

2 Revisão Bibliográfica

No escoamento bifásico anular horizontal, o líquido escoia sob forma de um filme não uniforme de pequena espessura, que reveste a parede do tubo. O núcleo gasoso é turbulento devido às altas vazões mássicas de gás características deste escoamento. Altas vazões de gás causam o arrancamento de pequenas gotículas de líquido do filme, as quais são entranhadas na fase gasosa, contribuindo para o transporte global do líquido. A interface entre o filme líquido e o núcleo de gás é dinâmica, apresentando uma topografia irregular, devido ao forte cisalhamento existente entre as fases.

Dois tipos de perturbações presentes na interface entre o filme de líquido e o núcleo de gás afetam fortemente os processos de transporte entre as fases, e a dinâmica do escoamento anular. A primeira consiste de pequenas perturbações, *ripples*, cujas características principais são a baixa amplitude, pequeno comprimento e alta frequência, que surgem com baixa velocidade continuamente na superfície do filme de líquido. O segundo tipo de perturbação é caracterizado por grandes ondas, *disturbance waves*, que apresentam grandes amplitudes e comprimentos, além de apresentarem-se com menor frequência e movendo-se com velocidade superior à da superfície do filme base. A amplitude destas grandes ondas pode ser várias vezes maior que a espessura do filme líquido base, carregando ativamente massa de líquido no sentido do escoamento.

A literatura sobre escoamento bifásico anular horizontal é composta por diversos estudos que vêm sendo realizados ao longo de décadas de pesquisas. Esse interesse continuado é, provavelmente, sinal da relevância e complexidade deste tipo de escoamento. Dentre a relação de parâmetros de interesse para estudos científicos sobre este padrão de escoamento, destacam-se as taxas de entranhamento de líquido no núcleo de gás, a transferência de massa de líquido para a fase gasosa, a tensão cisalhante na parede, a perda de carga ao longo da tubulação, distribuição de espessura do filme de líquido, a velocidade local das fases, e a frequência e velocidade das ondas.

2.1. Mecanismos de Redistribuição do Filme de Líquido

Na literatura observa-se não haver ainda um consenso sobre os mecanismos responsáveis pela distribuição do líquido ao longo da circunferência do tubo e, em particular, sobre os principais mecanismos que mantêm o filme na parede superior do tubo, compensando a drenagem causada pela gravidade. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura apresenta como possível explicação para a redistribuição circunferencial do filme de líquido um, ou uma combinação, dos mecanismos descritos a seguir.

- Escoamento secundário no núcleo gasoso

Pletcher & McManus (1965) propuseram um mecanismo baseado no arraste na direção circunferencial produzido sobre o filme de líquido pelo escoamento secundário de gás presente no tubo. Segundo os autores, este escoamento secundário de gás seria induzido pela não uniformidade da rugosidade interfacial na direção circunferencial. A não uniformidade na rugosidade é relacionada com a não uniformidade na espessura do filme de líquido ao longo da circunferência do tubo. Os trabalhos de Laurinat *et al.* (1985) e Lin *et al.* (1985) mostram que o escoamento secundário no gás contribui para a distribuição do filme de líquido. Belt (2007) inclui também a não uniformidade na concentração das gotas de líquido entranhadas no núcleo gasoso como um fator adicional indutor do escoamento secundário. A Figura 2.1, retirada do trabalho de Belt (2007), apresenta uma representação esquemática do mecanismo descrito.

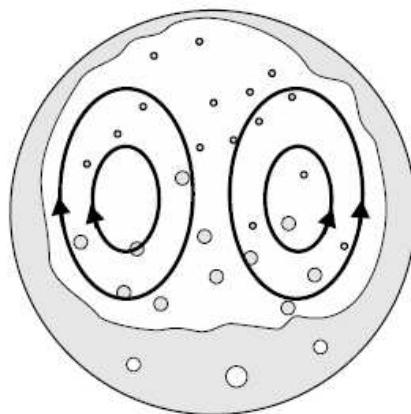


Figura 2.1 - Representação esquemática para o mecanismo de escoamento secundário de gás, possivelmente responsável pela redistribuição do filme de líquido (figura retirada de Belt, 2007).

