

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados os principais estudos relacionados ao escoamento bifásico líquido-gás em dutos horizontais, considerando o regime de escoamento anular, a influência da transferência de calor envolvida no processo e a aplicação do conceito de gás real.

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo será subdividida em três partes. A primeira parte será dedicada ao escoamento bifásico gás-líquido, a segunda ao padrão anular de escoamento, e a terceira ao tratamento da fase gasosa de acordo com o conceito de gás real.

2.1 Escoamento Bifásico Gás-Líquido

Muitos trabalhos foram realizados com o intuito de caracterizar o escoamento bifásico de gás e líquido em tubulações. Ainda hoje continua sendo uma área de muito estudo, principalmente no setor de engenharia de petróleo e nuclear.

O primeiro estudo significativo sobre os mecanismos de transição entre os diferentes regimes foi apresentado no trabalho de Baker (1954), que resultou no primeiro mapa de padrões de escoamento. No entanto este mapa só pode ser utilizado para casos específicos em que o escoamento respeite as condições operacionais e de geometria dos dados experimentais que foram utilizados para sua construção, uma vez que uma das coordenadas do mapa faz referência a um parâmetro dimensional, L , comprimento da tubulação (Fig. 2.1).

Nos anos subsequentes a publicação do trabalho de Baker, esta limitação impulsionou muitos estudos experimentais, na tentativa de criar um mapa de escoamento não dimensional. Em 1976, o trabalho de Taitel e Dukler (1976) finalmente apresentou um grande avanço no campo, ao desenvolver um modelo mecanicista para determinar a transição entre regimes para escoamentos horizontais e levemente inclinados. De acordo com os autores, ondas de tamanho finito crescem e tendem a bloquear o duto quando a força devido ao efeito

Bernoulli na crista da onda é maior que a força da gravidade atuando sobre a onda. Também criaram um mapa de padrão de escoamento baseado puramente em mecanismos fisicamente realistas para cada transição, sem a utilização de qualquer dado experimental.

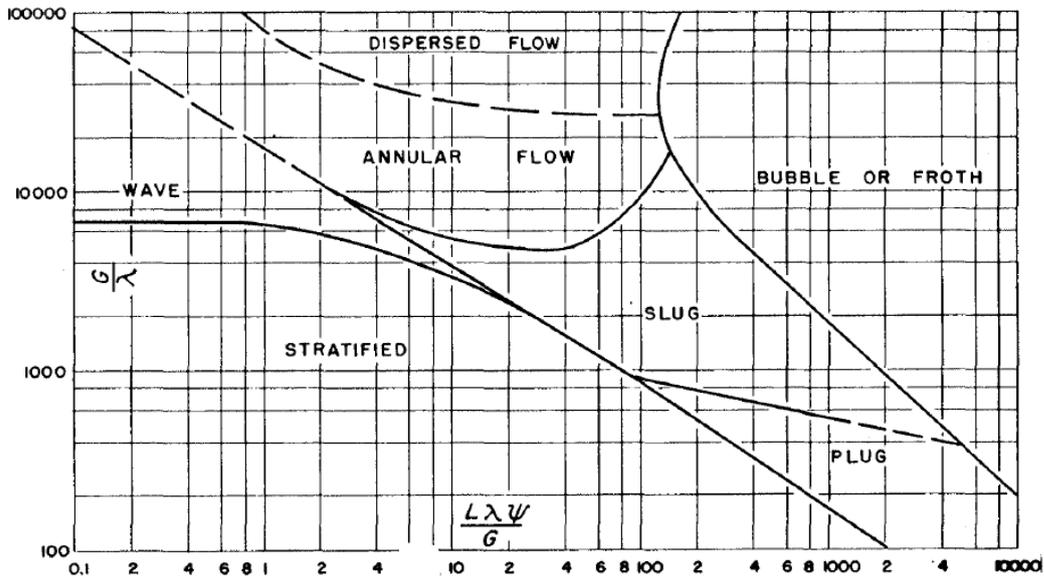


Figura 2.1 - Mapa de padrões de escoamento (Baker, 1954).

Em 1980, o trabalho experimental de Barnea et al. (1980) indicou que o modelo proposto por Taitel e Dukler (1976) era capaz de prever qualitativamente as transições entre padrões de escoamento com variações de até $\pm 30\%$ para inclinações ascendentes. Este modelo mecanicista foi bastante utilizado em pesquisas futuras por diferentes autores. Alguns anos depois, Barnea (1986) propôs o primeiro modelo unificado capaz de prever o mapa de transição entre regimes para todas as faixas de inclinação da tubulação. A primeira parte de seu trabalho consiste em uma vasta revisão bibliográfica sobre os mecanismos de previsão de transição de padrões de escoamento propostos até aquele dado momento.

Outros autores também propuseram novos mapas de padrão de escoamento. Em 2005, Spedding et al. (2005) estudaram escoamento trifásico óleo/água/ar em dutos com configuração horizontal e apresentaram um mapa padrão de escoamento adaptado que pode ser utilizado para prever regimes de escoamento para duas e três fases. De acordo com os autores, a presença da fase líquida, mesmo com um filme de pequena espessura, pode apresentar um efeito

significativo em diversos parâmetros importantes do sistema trifásico.

Para previsão dos padrões de escoamento em modelos computacionais, muitas vezes, é necessário implementar equações de fechamento específicas para cada padrão. Bonizzi et al. (2009) desenvolveram um modelo capaz de prever a transição entre diferentes padrões de escoamento utilizando o mesmo conjunto de equações de fechamento. Este estudo teve boa concordância com os mapas de padrão de escoamento em dutos horizontais ou levemente inclinados.

