

2 Revisão Bibliográfica

Como o escoamento multifásico apresenta diversos padrões diferentes dependendo da geometria da tubulação (ângulo de inclinação, secção transversal), propriedades dos fluidos assim como velocidades das fases, a previsão do padrão de escoamento é fundamental para caracterizá-lo. Existem diversos trabalhos disponíveis na literatura que têm por objetivo identificar os padrões de escoamentos, assim como as transições entre padrões.

Uma vez identificado o padrão do escoamento, é possível determinar as grandezas relevantes como perda de carga, gradiente de pressão, velocidade relativa entre as fases, etc. Estas grandezas podem ser investigadas do ponto de vista experimental ou numérico. Para cada tipo de padrão encontram-se trabalhos utilizando ambos os enfoques, que buscam compreender a física do processo, assim como visam desenvolver correlações empíricas de fechamento para utilização em diferentes tipos de modelos.

Nesta seção apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre mapas de padrões de escoamento e a seguir, a revisão é focada no escoamento no padrão de golfadas em tubulações horizontais.

2.1 Padrões de Escoamento

Com o desenvolvimento de mapas de arranjos foi possível classificar os tipos de escoamento, facilitando a compreensão da física do processo e geração de correlações de fechamento para cada tipo de arranjo.

Um dos trabalhos pioneiros nesta área foi apresentado por Baker (1954), tendo desenvolvido um mapa de padrões de escoamento em função dos fluxos de massa de cada fase. Sumários desses mapas são comuns em textos clássicos sobre escoamento multifásico como Wallis (1969). O mapa desenvolvido por Baker e modificado por Scott (1963) é mostrado na Fig. 2.1. Este esquema utiliza ordenada dimensional igual G_g/φ e abscissa adimensional igual a $G_g/G_l \varphi k$ onde G_g

e G_l representam os fluxos de massa de gás e líquido respectivamente, e as variáveis adimensionais são:

$$\varphi = \left(\frac{\rho_g}{\rho_{Ar}} \frac{\rho_l}{\rho_{Agua}} \right)^{\frac{1}{2}} ; k = \frac{\sigma_g}{\sigma} \left(\frac{\mu_l}{\mu_{Agua}} \left(\frac{\rho_{Agua}}{\rho_l} \right)^2 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.1)$$

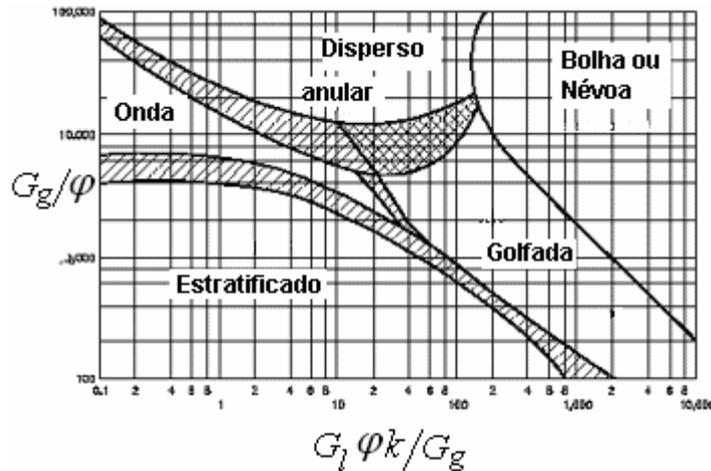


Figura 2.1- Mapa de arranjo de Baker para tubulação horizontal, modificado por Scott (Wallis, 1969)

Dependendo das velocidades das fases, o regime de escoamento pode se tornar instável, e o crescimento das instabilidades dão origem à transição de um arranjo para outro. Inicialmente estes estudos eram realizados experimentalmente, variando-se as vazões de líquido e gás e identificando o padrão através de visualização em tubulações de seção de teste transparente. Uma dificuldade encontrada para a utilização destes diagramas consiste no fato de que a maioria era apresentada na sua forma dimensional, fazendo que estes só fossem aplicáveis para dutos com dimensões específicas e condições particulares de alguma investigação. Muitas são as tentativas de adimensionalizar os parâmetros para universalizar estes mapas.