- Mecanismo de espalhamento do filme pela passagem da onda

Butterworth & Pulling (1972) propuseram o mecanismo de redistribuição do filme de líquido (*wave spreading*) baseado na suposição de que as ondas de grande amplitude, apesar de circunferencialmente coerentes, deslocam-se de modo inclinado devido às suas maiores velocidades na parte inferior do tubo. Estas maiores velocidades de deslocamento estariam relacionadas com as maiores espessuras do filme de líquido nesta posição no tubo. A tensão cisalhante interfacial promovida pelo escoamento do gás sobre a onda distorcida apresentaria, segundo os autores, uma componente na direção circunferencial que seria a responsável pelo movimento ascendente do líquido ao longo da circunferência do tubo. É importante ressaltar o comentário de Belt (2007) indicando que em seus experimentos nem sempre foram observadas ondas distorcidas. Este autor menciona ainda que no próprio trabalho onde foi proposto o mecanismo de espalhamento da onda, Butterworth & Pulling (1972) também mencionam a presença de ondas não distorcidas. Assim, a relevância deste mecanismo pode ser questionada. A Figura 2.2 apresenta de maneira esquemática o mecanismo descrito.

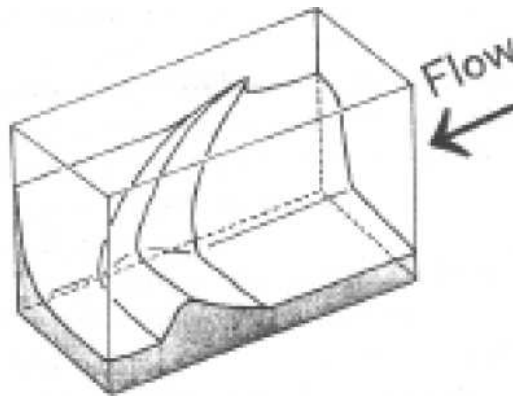


Figura 2.2 - Representação esquemática do mecanismo de espalhamento do filme de líquido pela passagem da onda (figura retirada de Kopplin, 2004).

- Mecanismo de bombeamento pelas ondas

Este mecanismo, conhecido na literatura como *wave pumping*, foi proposto por Fukano & Ousaka (1989). Trata-se de um mecanismo onde o líquido é bombeado para a parte superior do tubo pelo interior da onda, sem que seja necessária a hipótese de distorção da onda. De acordo com os autores, o escoamento do gás sobre uma onda de espessura variável a longo de sua circunferência induziria um gradiente de pressão

também não uniforme circunferencialmente. Esta diferença de pressão induziria o escoamento ascendente de líquido. Para Fukano & Ousaka (1989), as ondas são o fator principal para formar e manter o filme líquido na parte superior do tubo. Entretanto, entre a passagem das ondas, o filme líquido drena continuamente para baixo devido à ação da gravidade. A Figura 2.3, retirada do trabalho de Kopplin (2004) ilustra o mecanismo de bombeamento de líquido descrito.

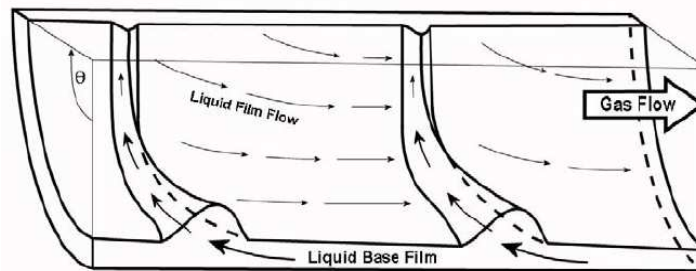


Figura 2.3 – Representação esquemática do mecanismo de bombeamento pelas ondas (figura retirada de Kopplin, 2004).

- Mecanismo de entranhamento e deposição de gotas

A interação do escoamento do gás com a crista das ondas de líquido pode acarretar no arrancamento de gotas que seriam entranhadas na corrente de gás e, eventualmente, reincorporadas ao filme de líquido em uma posição a jusante do ponto de arrancamento, contribuindo para a manutenção do filme superior de líquido. Este mecanismo foi proposto inicialmente por Russel & Lamb (1965).

Como mencionado por Belt (2007), diversos trabalhos disponíveis na literatura apresentam boa concordância com experimentos no que diz respeito à previsão da distribuição circunferencial da espessura do filme, apesar de serem baseados em mecanismos distintos de redistribuição do filme de líquido, como os apresentados acima. Esta constatação é uma indicação que os fundamentos que governam este escoamento ainda não são completamente entendidos e que, combinações de mais de um destes mecanismos podem prevalecer dependendo dos parâmetros globais que controlam o escoamento ou mesmo da configuração geométrica.