2.2 Escoamento Anular

O escoamento bifásico anular horizontal é caracterizado pela formação de um filme de líquido não uniforme ao redor da circunferência do duto. Devido à efeitos gravitacionais, a parte inferior do filme é mais espessa. Apesar de existirem diversos estudos disponíveis na literatura sobre este tipo de escoamento, observa-se não haver um consenso sobre os mecanismos responsáveis pela variação da espessura do filme de líquido ao redor da circunferência. Em especial sobre a manutenção do filme de líquido na parte superior da circunferência, apesar dos efeitos da gravidade. De modo geral, escoamentos bifásicos em dutos horizontais são ainda mais complexos em função da assimetria causada pela gravidade.

Conforme apresentado no mapa de padrão de escoamento (Fig. 1.5) o escoamento anular somente ocorre para elevadas velocidades da fase gasosa. Quando combinado com baixa velocidade da fase líquida, gera um filme suave, porém, com aumento da velocidade da fase líquida a interface se torna mais rugosa com a formação de ondas de grande amplitude. Quanto mais elevada for a velocidade do gás, mais gotículas de líquido provenientes das cristas das ondas do filme de líquido serão carregadas para o núcleo de gás. Este fenômeno de transferência de massa é bastante importante no escoamento bifásico anular (Emamzadeh, 2012).

Emamzadeh e Issa (2013) desenvolveram um modelo unidimensional mecanicista para prever a transição de escoamento estratificado para anular em dutos com configuração horizontal. A transição ocorre quando o filme de líquido “molha” toda a circunferência do duto. Isto é determinado considerando o efeito da curvatura da interface, que pelos autores é modelada utilizando uma

configuração geométrica baseada em dois círculos, levando em conta a correlação para o cálculo do ângulo molhado. O fenômeno de entranhamento é considerado no modelo. O mapa padrão de escoamento de Mandhane et al. (1974) foi utilizado para comparar com os resultados obtidos numericamente. Outro parâmetro avaliado foi a influência do diâmetro do duto. Quanto maior o diâmetro, menor é o fator de fricção da interface e a transição de estratificado para anular ocorre em velocidades de gás maiores.

A literatura de escoamento anular horizontal possui diversos trabalhos e diferentes áreas de interesse. Tipicamente, os assuntos mais abordados são: entranhamento de líquido na fase gás, perda de carga ao longo da tubulação, distribuição de espessura do filme de líquido, interações na interface, velocidade e frequência da onda. O presente trabalho se propõe a desenvolver um modelo capaz de prever de forma adequada o padrão de escoamento anular, determinando de forma assertiva o gradiente de pressão e fator de atrito de interface e sendo capaz de identificar as ondulações formadas na interface gás-líquido.

2.2.1 Mecanismos de formação/manutenção do filme de líquido

A distribuição da espessura do filme de líquido ao redor da circunferência da tubulação em escoamento anular horizontal é um tema bastante discutido na literatura. A partir de experimentos de diferentes autores foi observado que a espessura do filme é pequena quando comparada com o raio do duto, sendo tipicamente entre 1/10 à 1/1000 do raio do duto. Os trabalhos também deixam claro, que o filme é assimétrico, sendo mais espesso na parte inferior do duto (Paras e Karabelas, 1991). Farias et al. (2012) apresentam uma visualização do escoamento na seção transversal da tubulação, Fig. 2.2, onde claramente pode-se observar a assimetria do filme de líquido.

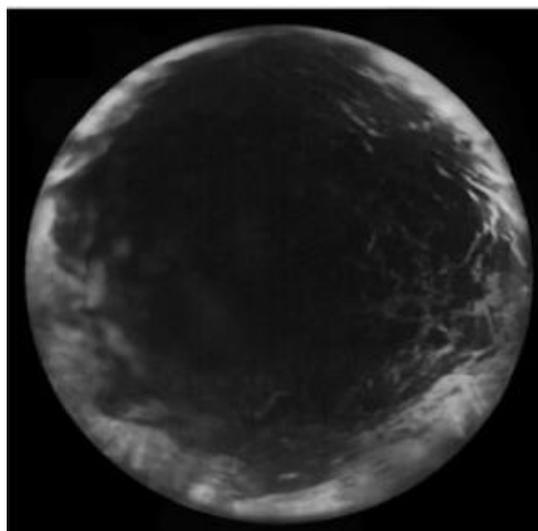


Figura 2.2 - Imagem do filme de líquido capturada por técnica ótica.

Fonte: Farias et al. (2012).

A variação do filme de líquido ao redor da circunferência possui o efeito de formação de uma seção não circular de escoamento de gás e variação da rugosidade na interface do filme de líquido ao redor da circunferência, sendo maior na parte inferior do duto (Fig. 2.3). De acordo com esta hipótese, consequentemente a pressão em baixo é maior e a diferença de pressão causa recirculação da fase gás para a parte superior do duto.

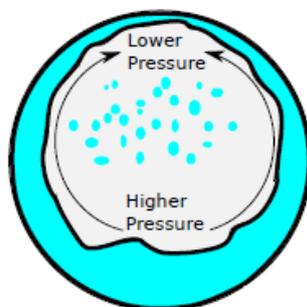


Figura 2.3 – Espalhamento devido ao escoamento secundário de gás. Fonte: Emamzadeh (2012).

Outro tema bastante abordado são os mecanismos responsáveis por manter o filme de líquido na parte superior da tubulação. Ao longo dos anos muitos trabalhos têm discutido sobre tais mecanismos e até hoje não existe unanimidade em relação ao tema.

De acordo com o trabalho de Butterworthe e Pulling (1972) existem 4 mecanismos para manutenção do filme de líquido, são eles:

- Espalhamento do filme de líquido por ação das ondas;
- Transferência de líquido por entranhamento e deposição de gotículas;

- Espalhamento por forças de cisalhamento circunferencial devido ao escoamento secundário de gás;
- Espalhamento por forças de tensão superficial.

É importante frisar, no entanto, que nem todos os autores concordam com os 4 mecanismos acima expostos.