Taitel e Dukler (1976) introduziram um modelo teórico mecanicista para determinar os limites de transição de cinco regimes de escoamento em tubulações horizontais a levemente inclinadas. A teoria foi desenvolvida na forma adimensional e os limites de transição foram introduzidos na forma de quatro parâmetros adimensionais, que representassem razões entre as forças mais importantes governando as transições. Um destes parâmetros é o conhecido

parâmetro de Lockhart e Martinelli (X^2), 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 w_{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 .

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

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

A Figura 2.2 apresenta um exemplo de mapa de arranjos de Taitel e Dukler (1976) para tubulações horizontais, indicando os limites de transição entre regimes adjacentes localizados. O trabalho de Taitel e Dukler (1976) não só apresentou uma boa concordância com dados experimentais para tubulações horizontais (Mandhane et al., 1974), como 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.

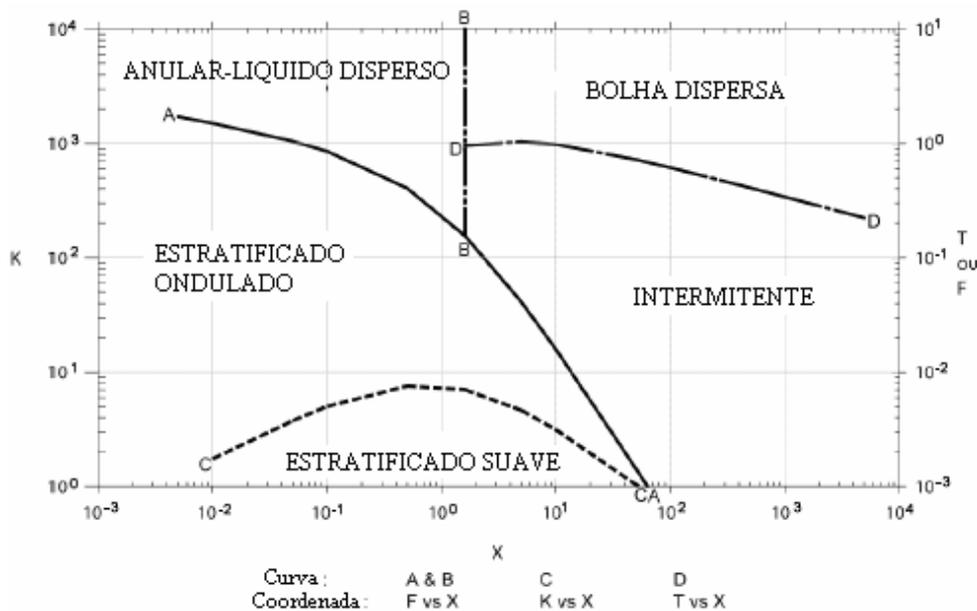


Figura 2.2- Mapa de arranjos de Taitel e Dukler (1976) para tubulações horizontais.

Weisman et al. (1979) estudaram a influência das propriedades físicas dos fluidos (viscosidade do líquido, densidade do líquido, tensão interfacial, densidade do gás) e diâmetro da tubulação (1,27cm to 5,08cm) em escoamento bifásico horizontal. O mapa de padrões de escoamento resultante foi construído em função das velocidades superficiais do líquido e do gás (w_{sl} e w_{sg}) e foram introduzidas correlações adimensionais para prever os limites de transição (Fig. 2.3).

