

## 2 Revisão Bibliográfica

Uma vez que o escoamento multifásico pode ocorrer em diferentes padrões e a escolha do modelo de solução mais adequado depende do padrão escoamento, prever o mesmo é fundamental para a modelagem do escoamento.

O trabalho pioneiro de Taitel e Dukler (1976) apresentou um modelo teórico mecanicista capaz de prever as transições entre os diversos padrões de escoamento para tubulações horizontais e levemente inclinadas, estabelecendo grupos adimensionais que representassem razões entre as forças mais importantes governando as transições. Barnea (1987) apresenta uma revisão de diversos trabalhos referentes à criação dos mapas de padrão de escoamento e validação experimental dos mesmos, para tubulações horizontais, inclinadas e verticais.

Para um determinado diâmetro e fluidos conhecidos pode-se construir um mapa de padrões (*pattern map*) relacionando a velocidade, vazão mássica ou velocidade específica das fases com os padrões básicos (Chen, 2001). A Figura 2.1 ilustra um mapa de padrões típico relacionando as velocidades superficiais das fases (ou velocidades específicas). A identificação do padrão de escoamento é determinante na escolha do modelo para se analisar o mesmo.

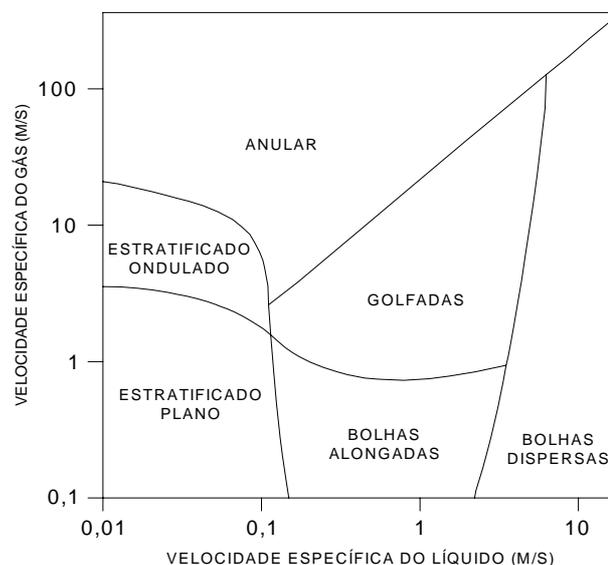


Figura 2.1 - Mapa de padrões típico para escoamento horizontal

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

Uma primeira abordagem do *Modelo de Deslizamento* foi proposta por Zuber e Findlay em 1965 (França e Lahey, 1992) e tem sido amplamente utilizada no cálculo da fração de vazão (ou fração de gás) no líquido e em outras equações constitutivas no escoamento bifásico vertical. Desde então este modelo foi melhorado por diversos pesquisadores (Wallis, 1969; Ishii, 1977). A abordagem de Zuber e Findlay é análoga à proposta por Taitel e Dukler (1976) para o cálculo da fração de líquido (*hold-up*) em escoamentos horizontais, porém supondo a hipótese de mistura de fases e desprezando a inclinação da tubulação. O modelo mais simples para representar um escoamento bifásico é o *Modelo Homogêneo*. Neste modelo, o fluido é considerado como uma mistura e todas as propriedades são consideradas como médias ponderadas entre as fases. O *Modelo de Deslizamento* é uma extensão do *Modelo Homogêneo*. A diferença entre ambos é que no *Modelo Homogêneo* as fases se deslocam na mesma velocidade, como se houvesse somente um fluido envolvido no escoamento. Já no *Modelo de Deslizamento*, um escorregamento entre as fases é introduzido. Por outro lado, o *Modelo de Deslizamento* pode ser considerado como uma simplificação do *Modelo de Dois Fluidos*, o qual considera que cada fase escoar separadamente, porém interagindo entre si.