A força do gás nas ondas de interface tem impacto na direção axial e radial. O impacto no eixo radial é responsável pelo movimento de líquido ao redor da circunferência do duto. Este efeito é apresentado de forma esquemática na Fig. 2.4.

Emamzadeh (2012) discute os mecanismos de entranhamento, ressaltando que as gotículas de líquido entranham no gás na parte inferior do duto e se depositam na parte superior (Fig. 2.5). Em seu trabalho, descreve os seguintes quatro mecanismos básicos para descrever o fenômeno de entranhamento, (Fig. 2.6):

- Bloqueio da parte superior das ondas do tipo “roll-waves” pela turbulência do gás (Fig. 2.6a);
- Corte do filme de líquido pela corrente de gás (Fig. 2.6b);
- Quebra de bolhas ou gotículas (Fig. 2.6c);
- Quebra de onda de líquido, impactando na interface do filme de líquido (Fig. 2.6d).

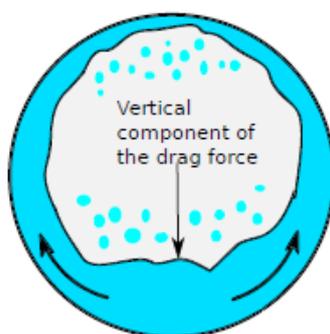


Figura 2.4 – Espalhamento do filme de líquido por ação das ondas. Fonte: Emamzadeh (2012)

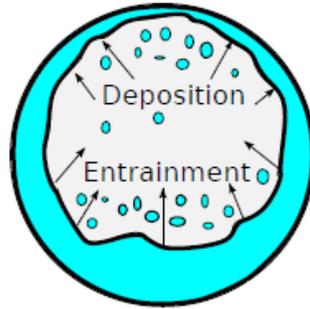


Figura 2.5 – Transferência de líquido por entrainment e deposição de gotículas.
Fonte: Emamzadeh (2012)

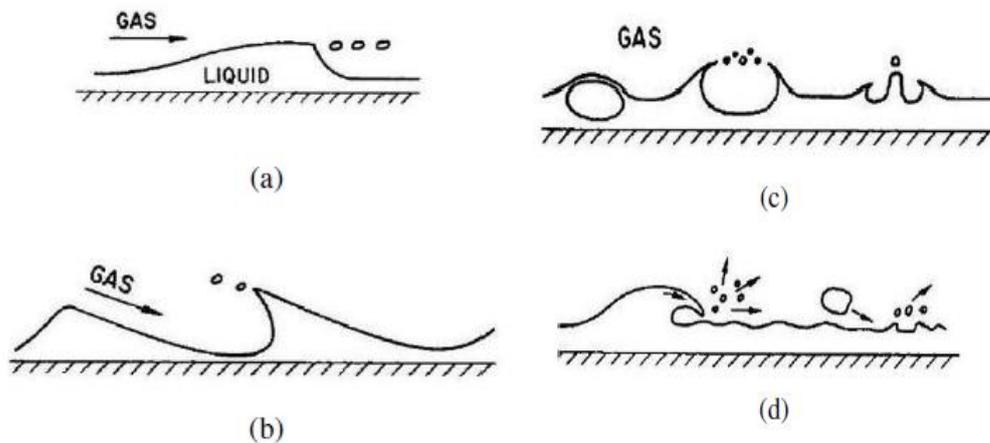


Figura 2.6 – Mecanismos responsáveis pelo entrainment das gotículas
Fonte: Emamzadeh (2012)

Pletcher e MacManus (1965) consideram que a variação na distribuição do filme de líquido ao redor da circunferência e rugosidade são fatores que podem induzir a formação deste escoamento secundário.

Os estudos de Laurinat et al. (1984) e Lin et al. (1985) indicam o escoamento secundário como mecanismo para distribuição da espessura do filme de líquido.

Fukano e Ousake (1989) desenvolveram um modelo teórico para prever a distribuição da espessura do filme na circunferência do duto em escoamento anular horizontal ou levemente inclinado. O modelo se baseia no conceito de modelo de escoamento de ondas de dispersão, que consiste em um filme base e ondas de dispersão. De acordo com este modelo a ação de “bombeamento” das ondas de dispersão permite que o líquido seja transferido para a circunferência apesar do efeito da gravidade. O fluxo secundário de gás e a tensão superficial são considerados, porém, como tendo menor importância na formação do filme de líquido na região superior da circunferência.

Fukano e Ousake (1989) discutem o mecanismo de formação do filme de

líquido, utilizando a Fig. 2.7 para ilustrar que as ondas de dispersão quase sempre são geradas na região inferior e apresentam papel importante na manutenção do filme de líquido formado na região superior do duto. As ondas se propagam na direção axial por diferença de pressão entre a parte de trás e a parte da frente da própria onda. Este processo caracteriza o bombeamento de líquido pela onda de dispersão.

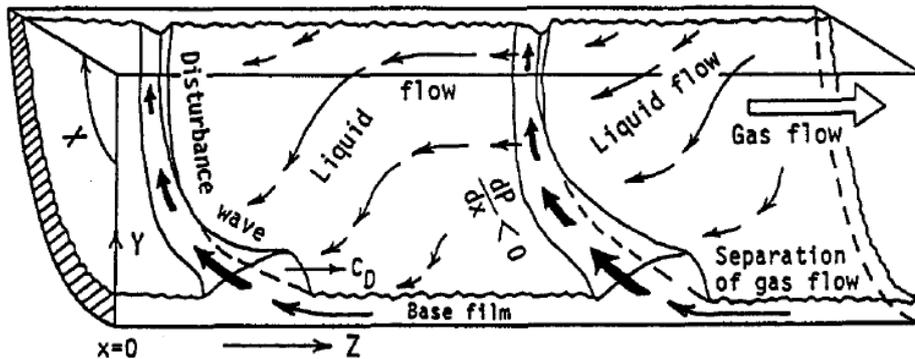


Figura 2.7 - Conceito de bombeamento de líquido por ondas de dispersão. Fonte: Fukano e Ousake (1989).