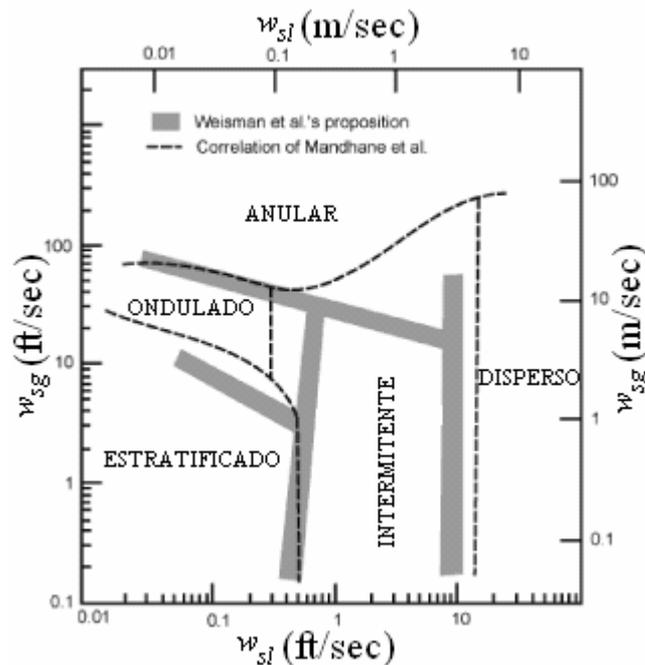


Figura 2.3- Mapa de arranjos de Weisman et al. (1979) para tubulações horizontais.

Barnea (1986) propôs um modelo unificado para prever a transição do escoamento anular para bolhas dispersas para diversas inclinações da tubulação. Em 1987, Barnea apresentou uma revisão de diversos trabalhos, incluindo uma variedade de mecanismos visando explicar fundamentos físicos das transições e 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. O modelo não estava limitado a um intervalo específico de inclinações e apresentou bons resultados quando comparado com dados experimentais. O trabalho apresenta inclusive, um algoritmo lógico para a determinação dos padrões.

Taitel e Dukler (1987) estudaram teoricamente o efeito do comprimento da tubulação nos critérios de transição de escoamento estratificado para intermitente quando o líquido era muito viscoso.

Barnea e Taitel (1989) desenvolveram um modelo para prever a transição do escoamento anular baseado numa análise de estabilidade. Em 1994, os mesmos autores, Barnea e Taitel, estabeleceram um modelo não linear de estabilidade para transições de regime estratificado para o regime de golfada e regime anular.

Simmons e Hanratty (2001) estudaram experimentalmente como é afetada a transição do padrão estratificado para golfada em função de pequenos ângulos de inclinação ascendente da tubulação e observaram que existe uma velocidade crítica abaixo da qual o regime estratificado não é observado.

Tendo analisado brevemente a trajetória dos estudos relacionados com as transições de um regime para outro, na seção seguinte, a revisão é focada no regime de golfadas, que é o alvo principal deste trabalho.

2.2 Escoamento em Golfadas

Este padrão de escoamento caracteriza-se pela sucessão de bolhas alongadas escoando sobre um filme líquido, separadas por golfadas de líquido as quais não são regulares nem no espaço nem no tempo. A Figura 2.4 ilustra uma unidade básica de golfada, a qual 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 se move com velocidade W_G enquanto que a parte traseira (ou nariz da bolha) possui velocidade W_T . A velocidade média W_m da golfada líquida é igual à soma da velocidade superficial do gás, w_{sg} , com a do líquido, w_{sl} , $W_m = w_{sl} + w_{sg}$. Este padrão irregular é gerado pela interação não linear entre as bolhas vizinhas e pelos mecanismos de formação das golfadas de líquidos. W_m e W_l representam as velocidades reais do líquido e do gás.