O fato de que no *Modelo de Deslizamento* as fases se deslocam com velocidades diferentes é uma das considerações mais importantes na modelagem bifásica. De acordo com Zuber e Findlay (1965) o *Modelo de Deslizamento* descreve o escorregamento entre as fases como uma combinação de dois mecanismos: o *Parâmetro de Distribuição*  $C_o$  e a *Velocidade de Drift*  $V_{gj}$ . O primeiro resulta do fato de que a distribuição das fases na seção transversal do duto pode ser não é uniforme, conforme ilustrado na Fig. 1.2. O *Parâmetro de Distribuição*  $C_o$  igual a 1 corresponde à distribuição uniforme, típica de escoamentos homogêneos, Fig. 2.2a. Já para escoamentos verticais é comum haver concentração do gás do centro do duto, Fig. 2.2b, onde geralmente a velocidade da mistura também tende a ser superior a velocidade do líquido. O

segundo mecanismo resulta da tendência da fase gás em migrar de forma ascendente pela fase líquida devido ao efeito de flutuação.

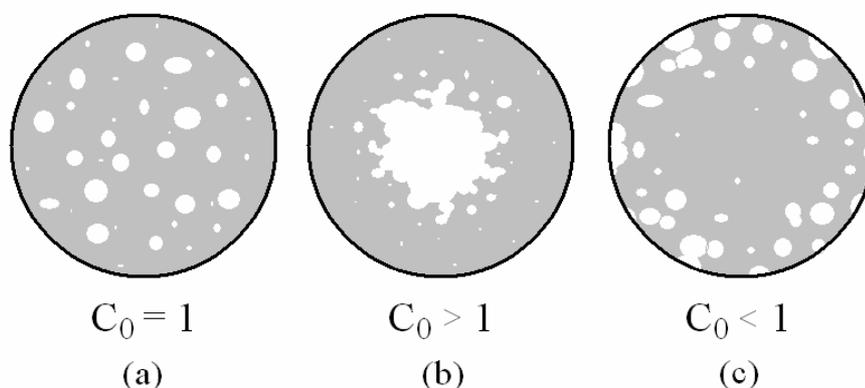


Figura 2.2 – Exemplos de distribuição das fases na seção transversal de um duto

No *Modelo de Deslizamento* a velocidade da fase gás  $u_g$  está relacionada com o *Fluxo volumétrico total*  $j$  da seguinte forma:

$$u_g = C_o j + V_{gj} \quad (2.1)$$

Existem diversas correlações para avaliar  $C_o$  e  $V_{gj}$ . Zuber e Findlay (França e Lahey, 1992) apresentaram valores para  $C_o$  entre 1,0 e 1,5. Segundo Durlofsky e Aziz (2003), muitos *Modelos de Deslizamento* utilizam o valor de  $C_o$  de 1,2 para os escoamentos tipo Bolha e Golfada e 1,0 quando o escoamento é do tipo Anular. Algumas correlações desenvolvidas mais recentemente, como por Ishii (2003), apontam para uma dependência maior de  $C_o$  com as características dos fluidos (massa específica  $\rho$  e viscosidade  $\mu$ ) e do sistema (diâmetro  $D$ , inclinação  $\theta$ , fração do gás  $\alpha_g$  e fluxo volumétrico  $j$ ).

Para a *velocidade de Drift*, as primeiras correlações já relacionavam a dependência de  $V_{gj}$  com as características dos fluidos e do sistema. Na tabela 2.1 são apresentados alguns exemplos para  $C_o$  e  $V_{gj}$  levantados experimentalmente por Zuber e Findlay em 1965, em função das massas específicas das fases ( $\rho_l$ ;  $\rho_g$ ), da gravidade  $g$  e da tensão superficial  $\sigma$ .