Hewitt et al. (1990) desenvolveram um novo conceito sobre a estrutura da interface gás-líquido baseado em estudo visual (Fig. 2.8). De acordo com suas observações, o filme de líquido contém fase gasosa em forma de bolhas, sendo elas continuamente entranhadas, quebradas e liberadas no filme de líquido. Este mecanismo deveria aumentar a transferência de calor e massa entre as fases.

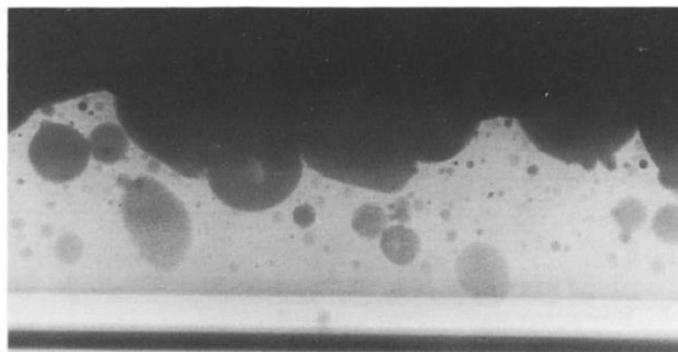


Figura 2.8 - Foto da estrutura do filme de líquido na região inferior de um duto. Fonte: Hewitt et al. (1990).

Azzopardi (1997) também estudou o mecanismo de entranhamento para formação o filme de líquido. De acordo com o autor a maioria das gotas de líquido é criada no filme de líquido pela ação do fluxo de gás na interface. Observações ainda indicam que essas gotículas não são criadas em todo extensão da interface

do filme e que na realidade surgem especificamente a partir das ondas de dispersão. Apesar de sua importância, estudos teóricos foram menos explorados do que estudos experimentais sobre ondas de dispersão.

Muitos autores consideram que a previsão do entranhamento é fundamental para entender o comportamento em escoamento anular e obter relações mais confiáveis para fração volumétrica de líquido e queda de pressão.

Hanratty e Pan (2002) estudaram o fenômeno de entranhamento para líquido com viscosidade próxima à da água. A proposta é definir o entranhamento como um balanço entre as taxas de atomização e de deposição. Foram utilizadas correlações de escoamento anular vertical para prever o entranhamento em configurações horizontais. Os autores também avaliaram a aplicabilidade de correlações de entranhamento em escoamento anular horizontal desenvolvidas para ar e água para prever o comportamento de gás natural ao longo de tubulação. Para baixas velocidades as correlações propostas apresentam boa concordância com os dados experimentais. Observaram ainda que para baixas velocidades de gás o efeito da gravidade é bastante significativo na deposição de gotículas.

O gradiente de pressão e transferência de massa e calor associados ao escoamento depende fortemente do que ocorre na interface gás-líquido e por isso é de extrema importância o desenvolvimento de modelos baseados em estruturas reais, isto é, proveniente de estudos visuais. O conhecimento das propriedades do filme também é essencial para o entendimento dos mecanismos que regem o escoamento anular horizontal.

2.2.2 Filme de líquido

Paras e Karabelas (1991) investigaram a variação da espessura do filme de líquido em diversos dados experimentais para escoamento anular horizontal. Para tanto, sondas foram instaladas em diferentes pontos da circunferência ($\theta=0^\circ$, 45° , 90° , 135° , 180° e 315°) para captar as diferentes espessuras do filme de líquido localmente variando no tempo. A espessura média foi calculada integrando os dados correspondentes a metade da circunferência ($\theta=0^\circ$ - 180°). Este estudo é de particular interesse para o presente trabalho, pois o modelo proposto calcula a espessura média do filme de líquido na circunferência ao longo da tubulação.

A Figura 2.9 apresenta a variação da espessura do filme de líquido, medida

por Paras e Karabelas (1991) em diferentes posições ao redor da circunferência com o tempo. Fica claro que a distribuição do filme é assimétrica e há presença de ondas na interface. Foi observado que para velocidades de gás baixas ($U_{sg} < 40\text{m/s}$) o filme de líquido é bastante assimétrico devido ao efeito da gravidade. Com o aumento da velocidade do gás, a espessura do filme tende a ter uma distribuição mais simétrica ao redor da circunferência, indicando que o efeito da gravidade deixa de ser tão importante.

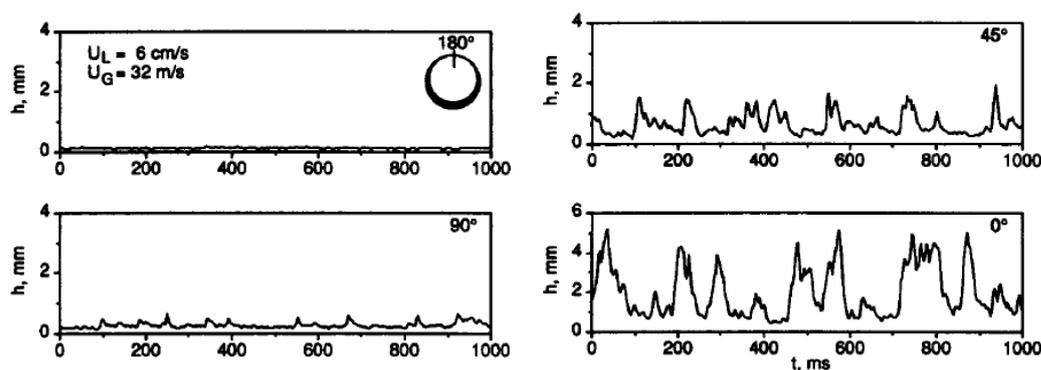


Figura 2.9 - Espessura do filme de líquido medida em diferentes ângulos da circunferência. Fonte: Paras e Karabelas (1991).