Recentemente, Oliveira & Portela (2010) demonstraram através de experimentos numéricos com configurações de filme de líquido idealizadas, que

gradientes axiais da tensão cisalhante interfacial podem induzir tensões interfaciais na direção circunferencial. Estas tensões seriam responsáveis pela manutenção do filme de líquido superior, contrabalançando o efeito gravitacional. Trata-se, portanto, de mais um modelo para explicar a redistribuição do filme de líquido, o que corrobora a afirmação feita anteriormente que ainda não há consenso sobre a física que governa este escoamento.

2.2. Estudos Experimentais em Escoamentos Anulares

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver técnicas experimentais que permitam extrair dados qualitativos e quantitativos sobre a estrutura do escoamento anular, e que auxiliem no entendimento dos mecanismos que governam este padrão de escoamento bifásico. Portanto, nesta seção serão apresentados os principais trabalhos experimentais disponíveis na literatura que têm como objetivo o estudo da estrutura do escoamento bifásico anular. O foco destes trabalhos foi a caracterização do filme de líquido, através da medição da variação temporal da espessura do filme, da distribuição de frequências e velocidades das grandes ondas.

Técnicas de visualização de escoamentos têm sido amplamente utilizadas como ferramentas para auxiliar na caracterização do comportamento transiente do filme de líquido. A leitura dos trabalhos disponíveis em ordem cronológica mostra que as diferentes técnicas de visualização utilizadas acompanharam, ao longo dos anos, o desenvolvimento das tecnologias disponíveis para a captura de imagens.

Taylor & Nedderman (1968) e Butterworth & Pulling (1972) usaram cinematografia de alta velocidade com iluminação externa contínua e com injeção de corante no escoamento. Mais tarde, sistemas de vídeo de alta frequência de captura de imagens foram usados por Hewitt *et al.* (1990), substituindo os sistemas baseados em filmes químicos, que demandavam muito tempo de processamento.

A técnica de ativação fotocrômica de corante foi usada para gerar traçadores no filme líquido, cujo movimento era registrado por câmeras de alta velocidade com iluminação de fundo (Sutharshan *et al.*, 1995). A análise das imagens digitais capturadas gerou informações qualitativas relevantes sobre os efeitos da passagem de onda nas velocidades axial e radial do filme de líquido.

A espessura média típica do filme de líquido em escoamentos anulares varia de alguns micrômetros a poucos milímetros. A visualização de dimensões tão pequenas nas vizinhanças de uma parede sólida é um desafio para técnicas ópticas. Hewitt et al. (1990) usaram um tubo constituído de *FEP*, *Fluorinated Ethylene Propylene*, um material que apresenta um índice de refração praticamente igual ao da água, o que minimizou as distorções nas imagens nas regiões próximas à parede do tubo.

Shedd & Newell (1998) determinaram a variação temporal da espessura do filme de líquido utilizando uma técnica baseada no princípio da reflexão total da luz proveniente de um LED posicionado na superfície externa do tubo e emitindo luz em direção à interface líquido-gás. A reflexão da luz era capturada por uma câmera digital, sendo o afastamento lateral dos raios refletidos convertido em espessura de filme de líquido através de um processo de calibração. Esta técnica tem sido usada com sucesso pelo mesmo grupo de pesquisadores em trabalhos onde as características das ondas de líquido são analisadas e correlacionadas com as vazões das fases (Schubring & Shedd, 2008, 2009a e 2009b).

Rodríguez & Shedd (2004) empregaram uma técnica de fluorescência planar induzida a laser (*Planar Laser Induced Fluorescence - PLIF*) como método de separação da luz emitida pelo líquido daquela muito mais intensa refletida pela interface gás-líquido. Filtros ópticos posicionados à frente da câmera digital permitiam apenas a passagem da luz proveniente do material fluorescente dissolvido no líquido. Neste trabalho, os autores estudaram o escoamento horizontal anular bifásico ar-água com o objetivo de obter imagens do filme líquido e observar o comportamento das ondas interfaciais na circunferência da tubulação. Esta foi uma das técnicas utilizadas no presente trabalho, e será descrita com mais detalhes no Capítulo 3.