França e Lahey Jr. (1992) apresentaram uma maneira de correlacionar dados experimentais para tubulações horizontais através de uma metodologia fundamentada nos modelos de mistura. Os dados medidos foram comparados com correlações disponíveis na literatura, de modo a validar os experimentos. A partir

deste ponto, foram propostos valores para o coeficiente de distribuição da fase gasosa e velocidade de escorregamento, para cada regime de escoamento das fases.

Tabela 2.1 – Parâmetros da Velocidade de Escorregamento (Zuber e Findlay em 1965)

| Padrão de escoamento | $C_o$ | $V_{gj}$  |
|----------------------|-------|---|
| Golfada              | 1,2   | $0,37 \left[ \frac{g D (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right]^{1/2}$          |
| Bolhas               | 1,2   | $1,53 \left[ \frac{\sigma g D (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{1/4}$ |

Uma vez que os parâmetros como o coeficiente de distribuição da fase gasosa e a velocidade de escorregamento são dependentes tanto da orientação do escoamento quanto do arranjo das fases, existem diversos trabalhos sobre a determinação destes parâmetros (Hibiki e Ishii, 2000; 2003a; 2003b; Goda et al, 2003). Hibiki e Ishii, (2003a) ao analisar em escoamentos verticais em dutos de grandes diâmetros mostram que o escorregamento entre as fases resulta normalmente de um balanço entre as forças de arrasto e de empuxo na fase dispersa. Este não é o caso do escoamento horizontal (Hibiki e Ishii, 2003b). Ainda, se as fases estiverem separadas, a estrutura da interface influencia fortemente os parâmetros de escorregamento (Hibiki e Ishii, 2003b).

Hibiki e Ishii (2003b) argumentam que a utilização de duas equações de quantidade de movimento, presentes no *Modelo de Dois Fluidos*, introduz complicações matemáticas consideráveis, além da grande incerteza no que diz respeito à especificação dos termos de interação entre as fases, podendo dar origem à instabilidades numéricas na solução das equações. Segundo Hibiki e Ishii (2003b), as dificuldades associadas ao *Modelo de Dois Fluidos* podem ser significativamente reduzidas através da formulação de modelos de mistura. Porém, o seu uso deve se restringir a problemas onde o movimento das fases está fortemente acoplado. Neste mesmo trabalho, os autores derivam analiticamente as equações constitutivas que especificam o movimento relativo das fases, levando em conta a geometria interfacial, forças de corpo, tensões cisalhantes e transferência de quantidade de movimento linear entre as fases, conseguindo uma

razoável concordância experimental.

Geralmente os modelos de mistura são mais indicáveis para escoamentos verticais, devido a menor incidência de padrões segregados, mais aplicáveis aos modelos de fluidos separados. Segundo Coddington e Macian (2001) os *Modelos de Escorregamento* são tradicionalmente utilizados em simuladores para a indústria nuclear na análise do comportamento dos sistemas diante de condições transientes. A simplicidade dos *Modelos de Deslizamento* quando comparado com *Modelos de Dois Fluidos*, a boa correspondência com dados experimentais, bem como sua robustez, fazem com estes tenham uma ótima relação custo benefício.

O *Modelo de Deslizamento* tem sido muito utilizado para a modelagem bifásica de escoamento em dutos tanto para sistemas gás-líquido quanto para líquido-líquido (Brauner, 2002).

As correlações para prever a velocidade de escorregamento entre as fases dependem do padrão de escoamento. Logo, para prever escoamentos complexos com múltiplos padrões, é necessário utilizar algum algoritmo decisório que através de consultas aos mapas de padrão indique qual o padrão que ocorre em cada volume de controle do duto.