No trabalho de Hurlburt e Newell (1997) o efeito da simetria da espessura do filme de líquido e a distribuição desta espessura em escoamento gás-líquido anular horizontal é avaliada. A correlação para a espessura simétrica do filme é baseada no trabalho de Williams et al. (1996) e o modelo para distribuição da espessura é baseado no trabalho de Laurinat et al. (1984).

Dando continuidade a um estudo anterior, Schubring e Shedd (2009) implementaram um modelo com base em um fator de fricção crítico iterativo para prever a distribuição do filme de líquido na circunferência. O modelo proposto pelos autores também pode ser utilizado para estimar a vazão crítica do filme. Foi observado que a assimetria na espessura do filme de base é menos dependente da vazão de líquido do que a espessura média do filme. Para baixas vazões de líquido é esperado que o filme de base transporte a maior parte do líquido no seio do escoamento, desta forma somente o modelo do filme de base precisaria ser modelado para estimar o cisalhamento. Já para altas vazões de gás, a dependência da vazão de líquido se torna menos importante. Outra observação foi que a espessura do filme de base está inversamente relacionada ao fluxo de gás e aumenta com o aumento do fluxo de líquido. Ainda, a espessura do filme e sua

assimetria aumentam com o aumento do diâmetro, sendo que esta dependência não é linear.

Diferentes técnicas ópticas para determinar a espessura e distribuição do filme de líquido são encontradas na literatura. Farias et al. (2012) fizeram um estudo de caracterização do filme de líquido através de fluorescência induzida a laser, com resolução temporal (time-resolved laser-induced fluorescence.) Os fluidos utilizados foram ar/água. Além da espessura do líquido também foram avaliadas as ondas formadas na interface gás-líquido, conforme ilustrado na Fig. 2.10.

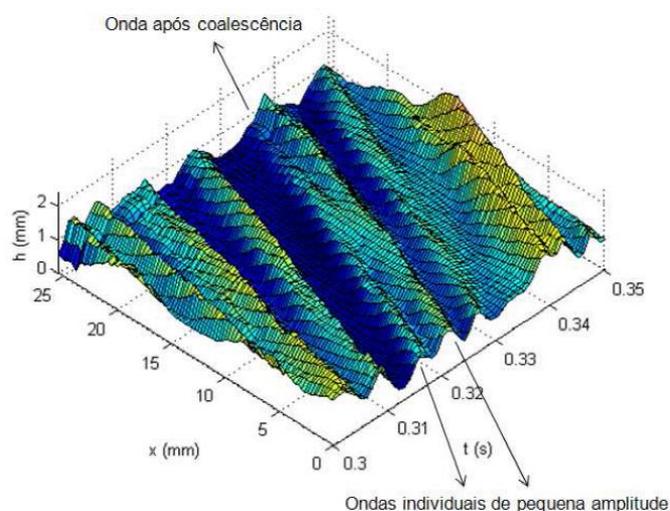


Figura 2.10 – Diagrama espaço-tempo de ondas individuais.
Fonte: Farias et al. (2012).

As interações interfaciais afetam o padrão de escoamento entre as duas fases, e perturbações na interface podem levar à formação de ondas. Essas ondas ou instabilidades não são observadas a baixas velocidades de gás e líquido, pois é necessário um mínimo de força cisalhante entre as fases para gerá-las e isto só ocorre com o aumento da diferença de velocidade entre as fases (Andritsos, 1992). Com o aumento das velocidades, ondas grandes são formadas nas interfaces e são classificadas de acordo com sua configuração em: ondas irregulares e ondas de grande amplitude. Essas ondas também são conhecidas como ondas de dispersão e dependem fortemente da velocidade do líquido.

O foco do trabalho de Schubring e Shedd (2008) é a relação entre as ondas de dispersão e cisalhamento. Foi observado que a velocidade da onda está relacionada com a velocidade de fricção do gás, o que é um indicativo da relação entre o comportamento da onda e do cisalhamento na parede. A dependência da

frequência das ondas com as vazões de gás e líquido varia com o diâmetro do duto. Portanto, pode-se admitir que é necessário utilizar correlações distintas para pequenos e grandes diâmetros.

Jayanti et al. (1990) discutem que em geometria horizontal, a velocidade das ondas na parte superior é maior que a velocidade na parte inferior do duto.

As ondas em escoamento anular horizontal podem ser classificadas em ondas primárias e ondas secundárias, sendo elas formadas devido à instabilidade na parte de trás das ondas primárias. As ondas primárias são caracterizadas por altas velocidades e longo “tempo de vida”, já as secundárias são ondas com curto “tempo de vida”, que por sua vez somente aparecem na parte posterior da curvatura das ondas primárias. Na maior parte dos estudos experimentais sobre a estrutura da onda em escoamento anular, esta classificação das ondas tem como critério a amplitude das ondas.

Em regimes com entranhamento, as ondas primárias são conhecidas como ondas de dispersão e as secundárias como ondulações. Neste caso, as ondas secundárias podem se mover mais rápido ou mais devagar que as ondas primárias. Em regimes sem entranhamento todas as ondas, primárias e secundárias, são conhecidas como ondulações e as ondas secundárias rápidas não aparecem, provavelmente devido à ausência de movimentos de recirculação embaixo das corcovas das ondas primárias, o que por sua vez, é causado pelas baixas amplitudes das ondas primárias.

De acordo com Alekseenko et al. (2008), as ondulações no regime de entranhamento não aparecem aleatoriamente, mas crescem na parte posterior das ondas de perturbação, podendo se mover mais rápido ou devagar que a onda que a gerou.