Uma interessante técnica baseada na fluorescência induzida por plano de laser foi recentemente utilizada por pesquisadores russos (Alekseenko et al., 2008, 2009a, 2009b e 2010). Na técnica, um plano de luz laser contínua de intensidade não necessariamente elevada, cerca de 50 mW, ilumina uma seção longitudinal do escoamento anular. O líquido é uma solução de água e rodamina, a substância fluorescente. Uma câmera digital registra o sinal de fluorescência emitido pela porção do filme de líquido iluminado pelo plano laser. Ao contrário de outras técnicas de fluorescência, como a proposta no presente trabalho, onde uma imagem instantânea do filme de líquido é capturada em cada quadro, nesta técnica captura-se apenas o nível de intensidade do sinal de fluorescência. Este

sinal é então posteriormente relacionado com a espessura instantânea do filme através de um procedimento de calibração estático. A câmera digital empregada é uma câmera linear de alta frequência de captura. Esta câmera é formada por uma única linha de 1024 sensores de imagem do tipo CMOS. Assim, sua resolução espacial é de 1024x1 *pixels*. Cada *pixel* do sensor da câmera oferece uma faixa dinâmica de 10 bits, ou seja, o sinal de intensidade de fluorescência correspondendo à espessura do filme podia ser discretizado em 1024 intervalos, fornecendo boa resolução na altura do filme. Os resultados obtidos pelos pesquisadores com esta técnica sobre a interação das pequenas e grandes ondas de líquido no escoamento anular são bastante interessantes.

A pesquisa bibliográfica revelou apenas um trabalho onde técnicas ópticas foram utilizadas para medir o perfil instantâneo de velocidade no filme de líquido. Trata-se do trabalho de Kopplin (2004) onde a velocimetria por imagem de partículas (*Particle Image Velocimetry – PIV*) e por acompanhamento de partículas (*Particle Tracking Velocimetry – PTV*) foram adaptadas para permitir a medição nas pequenas espessuras típicas do filme de líquido. A leitura do trabalho, no entanto, mostra que os resultados obtidos não foram satisfatórios.

Como foi apresentado nesta breve revisão, as técnicas ópticas evoluíram de um estágio onde forneciam apenas informações qualitativas sobre o escoamentos para a produção de resultados quantitativos de boa exatidão. No entanto, a maior parte dos trabalhos publicados na literatura sobre a estrutura do escoamento anular bifásico foi obtida por meio de sondas pontuais baseadas em princípios elétricos. A seguir é apresentada uma breve revisão dos principais trabalhos que utilizaram técnicas elétricas no estudo de escoamentos bifásicos anulares. O objetivo da descrição é mencionar o tipo de técnica empregada em cada trabalho e não os resultados físicos obtidos. Estes, quando considerados pertinentes, serão comentados no Capítulo 8, onde os resultados obtidos no presente trabalho são apresentados e discutidos.

Apesar de técnicas elétricas incluírem sensores capacitivos e condutivos, a pesquisa bibliográfica realizada revelou estudos relacionados a escoamentos anulares horizontais empregando apenas sondas condutivas. As sondas condutivas funcionam baseadas na diferença entre as resistividades do líquido e do gás. Dois eletrodos são posicionados no escoamento e alimentados por uma fonte, normalmente, de corrente alternada. A voltagem gerada pela sonda condutiva é registrada, assim como a condutância do fluido naquela posição. Esta condutância pode ser relacionada à espessura do filme por um processo de calibração. A resposta destas sondas pode atingir alguns kHz e as diversas

configurações implementadas diferem na forma e dimensões dos eletrodos. Normalmente, sondas de fios paralelos posicionados dentro do tubo são mais adequadas para a medição de filmes com maior espessura. Para filmes mais finos, eletrodos montados rente à superfície interna do tubo dão bons resultados.

Russel & Lamb (1965), aparentemente, realizaram o primeiro trabalho utilizando sondas condutivas para a medição da espessura de filme de líquido no escoamento anular horizontal. A sonda condutiva era formada por um fio fino montado em uma sonda radial ligada a um eletrodo montado rente à parede interna do tubo. Uma solução salina era injetada por uma seringa em uma posição a montante da posição da sonda condutiva aumentando a condutividade elétrica do líquido e, portanto, a resposta da sonda. Diversos outros trabalhos utilizando sondas condutivas foram realizados utilizando sondas com geometrias similares (Coney, 1973, Brown et al., 1978, Zabarar et al., 1986).