Para o *Modelo de Deslizamento*, existe uma alternativa à construção de um mapa de regimes de escoamento. Dentre todas as correlações voltadas para este modelo, uma delas se destaca por apresentar uma correlação válida para diversos regimes de escoamento. Na verdade, para a aplicação da correlação, não há a necessidade de saber qual é o regime de escoamento vigente em cada volume de controle. Esta correlação foi apresentada por Chexal e Lellouche em 1986 para tubulações verticais e revisada em 1992 (Chexal e Lellouche, 1992) sendo validada para diversos fluidos (inclusive ar e água), direções de fluxo das fases e inclinações para o duto. Esta correlação é apresentada como opção a ser utilizada em alguns programas comerciais, como por exemplo, o RELAP5 (2003). A correlação proposta foi comparada com diversas outras correlações disponíveis na literatura por Chexal e Lellouche (1989) e Coddington e Macian (2001). Estes autores concluíram que as principais vantagens são: funções empíricas contínuas (sem mudanças abruptas); capacidade de lidar com frações das fases em todo o seu limite, e capacidade de lidar com situações limite, quando ocorre somente uma fase em um trecho do duto.

A determinação da força devido ao atrito por unidade de volume  $F_w = \tau_w / 4$ ,

onde  $\tau_w$  é a tensão cisalhante na parede e  $D$  é o diâmetro da tubulação consiste em uma outra dificuldade dos modelos bifásicos unidimensionais. De um modo geral o atrito é estimado assumindo escoamento hidrodinamicamente desenvolvido, sendo a tensão cisalhante relacionada com a perda de carga ( $-dP/dx$ ) por

$$\tau_w = \left( - \frac{dP}{dx} \right) \frac{D}{4} \quad (2.2)$$

Os *Modelos de Dois Fluidos* necessitam da determinação da perda de carga de cada fase, enquanto que para os *Modelos de Deslizamento* deve-se estimar a perda de carga da mistura.

Existem diversas correlações disponíveis na literatura para determinar a perda de carga bifásica. Segundo Omgba-Essama (2004) e Awad et al (2004) existem dois modelos principais para a perda de carga por atrito, o *Modelo Homogêneo* e o *Modelo de Fases Separadas*. No *Modelo Homogêneo* considera-se que as fases se deslocam na mesma velocidade, o que faz com que seja chamado de *Zero Slip Model* (sem escorregamento entre as fases). Desta forma, no *Modelo Homogêneo* considera-se o escoamento como monofásico e com propriedades médias para o fluido. Já no *Modelo de Fases Separadas* o escoamento é tratado como se fosse dividido na fase líquida e gasosa. Este modelo se origina de um trabalho clássico de Lockhart e Martinelli publicado em 1949 (Awad et al., 2004), e é às vezes referenciado como *Slip Flow Model* (modelo de escorregamento). Ainda segundo Awad et al (2004), este método é um dos mais simples de se utilizar e com a vantagem de que pode ser utilizado para qualquer padrão de escoamento. Esta flexibilidade faz com que seja amplamente utilizado apesar de ser reconhecidamente pouco exato.

Segundo Awad et al (2004), Martinelli e Nelson apresentaram em 1948 uma correlação para a perda de carga baseada no escoamento fase líquida e a mesma foi relacionada com a perda de carga total do sistema. Já em 1949, Lockhart e Martinelli (Awad et al, 2004), apresentaram uma correlação similar baseada na combinação da perda de carga de ambas as fases, sendo que cada fase poderia estar escoando em regime laminar ou turbulento. Neste caso as perdas de carga de cada fase se relacionariam através do conhecido Parâmetro de Lockhart e Martinelli ( $X^2$ ), definido pela razão da perda de carga de cada fase  $(dP/dx)_i$  e

$(dP/dx)_g$  como

$$X^2 = \frac{(dP/dx)_l}{(dP/dx)_g} \quad (2.3)$$

Como a correlação entre  $X^2$  em função das combinações de regime de escoamento (laminar e turbulento) de cada fase foi apresentada de forma gráfica, Chisholm apresentou em 1967 um sistema de equações relacionado as perdas de carga de cada fase com  $X^2$  e uma constante relacionada à combinação entre o regime laminar e turbulento para cada fase.