Alekseenko et al. (2009) fizeram uma avaliação do efeito de entranhamento nas velocidades das ondas secundárias. O objetivo do estudo era obter detalhes sobre a geração das ondas secundárias ou ondulações em regimes com entranhamento e avaliar a estrutura da onda em regimes sem entranhamento. Foi observado que apesar das diferenças nos parâmetros amplitude, comprimento de onda e velocidades, a estrutura da onda em regimes com e sem entranhamento é similar. A dinâmica das ondas secundárias é similar nos dois modelos.

2.2.3 Queda de Pressão

A queda de pressão ao longo do duto em escoamento anular horizontal é um assunto amplamente estudado. Um dos primeiros parâmetros para avaliar se o modelo numérico possui boa concordância com dados experimentais é avaliar o gradiente de pressão. As principais variáveis estudadas que influenciam a previsão do gradiente de pressão são o diâmetro do duto e a espessura do filme de líquido.

De maneira geral, a queda na pressão em escoamentos gás líquido é devido a perdas por gravidade, fricção e aceleração. Para casos de dutos horizontais, as perdas por gravidade podem ser desconsideradas. Uma previsão adequada da fração de volume de líquido é essencial para calcular a queda de pressão devida a fricção, e quando aplicável, a gravidade. A fração de volume do líquido também pode ser interpretada como a espessura do escoamento.

Durante o transporte de gás natural ao longo de dutos, devido a mudanças de pressão e temperatura, pequena quantidade de líquido é formada. Este fenômeno se torna mais importante quanto maiores forem as distâncias assim como quanto mais significativas forem as mudanças de condições de pressão e temperatura. Hamersma e Hart (1987) desenvolveram um modelo para prever o gradiente de pressão neste tipo de situação. As correlações previamente encontradas na literatura, em sua maioria, não eram aplicáveis para escoamento gás líquido com baixo valor de “holdup” (fração volumétrica de líquido). Os fluidos testados foram ar/água e ar/água-glicol e apresentaram boa concordância com os resultados experimentais. Hart et al. (1989) também estudaram o transporte de gás natural e suscetível formação de condensado ao longo da tubulação. Os autores desenvolveram um modelo chamado de “superfície aparentemente áspera” e através de experimentos com fluidos ar-água e ar-água-etilenoglicol validaram o modelo proposto. Usualmente o fator de fricção da interface é derivado de fatores de fricção para dutos ásperos, onde a “rugosidade da areia” é uma medida para a rugosidade interfacial. Os autores observaram, entretanto, que a tensão interfacial do sistema gás líquido não tem efeito significativo na fração de volume de líquido.

Laurinat et al. (1984) também estudaram o efeito da queda de pressão em dutos horizontais com regime de escoamento anular para os fluidos ar-água. Seus experimentos indicaram que a queda de pressão devido a fricção está diretamente

relacionada as propriedades do filme de líquido e aparenta ser independente da quantidade de líquido entranhado. O efeito do diâmetro do duto no gradiente de pressão também foi avaliado. De acordo com os autores o principal mecanismo para manter a distribuição da espessura de filme de líquido ao longo da circunferência é o entranhamento. Com base nos experimentos realizados os autores puderam concluir que o gradiente de pressão depende de perdas por fricção e pela aceleração do gás e das gotículas devido a mudança da velocidade do gás em função da diminuição da pressão.

Garcia et al. (2007) desenvolveram duas correlações para estimativa do gradiente de pressão baseadas no fator de atrito de Fanning, que consideram o efeito da velocidade relativa das fases, a partir de uma base de dados com mais de 2.000 experimentos em tubulações horizontais. Ambas as correlações propõem os coeficientes utilizados no cálculo do gradiente de pressão a partir de valor da fração volumétrica do líquido. Para a “Correlação Universal para Fator de Atrito Gás Líquido” a única informação necessária para determinar os coeficientes da correlação é a fração volumétrica do líquido, não sendo necessário conhecimento prévio do regime de escoamento do caso estudado. É de particular interesse para o momento inicial do estudo quando ainda não é imprescindível uma precisão grande sobre as informações. Já para a “Correlação para Fator de Atrito Gás Líquido por Padrão de Escoamento” além da fração volumétrica do líquido é necessário conhecer o regime de escoamento.

Li et al. (2013) desenvolveram um modelo bifásico não-Newtoniano (para fase líquida) para escoamento anular horizontal para prever gradiente de pressão e espessura do filme. No modelo proposto os fluxos de gás e de líquido não-Newtoniano são calculados separadamente, sendo o balanço da tensão de cisalhamento na interface utilizado para conectar as duas fases. Uma das grandes contribuições deste modelo foi utilizar o conceito de fluido não-Newtoniano para a fase líquida, tornando-a assim mais realista, para determinados tipos de óleos encontrados na prática. Apesar de ser mais realista quanto a modelagem da fase líquida, o modelo assume distribuição simétrica do filme de líquido ao redor da circunferência.

Com frequência a perda de carga por fricção é avaliada combinando as contribuições devido ao atrito viscoso de cada uma das fases. Diversas correlações para cálculo do fator de atrito podem ser encontradas na literatura. Uma das

correlações mais antigas para avaliar o fator de atrito e até hoje muito utilizada é a proposta por Taitel e Dukler (1976). Esta correlação foi vastamente testada no código computacional do grupo de CFD da PUC-Rio, para escoamento estratificado ou intermitente, e apresenta boa concordância com os resultados experimentais.

No caso de escoamento estratificado, ou intermitente, pode-se utilizar a mesma correlação para as duas fases e interface, simplesmente variando as dimensões e velocidades características, ou pode-se desenvolver correlações específicas. No caso de escoamento anular, não há tensão cisalhante entre o gás e a parede, pois o gás escoar no centro. Porém, geralmente, as correlações para o fator de atrito na interface dependem diretamente do fator de atrito utilizado para a fase gasosa, como a correlação de Crowley et al. (1992), onde o fator de atrito para a interface é simplesmente 5 vezes o fator de atrito da fase gasosa. A correlação de Taitel e Dukler (1976) também é utilizada para escoamento anular. No entanto, sua aplicação é limitada para baixas velocidades superficiais de gás e, conseqüentemente, para interfaces “suaves”.