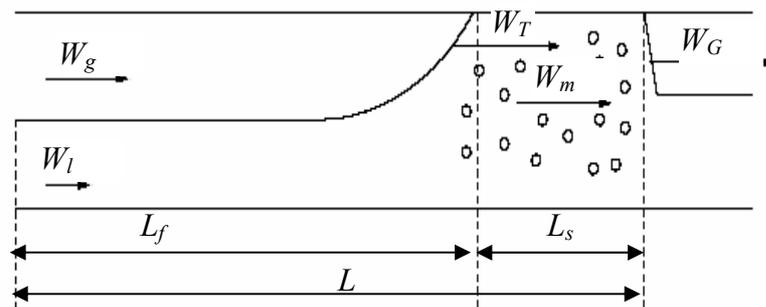


Figura 2.4- Célula unitária de uma golfada.

A formação de golfadas em tubulações horizontais é causada por dois mecanismos: o crescimento natural de pequenas flutuações randômicas na interface gás-líquido (mecanismo de Kelvin-Helmholtz), e/ou acumulação de líquido em vales de tubulações em terrenos irregulares, chamada de golfada severa (De Henau et al., 1995; Al-Safran et al., 2005). Woods et al. (2006) observaram que a coalescência de ondas também é um importante mecanismo para a formação de golfadas a jusante.

Na análise do padrão de golfadas, os trabalhos mais relevantes experimentais e numéricos são descritos brevemente a seguir.

2.2.1 Estudos Experimentais

O padrão de escoamento em golfadas possui uma natureza randômica, e a descrição deste fenômeno é sempre expressa em termos de frequências e valores médios.

Um parâmetro importante a ser conhecido no padrão de escoamento de golfada é velocidade de translação da bolha de gás (cauda da golfada). São diversos os trabalhos nesse tema e têm sido elaboradas muitas expressões para calcular a velocidade de translação da bolha, W_T . Nicklin (1962) introduziu uma relação linear para determinar esta velocidade em função de dois parâmetros, um de distribuição e outro de deslizamento, ambos dependentes da velocidade de mistura, diâmetro da tubulação, tensão superficial, viscosidade e outros. Muitas vezes assumem-se valores clássicos para estes parâmetros, como os obtidos por Bendiksen (1984). A abordagem de Nicklin (1962), mesmo sendo para golfada em tubulações verticais, é assumida correta para tubulações horizontais. Nädler e

Mewes (1995), em seus experimentos, encontraram que um aumento na viscosidade do líquido traz consigo um aumento na fração volumétrica média da água, na zona de golfada líquida e na zona do filme líquido.

King et al. (1998) estudaram experimentalmente os efeitos da mudança nas vazões de gás e do líquido, concluindo que um aumento na vazão de gás produz um pico de pressão antes de se estabilizar para as novas condições. Também se observou um período curto de formação intensa de golfadas, em especial quando a vazão do líquido era maior. Uma diminuição na vazão de gás produz uma queda na pressão de entrada e uma estratificação temporal do escoamento mesmo na presença de valores de vazões grandes o suficiente para a obtenção do padrão de golfadas. Quanto menor a vazão de líquido, maior o intervalo de tempo em que o escoamento permanece estratificado. Mudanças na vazão de líquido causam transições suaves entre um estado e outro.

Fagundes Netto et al. (1999b) fizeram um estudo da evolução da estrutura da golfada, introduzindo pares de bolhas de ar a uma tubulação com água escoando a uma determinada velocidade e determinaram o comprimento mínimo da golfada entre duas bolhas (em função do diâmetro da tubulação) para evitar a sua coalescência. Os resultados mostraram que quando duas bolhas adjacentes se deslocam com velocidades diferentes, a golfada entre ambas possui um comprimento menor ou maior do que um valor crítico, dependendo de qual bolha se desloca mais rápido. Lewis et al. (2002) investigou a influência de variações na vazão de ar no padrão de golfadas, concluindo que um aumento da vazão aumenta a intensidade turbulenta na seção transversal da tubulação, produzindo uma maior taxa de transferência de bolhas dispersas da bolha alongada à golfada líquida, induzindo uma queda na fração volumétrica de água.