De acordo com Omgba-Essama (2004), Corradini em seu livro “Fundamentals of Multiphase Flow” percebeu que algumas correlações descritas na literatura eram mais adequadas para certas condições de escoamento e sugeriu uma tomada de decisão entre três delas (Lockhart e Martinelli, Chisholm-Baroczy e Friedel) a partir da relação entre as viscosidades das fases e da vazão mássica total.

O modelo apresentado por Lockhart e Martinelli em 1949, considerado um clássico da literatura, especifica a perda de carga de um escoamento bifásico através da análise da perda de carga de cada fase como se estivessem escoando sozinhas pelo duto. As perdas de carga de cada fase se relacionam com a perda de carga bifásica através dos multiplicadores  $\phi_g^2$  e  $\phi_l^2$  definidos como:

$$\phi_g^2 = \frac{dP/dx}{(dP/dx)_g} \quad ; \quad \phi_l^2 = \frac{dP/dx}{(dP/dx)_l} \quad (2.4)$$

Lockhart e Martinelli apresentaram a relação entre as perdas de carga das fases de forma gráfica, sendo mais tarde transformadas em fórmulas por Chisholm em 1967 como apresentado a seguir:

$$\phi_g^2 = 1 + CX + X^2 \quad ; \quad \phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (2.5)$$

$C$  é um parâmetro adimensional que depende se o escoamento para cada fase (*phase-alone flows*) é laminar ou turbulento. A Tabela 2.2 apresenta os valores sugeridos para  $C$  por Chisholm, de acordo com a combinação de regimes de escoamento de cada fase.

Tabela 2.2 – Parâmetro  $C$  de perda de carga

| Líquido    | Gás        | $C$ |
|------------|------------|-----|
| Turbulento | Turbulento | 20  |
| Laminar    | Turbulento | 12  |
| Turbulento | Laminar    | 10  |
| Laminar    | Laminar    | 5   |

A perda de carga também pode ser determinada através do uso do fator de atrito  $f$  utilizando as expressões para escoamento monofásico hidrodinamicamente desenvolvido (Fox & McDonald, 2006), considerando o fluido como uma mistura homogênea,

$$\left( - \frac{d p}{d x} \right) = \frac{f \rho_m |V_c| V_c}{2 D} \quad (2.6)$$

onde  $\rho_m$  é a massa específica da mistura,  $V_c$  é a velocidade característica que pode ser a velocidade média da mistura  $\bar{u}_m$  ou o *Fluxo volumétrico total*  $j$ . O fator de atrito  $f$  depende do regime do escoamento, sendo o mesmo função do número de Reynolds  $\mathbf{Re}$

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho_m |V_c| D}{\mu_m} \quad (2.7)$$

onde  $\mu_m$  a viscosidade da mistura. Para regime laminar,  $\mathbf{Re} < 2100$ , e o fator de atrito é

$$f = \frac{64}{\mathbf{Re}} \quad (2.8)$$

Enquanto que para o regime turbulento ( $\mathbf{Re} > 2100$ ), pode-se utilizar a correlação de Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \left[ \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{\mathbf{Re} \sqrt{f}} \right) \right]^{-2} \quad (2.9)$$

onde  $\varepsilon$  é a rugosidade da tubulação.

## 2.1 Golfadas

Escoamentos no regime de golfadas são intermitentes, possuindo uma natureza estocástica, conseqüentemente sua descrição é normalmente feita em termos dos valores médios do comprimento, velocidade e freqüência das golfadas (Taitel, 1995).

De acordo com Fabre e Liné (1992), o comprimento médio das golfadas em tubulações horizontais 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.

