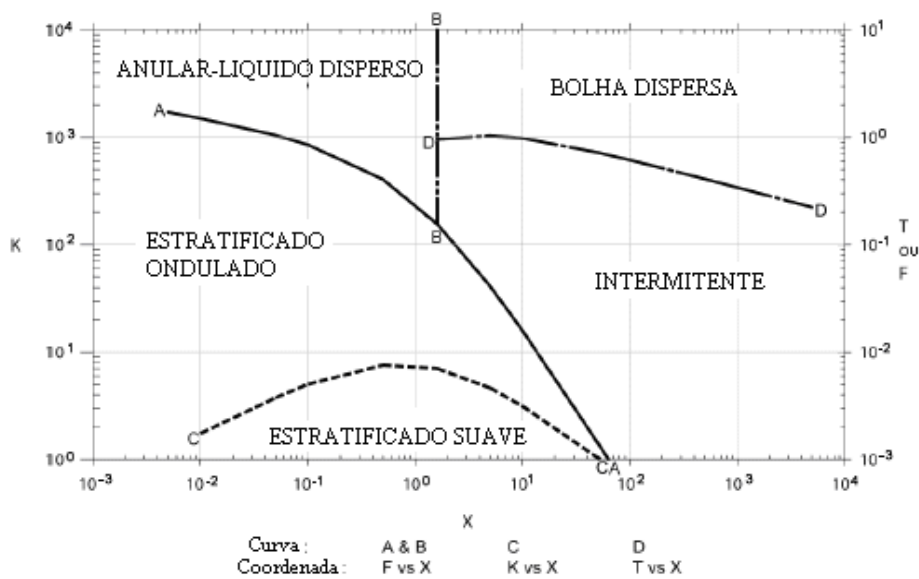


Figura 2.2 – Mapa dos Padrões de Escoamento, Taitel e Dukler (1976).

Uma excelente revisão de trabalhos relacionados a mapa de padrões foi realizada por Barnea (1987). Barnea também desenvolveu um modelo unificado para prever padrões de escoamento em dutos com líquido e gás, levando em conta os efeitos das propriedades dos fluidos, as dimensões da tubulação e a sua inclinação.

Com o decorrer dos anos diversos trabalhos foram elaborados baseados na metodologia proposta por Taitel e Dukler (1976). Ainda na atualidade aparecem novos modelos que incluem uma variedade de mecanismos que visam explicar os fundamentos físicos das transições, os quais diferem substancialmente dependendo se os escoamentos são horizontais ou verticais.

De acordo com Omgba-Essama (2004), apesar da classificação dos padrões de escoamento ter sido amplamente estudada de forma empírica e teórica, a classificação (e descrição) dos escoamentos bifásicos em padrões de escoamento

bem definidos continua sendo um processo subjetivo. As interações entre as fases são muito complexas e estão longe de serem totalmente entendidas.

Carneiro (2006) enfatizou a importância do uso dos mapas de padrões de escoamento na seleção das condições iniciais e de contorno, de modo a garantir a ocorrência do regime no padrão de golfadas. As curvas de transição para os diferentes regimes de escoamento no mapa de padrões que construiu foram baseadas na metodologia descrita no trabalho de Taitel e Dukler (1976), sendo que a transição estratificado-golfadas foi calculada segundo Barnea e Taitel (1994), a qual contempla tanto casos viscosos e não-viscosos.

Como mencionado anteriormente existem muitos estudos relacionados com o mapa de padrões de escoamento. Uma boa revisão é apresentada por Carneiro (2006), que analisa a trajetória dos estudos relacionados com as transições de um regime para outro.

A seguir, uma revisão bibliográfica dos trabalhos mais relevantes relacionados ao regime de golfadas é apresentada. Esta revisão encontra-se subdividida em duas partes: na primeira apresentam-se os trabalhos experimentais mais importantes, com ênfase na análise estatística das variáveis como (comprimento, velocidade e frequência); e a segunda, refere-se as principais metodologias numéricas utilizadas na previsão do regime de golfadas.

2.2 Estudos Experimentais

Ao longo do tempo os avanços nos trabalhos experimentais e na modelagem do escoamento no regime de golfadas, indicaram de forma cada vez mais evidente que, devido às características próprias da natureza do escoamento, a melhor descrição do fenômeno deveria fazer uso de análise estatística.