Ottens et al. (2001) fizeram um amplo estudo sobre as correlações de fator de atrito na interface mais comumente encontradas na literatura e propuseram uma correlação. Os autores assumem que a transferência de quantidade de movimento das fases gás e líquido depende do formato da interface, sendo bastante dependente da velocidade da onda.

Emamzadeh (2012) faz uma avaliação rigorosa da melhor combinação de fatores de atrito para fase gasosa, líquida e interface. Os resultados de suas simulações são comparados com dados experimentais e o autor finalmente propõe utilizar as correlações de Taitel e Dukler (1976), Hamersma e Hart (1987) e Ottens et al. (2001) para, respectivamente, cálculo do fator de atrito da fase gasosa, líquida e interface. O seu estudo teve como objetivo propor modelo adequado para prever escoamento anular horizontal e vertical.

2.3 Fluidos Reais

Na literatura de padrões de escoamento é difícil encontrar dados completos (composição e propriedades termodinâmicas) de escoamento real de gás natural e óleo. Em sua grande maioria, conforme podem ser observados pelas referências

citadas no presente trabalho, os fluidos utilizados em experimentos são ar e água. Conseqüentemente os modelos numéricos, por motivos de validação dos códigos, são desenvolvidos para fluido ar-água. Alguns trabalhos consideram como fluidos, por exemplo, N₂-água, gás natural-água ou ar-hidrocarbonetos, para tornar o escoamento mais próximo às aplicações da indústria do petróleo. Um dos objetivos do presente trabalho é tornar o modelo mais realista a aplicação na indústria através da modelagem real do gás, com base em sua composição e propriedades termodinâmicas, e do óleo, com base em suas propriedades termodinâmicas.

Para melhor compreender a evolução histórica dos estudos relacionados ao comportamento dos gases que levaram ao desenvolvimento/evolução das equações de estado, será apresentada uma rápida evolução cronológica nos parágrafos a seguir.

2.3.1 Modelos de Gás Real

Os primeiros estudos relevantes acerca do comportamento dos gases remontam ao século XVII, ao físico e químico irlandês Robert Boyle que, em 1660, realizou experimentos importantes com gases. Dando continuidade a este estudo, em 1667 o físico francês Edme Mariotte publicou suas descobertas, criando a Lei Boyle-Mariotte. De acordo com ambos estudos, a variação da pressão é inversamente proporcional a variação do volume, à temperatura constante (transformação isotérmica).

Mais de 100 anos se passaram para que então estudos relevantes sobre gases, agora analisando a relação entre temperatura e volume, à pressão constante, fossem publicados. Em 1787, Jacques Charles realizou seu primeiro experimento, seguido de Louis Joseph Gay-Lussac em 1802. Ambos obtiveram os mesmos resultados: para uma dada pressão, o volume de gás varia linearmente com a temperatura. Este enunciado ficou conhecido como Lei de Charles e Gay-Lussac (transformação isobárica). Dando continuidade a este raciocínio e experimento, a segunda Lei de Charles e Gay-Lussac pode ser enunciada da seguinte forma: a volume constante, as pressões de uma massa gasosa variam linearmente com a temperatura (transformação isocórica).

Em 1811 Amedeu Avogadro formulou a hipótese, hoje conhecida como

Lei de Avogadro, de que volumes iguais de gases diferentes contêm o mesmo número de moléculas, quando avaliados nas mesmas condições de pressão e temperatura. Este foi o primeiro cientista a chamar os então “átomos compostos resultantes de uma ligação química” de moléculas.

A famosa Lei dos Gases Ideias (Eq. 2.1) foi formulada por B. P. Emil Clapeyron em 1834, baseada nos trabalhos experimentais e observações dos cientistas apresentados acima (Boyle, Charles, Gay-Lussac e Avogadro).

$$P\forall = nRT \quad (2.1)$$

onde P e \forall correspondem à pressão e volume molar, n número de moles, R constante de gás e T temperatura.

Poucos anos após a formulação da equação da Lei dos Gases Ideais, J. D. Van der Waals observou que o comportamento dos gases reais não estava sendo representado adequadamente. Este foi o primeiro cientista a propor uma equação de estado para prever o comportamento de gases reais. A equação formulada por Clapeyron não previa a existência de forças atrativas/repulsivas entre as partículas do gás e, ainda, considerava como nulo o volume de cada partícula. Assim, em 1873, Van der Waals acrescentou 2 novos parâmetros (relacionados as forças intermoleculares e ao tamanho) na equação da Lei dos Gases Ideais. Sua equação passou a ser conhecida como Equação de Van der Waals para Gases Reais.

$$\left(P + \frac{n^2 a}{\forall^2}\right)(\forall - nb) = nRT \quad (2.2)$$

onde o termo $\frac{n^2 a}{\forall^2}$ corrige a pressão e nb é um termo função do diâmetro esférico da molécula de gás.

Devido ao efeito das forças intermoleculares, a pressão prevista pela equação de Van der Waals é menor que a prevista pela Lei dos Gases Ideais.

Nas condições de pressão e temperatura moderadas, a maioria dos gases se comporta como ideal. Com os avanços tecnológicos e, portanto, possibilidade de impor condições mais extremas, desvios da idealidade do comportamento se tornaram cada vez mais notáveis, incentivando mais estudos neste campo. Van der Waals foi somente o primeiro cientista a buscar um melhor modelo, sendo seguido por inúmeros outros. Alguns dos trabalhos mais importantes no desenvolvimento de novas equações de estado serão apresentados a seguir.