A influência da interação entre duas bolhas alongadas consecutivas no comprimento das golfadas tem sido analisada experimentalmente por diversos autores (Moïssis e Griffith, 1962; Barnea e Brauner, 1985; Fagundes Netto et al. 2001). Mostra-se que para uma golfada persistir na tubulação, é necessário haver um comprimento mínimo separando duas bolhas consecutivas, para que a bolha de trás não seja afetada pela da frente. Recentemente, Ujang et al. (2006) e Kabiri-Samani et al. (2007) analisaram experimentalmente a formação e evolução de golfadas em tubulações horizontais.

Do ponto de vista numérico, o padrão de golfadas pode ser analisado utilizando tanto o *Modelo de Dois Fluidos* como o *Modelo de Deslizamento*. Recentemente, o grupo de Dinâmica dos Fluidos Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC/Rio utilizou o Modelo de Dois Fluidos para investigar a formação do regime de golfadas em tubulações horizontais (Carneiro et al, 2005; Ortega et al., 2005) e ligeiramente inclinadas (Carneiro e Nieckele, 2007) utilizando a metodologia apresentada por Issa e Kempf, (2003) e Bonizzi e Issa (2003).

Já o *Modelo de Deslizamento* foco do presente trabalho, também tem sido utilizado para prever o padrão de golfadas, conforme evidenciado em diversos trabalhos na literatura (Faille e Heintzé, 1999; Evje S. e Flatten, 2005, Munkejord et al, 2006).

A *Golfada Severa* é um caso particular do regime de golfadas que tem recebido bastante atenção na literatura. (Adrianov et al., 2007; Masella et al., 1998

e França e Lahey , 1992).

Tengesdal (2002) define que a formação da *Golfada Severa* ocorre em quatro fases distintas, conforme ilustrado na Fig. 2.3: formação da golfada, produção da golfada, interrupção da golfada e fluxo reverso do que restou da fase líquida. A fase líquida vai se acumulando no trecho vertical da tubulação fazendo com que a pressão cresça gradativamente na proporção da coluna de líquido até que a mesma seja suficiente para expulsar todo o líquido acumulado. Durante a produção da golfada, a vazão de ambas as fases na saída do duto é muito superior à vazão na entrada do mesmo, o que pode acarretar problemas de sobrecarga nos vasos separadores, caso não tenham sido projetados para tal. Os altos níveis de pressão e vazão alcançados durante a produção da golfada acabam por superdimensionar todos os equipamentos envolvidos.

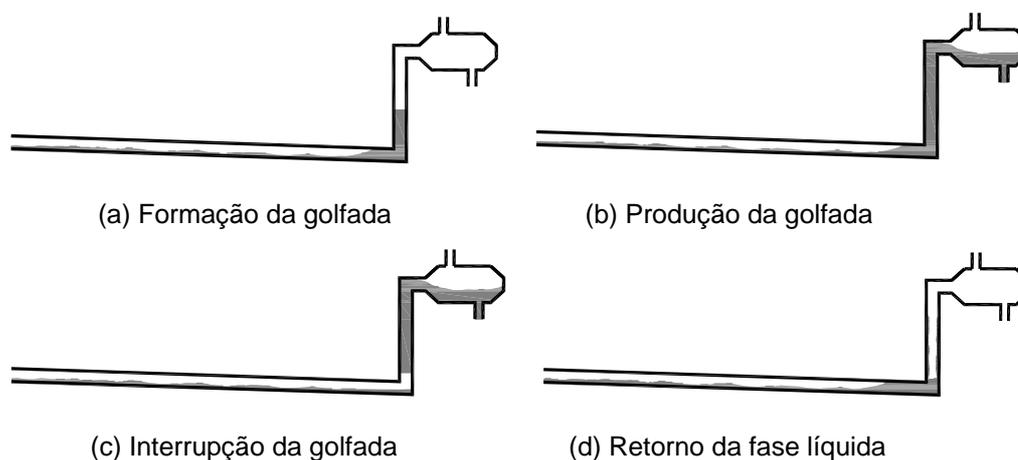


Figura 2.3 – Ciclo de eventos de uma Golfada Severa