Nicklin et al. (1962) propuseram uma correlação para descrever o comportamento da velocidade de translação da bolha inserida em um meio líquido escoando verticalmente. Apesar da correlação ter sido desenvolvida para golfadas em tubulações verticais, recomendam a utilização da mesma para tubulações horizontais. 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. Bendiksen (1984) determinou duas correlações para o cálculo do parâmetro de distribuição e da velocidade de deslizamento em

função do diâmetro da tubulação e do ângulo de inclinação da tubulação. Segundo o autor, o número de Froude é adotado como parâmetro a partir do qual se observa uma alteração no comportamento da velocidade de translação da bolha.

Brill et al. (1981) usaram a distribuição log-normal para descrever a distribuição dos comprimentos das golfadas para distâncias muito afastadas da entrada em dutos na Prudhoe Bay. Posteriormente, diversos outros autores também consideraram que os comprimentos das golfadas para um escoamento completamente desenvolvido seguem uma distribuição log-normal (Barnea e Taitel, 1993; Bernicot e Drouffe, 1989, 1991; Dhulesia et al., 1991, 1993). A partir de medidas experimentais realizadas, Nydal et al. (1992) indicou que o comprimento da golfada em tubulações curtas também segue uma distribuição log-normal.

Dhulesia et al. (1991) ajustaram a inversa de uma distribuição gaussiana ou distribuição Wald aos dados de comprimentos da golfada. De acordo com os autores, cada golfada pode ser tratada como um “objeto” cuja chegada a cada posição é monitorada. Os autores supõem que a distância viajada por uma golfada individual pode ser representada por um movimento Browniano com deslizamento. As principais conclusões relatadas pelos autores mostram que a distribuição estatística dos comprimentos das golfadas é em geral bem modelada utilizando uma distribuição gaussiana inversa. Entretanto, uma distribuição *log-normal* também representa de modo adequado os resultados experimentais analisados.

Fabre e Liné (1992) estudaram o comprimento médio das golfadas em tubulações horizontais e determinaram que este é da ordem de 15 a 40 vezes o diâmetro do duto, independentemente das propriedades físicas dos fluidos ou das velocidades de entrada. Barnea e Taitel (1993) ressaltam que pode haver uma grande variância na distribuição dos comprimentos das golfadas, em relação ao valor médio.

Nydal et al. (1992) apresentaram um trabalho que consiste de uma verificação experimental das propriedades estatísticas do escoamento intermitente. A partir da medição da golfada líquida em dois pontos espaçados de 2,5 D, foi possível analisar as distribuições estatísticas das variáveis globais deste padrão de escoamento para diferentes distâncias em relação à entrada da tubulação e condições de entrada. A análise dos resultados concentrou-se na velocidade de

propagação da bolha (cauda da golfada líquida), no comprimento da golfada líquida e na fração de vazio.

De acordo com Dhulesia et al., (1991); Nydal et al., (1992) e van Hout et al., (2001), a distribuição do comprimento da golfada líquida também pode ser modelada por distribuições gama, ou a inversa gaussiana, além da distribuição *log-normal*.

Shemer (2003) sugere que a modelagem do escoamento em golfada deveria incluir não só os valores médios, mas também a estatística dos parâmetros hidrodinâmicos governantes. Para entender o movimento complicado entre duas bolhas adjacentes, é preciso medidas detalhadas da velocidade do escoamento na golfada líquida, juntamente com medições do movimento da bolha. Ele realizou medidas experimentais da distribuição da golfada líquida e dos comprimentos da bolha alongada, ao longo de tubulações horizontais ou ligeiramente inclinadas, assim como para tubulações verticais, as quais foram ajustadas com a distribuição *log-normal*.

Ujang et al. (2006) realizaram um trabalho experimental para analisar a iniciação e a subsequente evolução hidrodinâmica da golfada em uma tubulação horizontal de 37m de comprimento com diâmetro interno de $D = 0,078\text{m}$. Os experimentos foram realizados visando avaliar a influência do nível da pressão absoluta (1 atmosfera, 4,0 e 9,0 bar) e das velocidades superficiais do líquido e gás na entrada da tubulação. Os resultados mostraram que o incremento da pressão do gás tem o efeito de suprimir o crescimento da onda, de modo que a iniciação da golfada ocorre mais a jusante. A influência da pressão em retardar a iniciação das golfadas é possivelmente devido à redução na compressibilidade do gás, de modo que as flutuações da pressão perto da entrada tenham menos efeito. Observaram ainda que a distribuição total dos comprimentos das golfadas muda pouco com a velocidade do gás e do líquido. Uma elevada velocidade superficial do líquido tende a produzir golfadas mais curtas na região a jusante, com um desaparecimento completo das golfadas menores. De forma análoga, um aumento na velocidade superficial do gás tende a produzir golfadas mais curtas na região a jusante, mas, tem um efeito menor na forma da distribuição.