Shemer (2003) baseando-se em seus dados experimentais para golfada em tubulações verticais, concluiu que uma efetiva predição do escoamento só é possível com a introdução de dados experimentais detalhados referentes aos parâmetros de entrada.

Em tubulações horizontais foi observado experimentalmente por Rosa et al. (2004) que na medida em que a viscosidade do líquido aumenta, o nariz da bolha aumenta sua tendência de apontar para o centro da tubulação, a altura do filme líquido aumenta e os comprimentos da bolha alongada e da golfada diminuem. A

taxa de entrada de bolhas dispersas a partir da bolha de Taylor para a golfada líquida também se vê acrescentada.

Ujang et al. (2006) estudaram o efeito de um aumento na pressão do sistema, concluindo que este não afeta a frequência das golfadas, mas sim a iniciação das golfadas precursoras. Wang et al. (2007), comprovaram que a velocidade da bolha alongada não depende só do número de Froude, mas também da distância da mesma à entrada da tubulação. Também observaram que a frequência das golfadas é afetada pela mudança na velocidade superficial do líquido e não pela variação na velocidade do gás. Técnicas inovadoras não intrusivas também têm sido utilizadas para o estudo de golfadas, entre elas podemos mencionar o trabalho de Reyes et al. (1998), que utilizou MRI (“*Magnetic Resonance imaging*”) para medir a distribuição local da vazão volumétrica do líquido no regime de golfada.

Roitberg et al. (2007) utilizaram um boroscópio para visualizar a distribuição das fases na secção transversal nos padrões estratificado e de golfada.

Fonseca (2009), no Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, fez medições detalhadas dos campos de velocidades utilizando a técnica PIV (“*Particle image velocimetry*”) sobre uma tubulação transparente de 10m tendo como fluidos água e ar no regime de bolhas alongadas.

2.2.2 Estudos Numéricos

Os primeiros modelos mecanicistas foram baseados na unidade básica de golfada (Wallis, 1969). Os modelos baseados na unidade de golfada adotaram uma base de referência que se deslocava com a frente da bolha e consideravam o escoamento como completamente desenvolvido. Uma destas abordagens é aquela desenvolvida por Taitel e Barnea (1990) para escoamento em golfadas, partindo de uma unidade básica de golfada dividida em duas partes, a zona da golfada líquida e a zona do filme líquido. Fagundes Netto et al. (1999b) desenvolveram um modelo baseado nas equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear para predizer a forma da bolha (nariz, filme líquido e cauda) e a transição entre o padrão pistonado e o de golfada, comparando-os com resultados experimentais.

Taitel et al. (2000) estudaram o que acontece com os modelos clássicos de predição de escoamento em golfada em tubulações com inclinação negativa, e mostraram que para aquelas inclinações as golfadas se dissipavam. Orell et al. (2004) utilizaram um sub-modelo daquele desenvolvido por Taitel e Barnea (1990), acrescentando uma fonte de queda de pressão para ar-água e óleo-água, com bons resultados quando comparados com dados experimentais. De Freitas et al. (2008) propagaram o conceito de unidade básica de golfada ao longo da tubulação para permitir levar em conta os efeitos da expansão do gás numa tubulação vertical.

Embora os dados obtidos com estes tipos de estudos sejam ainda úteis, não possuem informações relevantes às características randômicas das estruturas de gás e líquido, não dizem como é que as estruturas evoluem ao longo da tubulação e não fornecem informações de como as estruturas interagem umas com as outras.

Os modelos de “*slug tracking*” permitem a captura das golfadas individuais, permitindo simular os mecanismos básicos de crescimento e dissipação ao longo da tubulação. Taitel e Barnea (1998) estudaram o efeito da compressibilidade do gás num modelo de “*slug tracking*” e concluíram que a compressibilidade da fase gasosa faz crescer o comprimento da unidade de golfada.