Fukano et al. (1983 e 1989) utilizaram uma sonda condutiva, alimentada por fonte de corrente contínua, onde um dos eletrodos era formado por uma agulha fina de platina enquanto o segundo eletrodo era montado na superfície interna do tubo. Laurinat et al. (1985) empregaram 8 sondas com dois fios paralelos imersos no filme de líquido montados a 45°, associados a sondas montadas na superfície. Jayanti et al. (1990) e Paras & Karabelas (1991) utilizaram sondas de dois fios para determinar as propriedades estatísticas e espectrais do filme de líquido. Várias sondas foram distribuídas ao longo da circunferência do tubo em duas posições axiais. Desta forma foi possível correlacionar os sinais de duas sondas com mesma posição angular para determinar a velocidade de propagação das ondas no filme. Geraci et al. (2007) aplicaram técnica semelhante no estudo do escoamento anular vertical.

Um grande avanço na medição das características dinâmicas de filmes de líquido em escoamento bifásico anular foi apresentado no trabalho de Belt et al. (2010). Esta técnica é uma adaptação da técnica intrusiva baseada na medição da condutividade entre grupos de fios formando uma matriz de sensores. Esta técnica tem sido muito utilizada em diversos estudos de escoamentos bifásicos, sendo conhecida pelo nome em inglês *wire mesh* (Prasser, 1998). Sua principal característica é a capacidade de medição em múltiplas posições simultaneamente. Para a utilização em escoamentos anulares, os autores criaram uma nova concepção da técnica onde os sensores são montados rente às paredes, alternando grupos de eletrodos circulares de pequenas dimensões com eletrodos na forma de anéis. Ao todo, 320 eletrodos sensores foram utilizados, 32 eletrodos distribuídos na circunferência do tubo, em 10 diferentes

posições axiais. A leitura de todos os eletrodos é feita por um circuito eletrônico que tipicamente completa um ciclo de aquisição de valores de espessura de filme nos 320 pontos de leitura em cerca de 0,2 ms. Aparentemente, tecnologias baseadas no conceito de *wire mesh* serão dominantes nos próximos anos, no que diz respeito a sondas elétricas.

Para finalizar esta revisão, cabe mencionar o trabalho de Vassalo (1999) utilizando sondas elétricas do tipo fio quente, no estudo dos perfis de velocidade dentro do filme de líquido de escoamento bifásico anular vertical.

Como pode ser observado na breve revisão apresentada sobre as técnicas de medição descritas na literatura, a maior parte das informações disponíveis sobre o comportamento dinâmico do escoamento anular foi obtida a partir de sondas resistivas. Estas sondas fornecem informações em um número reduzido de posições no escoamento, sendo, em sua maioria, posicionadas no interior do escoamento, potencialmente interferindo nos resultados.

Técnicas ópticas, por outro lado, têm sido muito menos empregadas em experimentos que buscam resultados quantitativos. Sua natureza não intrusiva, aliada à capacidade de fornecer informações instantâneas em regiões extensas do escoamento com excelentes resoluções espaciais e temporais são fatores que apontam para uma popularização destas técnicas no futuro próximo. Contribuindo para a consolidação das técnicas ópticas, pode-se citar a constante e rápida evolução observada no desempenho das fontes de iluminação, das câmeras para aquisição de imagens, assim como na capacidade de processamento dos computadores, equipamentos de cujo desempenho depende a qualidade e alcance das medidas a serem obtidas com técnicas de visualização. Como limitação óbvia desta classe de técnicas, deve-se mencionar a necessidade de acesso óptico ao escoamento.

O presente trabalho teve como objetivo contribuir para o desenvolvimento de técnicas ópticas aplicadas a escoamentos bifásicos gás-líquido. Apesar dos desenvolvimentos terem sido direcionados para o estudo do escoamento horizontal ar-água em regime anular, a técnica desenvolvida pode ser aplicada a outros padrões de escoamento. Uma característica marcante da técnica óptica desenvolvida é a disponibilização simultânea de informações quantitativas com bom nível de incerteza experimental, e de imagens de visualização qualitativa de alta qualidade, o que contribui para o entendimento dos fenômenos físicos envolvidos no escoamento.