Wang et al. (2006) realizaram um trabalho numérico experimental para estudar a distribuição do comprimento da golfada líquida ao longo da tubulação. O estudo experimental do escoamento no regime golfada foi realizado em uma

tubulação horizontal de 133m de comprimento e diâmetro interno de $D = 0,050\text{m}$, usando como fluidos ar e água. O comprimento da golfada líquida foi obtido através do monitoramento da tubulação em duas posições (uma na metade do duto e outra perto da saída). A análise numérica foi realizada utilizando um modelo de *Slug Tracking*. Concluíram que o comprimento encontra-se compreendido em uma faixa de $15-40D$. Este trabalho cita diversos autores que observaram experimentalmente a faixa obtida desse parâmetro, a qual é apresentada na Tabela 2.1. Cabe ressaltar que os comprimentos das golfadas foram ajustadas com uma distribuição *log-normal*.

Tabela 2.1 – Comprimento da Golfada Líquida.

Autor	L_S / D
Dukler e Hubbard (1975)	12 – 24
Nicholson et al. (1978)	12 – 30
Andreussi e Bendiksen (1989)	12 – 24
Nydal et al. (1992)	15 – 20
He (2002)	10 – 34

Carpintero-Rogero et al. (2006) analisou experimentalmente o escoamento no padrão de golfada, tendo por objetivo estimar o perfil de velocidade da fase líquida, tanto na região do filme líquido quanto do pistão.

Recentemente, Fonseca (2009) mediu o campo de velocidade no filme de líquido abaixo da bolha de Taylor e na golfada líquida utilizando a técnica PIV (“Particle image velocimetry”). A experiência foi realizada em uma tubulação transparente de 10 m de comprimento e 0,024m de diâmetro, usando como fluidos água e ar. Analisou estatisticamente o comportamento da velocidade do pistão (frente da golfada líquida), da velocidade da bolha (cauda da golfada líquida) e do comprimento do pistão (golfada líquida) e da bolha. Para cada variável elaborou um histograma com distribuição de frequência dos valores médios.

2.3 Estudos Numéricos

Devido a complexidade do escoamento multifásico, diversas metodologias, com diferentes graus de complexidade foram desenvolvidas. Pode-se citar modelos de “um fluido”, os quais são baseados em um único conjunto de equações de conservação e modelos baseados em médias (Prosperetti e Tryggvason, 2007). Os modelos “um fluido” requerem alto esforço computacional. Dentre estes, pode-se citar o modelo VOF (Volume of Fluid), Level-Set, Fronteiras Imersas, etc. Os modelos baseados em médias são mais baratos, porém necessitam da introdução de correlações empíricas, para fechar o sistema de equações governantes. Dentre os modelos de médias, podemos citar os Modelos de Mistura, de Deslizamento e o Modelo de Dois Fluidos.

Dependendo do interesse, o escoamento no padrão de golfadas pode ser analisado utilizando qualquer um dos modelos mencionados. No entanto, quando o interesse se concentra em problemas ao longo de longas tubulações, os modelos baseados em médias têm-se sido mais utilizados. Geralmente, o Modelo de Dois Fluidos é mais utilizado para analisar escoamentos com fases separadas, como o escoamento em golfada ou anular e o Modelo de Deslizamento é mais utilizado para escoamentos dispersos (padrão de bolhas).

Ishii (1975) introduziu o Modelo de Dois Fluidos, o qual inicialmente foi utilizado pela indústria nuclear, sendo posteriormente também utilizado indústria do petróleo. Este modelo denominado de “*slug tracking*” permite a captura das golfadas em todo o trajeto ao longo da tubulação, desde sua origem. O Modelo de Dois Fluidos unidimensional foi implementado em diversos códigos como PLAC (Black et al., 1990), OLGA (Bendiksen et al., 1991).