Em 1975, Ishii introduziu o Modelo de dois Fluidos, o qual inicialmente foi utilizado pela indústria nuclear, sendo posteriormente também utilizado indústria do Petróleo. Este modelo permitiu a melhora de códigos computacionais denominados de “*slug tracking*”, permitindo a captura das golfadas em todo o trajeto ao longo da tubulação, desde sua origem. Com este modelo não é necessária a introdução de critérios de transição entre padrões e o desenvolvimento do escoamento se dá a partir do crescimento de instabilidades numéricas inerentes ao sistema de equações resolvidas. As únicas correlações empíricas utilizadas são aquelas de fechamento associadas aos fluxos interfaciais. Diversos modelos unidimensionais tem sido desenvolvidos. Neste caso, além das equações de fechamento para as tensões interfaciais, tensões entre os fluidos e parede também precisam de especificadas. O Modelo de dois Fluidos unidimensional foi implementado em diversos códigos como PLAC (Black et al., 1990), OLGA (Bendiksen et al., 1991), o código desenvolvido por Issa e Kempf (2003). Atualmente o Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia

Universidade Católica de Rio de Janeiro conta com seu próprio código do Modelo de Dois Fluidos (Ortega, 2004, Carneiro, 2005).

Com relação à previsão numérica de uma golfada tridimensional, as informações disponíveis na literatura ainda são limitadas. A constante procura de detalhes do escoamento leva a um inevitável refinamento dos domínios computacionais, induzindo a necessidade de enorme capacidade computacional. Um caminho para se evitar os domínios computacionais enormes, Consiste em estudar somente uma unidade de golfada isolada em 3-D. Apesar de que esta simplificação leva a perda dos dados estatísticos, ainda é de muita utilidade para analisar o comportamento tridimensional da bolha de Taylor e da golfada, tanto do ponto de vista qualitativa, quanto quantitativa. Este tipo de abordagem requer alguma forma de capturar a interface. Existem basicamente dois métodos, o método VOF (*"Volume of Fluid"*) que consiste em resolver um conjunto só de equações de conservação e considera as propriedades dos fluidos como ponderadas com uma variável denominada fração volumétrica. A outra abordagem é o modelo Multifluido, que resolve equações de conservação para cada fase e equações de fechamento para o tratamento da interface. Cook et al. (2001), simularam para num domínio simétrico tridimensional para distintos ângulos de inclinação (de 5° até 75°) uma bolha de ar em água estática utilizando o modelo VOF, obtendo boa concordância com seus dados experimentais.

Taha Taha et al. (2006) simulou o regime de golfadas em uma tubulação vertical, utilizando 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. Taha Taha et al.(2006) obteve a forma da bolha e a trajetória do líquido ao passar pela bolha utilizando o modelo VOF. Ujang et al. (2008) utilizaram o modelo VOF e a condição de contorno de velocidade na parede para estabilizar o nariz de uma bolha num domínio computacional horizontal e ligeiramente inclinado. O objetivo do trabalho consistia em prever a velocidade de translação da cauda da golfada. Além disso, Ujang et al. (2008) também observou a tendência do nariz da bolha de apontar ao centro da tubulação, com o aumento da velocidade de mistura, comparado com observações experimentais. Também observaram duas bolhas no domínio, investigando o

comportamento das golfadas e fazendo uma comparação entre as tensões na parede com um código unidimensional.

Vallée et al (2008) utilizando o código comercial ANSYS CFX e o modelo multifluido, para água e ar, modelaram uma tubulação quadrada de acordo com instalações experimentais, obtendo boa concordância qualitativa, comparada com os dados de escoamento estratificado e golfada obtidos experimentalmente.

O presente trabalho utiliza a abordagem de Ujang et al. (2008) para encontrar os perfis de velocidades em diversas coordenadas ao longo de uma tubulação horizontal e os resultados obtidos são comparados com dados experimentais disponíveis na literatura.