O desvio da idealidade da equação da Lei dos Gases Ideias é representado pelo coeficiente de compressibilidade, Z . Desta forma, podemos escrever a Lei dos Gases Reais da seguinte forma.

$$Pv = Z nRT \quad (2.3)$$

Na indústria do petróleo torna-se particularmente importante prever o comportamento da fase gasosa para, por exemplo, prever o regime de escoamento ao longo do duto. Durante o transporte ao longo das tubulações as duas fases (gás e líquido) estão sujeitas a atuação de diversos fatores, sendo os principais: gravidade, viscosidade, diferenças de densidades, diferença entre as velocidades relativas das fases e turbulência. Uma correta modelagem das fases é, portanto, imprescindível para obtenção de resultados realistas.

A equação mais comumente utilizada neste setor é a Equação de Estado (ou EoS, do inglês “Equation of State”) de Peng-Robinson (EoS PR). Outra, também muitas vezes observada é a Equação de Estado de Soave-Redlich-Kwong (EoS SRK).

A EoS SRK rapidamente foi aceita pela indústria de processamento de hidrocarbonetos devido a sua simplicidade quando comparada a equações mais complexas como equação BWR (Nishiumi, 1980; Lin e Hopke, 1974) e por sua capacidade de gerar resultados precisos nos cálculos do equilíbrio líquido-vapor. A EoS PR gera resultados similares aos obtidos pela EoS SRK, entretanto, em geral é melhor para estimar densidade de líquidos, principalmente apolares (Peng e Robinson, 1976).

Muitos problemas de Garantia de Escoamento podem ser resolvidos através de projetos e protocolos operacionais adequados se os regimes de escoamento forem conhecidos. A variação dos perfis de composição das fases ao longo do duto influencia diretamente o padrão de escoamento. Zaghoul et al. (2009) desenvolveram um modelo composicional capaz de simular o comportamento de um sistema gás-água, utilizando a EoS PR para os cálculos do equilíbrio bifásico. O conceito de equilíbrio de fases é utilizado para prever a formação, quantidade e composição da fase aquosa. Sendo, portanto, de particular interesse para engenheiros de Garantia de Escoamento para avaliar a formação de hidratos e corrosão.

No trabalho de Haghghi et al. (2003) cinco EoS foram testadas para avaliar

sua capacidade de prever a curva de inversão do coeficiente Joule-Thomson. Dentre elas, duas versões modificadas da EoS SRK (equação de SRK modificada por Graboski, MSRK1, e equação de SRK modificada por Peneloux e Rauzy, MSKR2) e uma versão modificada da EoS PR (equação de PR modificada por Rauzy, PRmr). Com exceção da EoS MMM, todas as outras apresentaram boa previsão para casos de baixa temperatura da curva de inversão. Já no lado de alta temperatura e no pico se mostraram muito sensíveis à escolha da EoS.

2.3.2 Escoamentos Óleo-Gás

Lu et al. (2007) estudaram a transição entre os regimes de escoamento para fluido óleo- N_2 com configuração horizontal. Somente 3 padrões de escoamento são observados nos experimentos montados, sendo eles estratificado, ondulado e intermitente. Apesar desta limitação este estudo enfatiza a necessidade da indústria de óleo e gás em desenvolver modelos numéricos mais realistas quanto aos fluidos simulados.

Outra tentativa de tornar a modelagem mais realista foi proposta por Gokcal et al. (2008) no estudo do efeito de óleos com alta viscosidade no escoamento em dutos horizontais de óleo e gás. Óleos com elevada viscosidade ou “óleos pesados” representam boa parte do cenário atual de exploração e produção. Foi observado que os modelos existentes (modelo unificado – Zhang et al., 2006, e modelo mecanicista – Xiao et al., 1990) apresentam grande discrepância quando comparados com resultados experimentais desse tipo de fluido. Após modificações, boa concordância com gradiente de pressão e fração de volume de líquido foram obtidas.

O efeito do resfriamento ou aquecimento da fase gasosa ainda não foi muito estudado. Cazarez-Candia et al. (2011) avaliaram este efeito no comportamento hidrodinâmico de um escoamento bifásico formado por líquido (mistura de óleo com água, com máxima fração molar ou mássica de 5%) e gás através de dutos de óleo e um modelo numérico de estabilidade.

No trabalho de Cazarez-Candia (2011), o perfil de temperatura não variou significativamente quando considerado o coeficiente Joule-Thomson. No entanto, sua introdução foi de importante influência para melhorar a estabilidade numérica no perfil da velocidade do gás. Estes resultados indicam que o coeficiente Joule-

Thomson não afeta nas predições físicas do problema, mas influencia no modelo de estabilidade. Tal observação deve ser estudada em maior detalhe.

Informações sobre escoamento bifásico na literatura de engenharia de petróleo são limitadas. Grande parte das publicações assume que a temperatura é constante ao longo de todo domínio. Em alguns casos, o perfil de temperatura versus distância é especificado para refletir as mudanças devido a trocas com o ambiente. Efeitos de temperatura transiente são negligenciados nesses modelos baseados no fato de que para longas tubulações com variações pequenas de pressão o fluido irá atingir equilíbrio térmico com a parede do duto rapidamente.

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento de um código computacional aplicado a escoamento bifásico em regime anular de hidrocarbonetos assim como para pares de gás-líquido menos complexos como ar-água. Apesar de o estudo ter sido direcionado para o escoamento em regime anular, outros padrões também podem ser obtidos. Uma das contribuições deste estudo ao código original foi a implementação da Equação de Estado de Peng-Robinson para modelar a fase gasosa como gás real. Isto correspondeu a uma modificação nos dados de entrada do gás uma vez que para fazer uso desta implementação é necessária a introdução da composição percentual dos hidrocarbonetos presentes no gás natural.