Ortega (2004) e Carneiro (2006) utilizarem o Modelo de Dois Fluidos para a previsão da formação do regime de golfadas em tubulações horizontais e ligeiramente inclinadas, a partir do escoamento estratificado, através da metodologia desenvolvida por Issa e Kempf (2003) denominada de “*slug capturing*” (ou “captura das golfadas”). A grande vantagem desta abordagem é o fato de conseguir prever a transição e o desenvolvimento do padrão de golfadas através do crescimento natural de instabilidades inerentes ao sistema de equações sendo resolvido. Isto elimina a necessidade da introdução de critérios de transição

entre os padrões no modelo. As golfadas se desenvolvem, crescem e podem coalescer ou se dissipar, dependendo unicamente da solução numérica do sistema de equações de conservação de massa e de quantidade de movimento linear das fases. A única informação empírica requerida é para as equações de fechamento envolvendo as forças viscosas interfaciais (líquido-parede, gás-parede e líquido-gás).

Taha Taha (2006) simulou o regime de golfadas em uma tubulação vertical, utilizando o modelo VOF em um domínio computacional bidimensional simétrico e outro tridimensional. Ambos os domínios foram definidos longos o suficiente para obter uma bolha de Taylor parada, com uma velocidade na parede igual à velocidade teórica da bolha, para conseguir que esta não se desloque e assim diminuir a malha computacional.

Provenzano (2007) realizou um trabalho que consistia na modelagem e simulação de escoamentos bifásicos em dutos utilizando o Modelo de Deslizamento, o qual foi baseado no trabalho de Evje e Fjelde (2003). Além disso, aplicou a metodologia para prever uma situação extrema, denominada golfada severa. Os resultados foram comparados com os dados obtidos por Andrianov et al. (2007) e Masella et al. (1998) para a mesma geometria.

Ujang et al. (2008) visando determinar a velocidade de translação da cauda da golfada, utilizaram o modelo VOF, para analisar uma golfada unitária em um domínio computacional horizontal e ligeiramente inclinado. Também observaram duas bolhas no domínio, investigando o comportamento das golfadas e fazendo uma comparação entre as tensões na parede com um código unidimensional.

Febres (2009) utilizando o pacote comercial FLUENTTM, realizou uma modelagem tridimensional de uma golfada unitária usando o modelo VOF (“*Volume of Fluid*”) para a captura da interfase entre as fases líquida e gasosa. As simulações realizadas foram comparadas com dados experimentais de Fagundes Netto (1999a) para a forma do nariz e da cauda da bolha e com Fonseca (2009) para os perfis de velocidade axial e transversal em diversas coordenadas próximas ao nariz da bolha.

Holmas (2009) apresenta um simulador transiente baseado no Modelo de Dois Fluidos na forma unidimensional e incompressível para prever as alturas e velocidades das ondas assim como a queda de pressão do líquido, obtendo boa

concordância. Os resultados obtidos demonstraram que o modelo é capaz de prever a forma característica da onda.

Cazares e Mendoza (2009) também utilizaram o Modelo de Dois Fluidos em sua forma unidimensional para prever o escoamento em poços de petróleo. A fase líquida do modelo era formada por água e óleo e a fase gasosa por gás. As equações foram discretizadas utilizando a técnica de diferenças finitas, utilizando o esquema implícito. O modelo foi capaz de prever a pressão, a fração volumétrica, a velocidade e a temperatura para as duas fases com boa concordância com dados do campo e da literatura.

Issa (2009) apresenta um trabalho onde faz uma revisão da aplicabilidade do Modelo de Dois Fluidos na forma unidimensional na predição do crescimento da onda e da evolução da golfada em uma tubulação horizontal, onde ressalta a habilidade do modelo de prever a natureza estatística do crescimento e o desenvolvimento da golfada.

De Leebeeck e Nydal (2009) apresentam o modelo “*wave and slug tracking*” (acompanhamento da onda e golfada), na sua forma uni-dimensional ao longo de tubulações horizontais. Neste modelo as ondas são tratadas de forma similar às golfadas, devido à similaridade entre as ondas de grande amplitude do escoamento ondulado e golfadas. O modelo foi capaz de simular o crescimento e a coalescência das ondas e das golfadas. Observaram que a velocidade das ondas é menor do que a velocidade das golfadas e a queda de pressão é maior do que no caso de escoamento estratificado.