



SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA EVOLUÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO-GÁS EM GOLFADAS EM DUTOS HORIZONTAIS

Mariana Alves da Silva, mariana_alvesilva@hotmail.com

Stella Cavalli, stellacavalli02@gmail.com

Cristiane Cozin, cozin@utfpr.edu.br

Fausto Barbuto, fbarbuto@utfpr.edu.br

Rigoberto Morales, rmorales@utfpr.edu.br

NUEM/PPGEM/UTFPR

Av. Sete de Setembro, 3165 - Curitiba, PR, Brazil

Resumo. *O escoamento bifásico se destaca, notoriamente, nas indústrias de petróleo e gás. Devido a essa importância, há uma grande necessidade de conhecerem-se seus padrões, propriedades e parâmetros característicos. Entre todas as configurações, chamadas de padrões de escoamento, em que o escoamento bifásico pode desenvolver-se, destaca-se o escoamento em golfadas. Esse tipo de escoamento bifásico é caracterizado pela sucessão das células unitárias, que são compostas por duas regiões: um pistão líquido normalmente aerado e uma bolha alongada envolvida por um filme de líquido. Devido a sua grande importância e sua ocorrência tão frequente, muitos autores propuseram modelos para descrever e prever o comportamento deste padrão de escoamento. Destaca-se os modelos baseados em seguimento de pistões, onde cada pistão de líquido e cada bolha alongada constituem elementos distintos e são propagados ao longo da tubulação. O modelo proposto por Rodrigues (2009) está entre os modelos de seguimento de pistão. A solução deste modelo requer relações de fechamento para diversas variáveis, como por exemplo, fração de gás na região da bolha alongada, velocidade translacional e efeito de esteira na traseira da bolha alongada. O objetivo do presente trabalho é avaliar a influência das correlações de fechamento na evolução do escoamento em golfadas. Serão avaliados resultados obtidos numericamente para importantes parâmetros do escoamento, como comprimento de pistão e de bolha, pressão e velocidade da bolha alongada, taxa de coalescência e número de bolhas coalescidas. Estes parâmetros serão, ao fim, comparados com valores experimentais. A análise comparativa mostra a relevância da escolha adequada das correlações a serem utilizadas para a solução do modelo de seguimento de pistões.*

Palavras-chave: *escoamento bifásico, seguimento de pistões, efeito de esteira, velocidade translacional da bolha.*

1 INTRODUÇÃO

A importância dos escoamentos bifásicos em indústrias como a nuclear e de petróleo é notável. Nestes tipos de escoamentos, as fases e suas interfaces distribuem-se em configurações geométricas conhecidas como padrões de escoamento. Entre os possíveis padrões de escoamento o mais comum é o padrão em golfadas, por ocorrer para uma ampla faixa de combinação de vazões de líquido e de gás. A ocorrência deste padrão de escoamento também pode ser influenciado pelas propriedades dos fluidos, dimensão e inclinação das tubulações utilizadas.

O escoamento bifásico em golfadas é caracterizado pela sucessão intermitente de uma estrutura conhecida como *célula unitária*, que é composta por duas regiões distintas: uma bolha alongada sobre um filme líquido, e um pistão de líquido, geralmente aerado. Devido à complexidade e importância desse escoamento, diversos autores se dedicaram a estudá-lo, objetivando compreender sua fenomenologia e apresentar modelos para descrevê-lo.

Os primeiros estudos realizados para a compreensão do escoamento em golfadas são conhecidos como modelos estacionários. Estes modelos ignoram a intermitência do escoamento e o consideram como periódico no tempo e espaço. Dentre esses estudos destacam-se os modelos de Dukler e Hubbard (1975), Fernandes et al. (1983) e Taitel e Barnea (1990).

Outra classe de modelos, baseados em Modelo de Seguimento de Pistões (Slug Tracking Model), são modelos onde as bolhas e pistões são definidos como volumes de controle que se propagam ao longo da tubulação. Nesta classe de modelos, equações de balanços de massa e quantidade de movimento são definidas para todos os volumes de controle e resolvidas a cada passo de tempo. Alguns dos autores que propuseram modelos lagrangeanos de seguimento de pistões são Grenier (1997), Rodrigues (2009) e Rosa et. al (2014).

A simulação do escoamento bifásico utilizando o modelo de seguimento de pistões exige o conhecimento das condições iniciais e de contorno. Como condições iniciais é necessária a caracterização completa das células unitárias que compõem o escoamento. Um dos parâmetros mais relevantes é a determinação da fração de gás na região da bolha alongada que pode ser calculada através do Modelo de Bolha proposto por Taitel e Barnea (1990). O Modelo de Bolha também requer relações de fechamento para sua solução, como a frequência da célula unitária, a velocidade da bolha alongada e o efeito da esteira formada na traseira da bolha alongada. Como condições de contorno são conhecidas a velocidade do líquido na entrada da tubulação e a pressão do gás na saída da tubulação.

Neste cenário, no presente trabalho será analisada a influência das relações de fechamento na evolução do escoamento em golfadas. Serão monitoradas as variáveis que caracterizam este padrão de escoamento: comprimento da bolha alongada e do pistão de líquido, velocidade de translação e pressão da bolha alongada. Além disso, analisa-se a influência do efeito de esteira na traseira da bolha alongada, no processo de coalescência das bolhas. No presente trabalho será apresentada uma revisão das relações de fechamento existentes na literatura para o cálculo desses parâmetros. Será realizada uma análise comparativa entre os modelos e dados experimentais.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo de Rodrigues (2009) propõe a aplicação de equações de balanço de massa e balanço da quantidade de movimento em um volume de controle que envolva a célula unitária para determinar importantes parâmetros do escoamento em golfadas. O desenvolvimento dessas equações leva a duas equações diferenciais em relação ao tempo, que devem ser integradas numericamente até que o critério de parada seja atingido. Porém, antes da aplicação dessas equações, algumas considerações acerca do escoamento devem ser feitas, tais como: escoamento unidimensional, isotérmico e sem mudança de fase; líquido incompressível e gás ideal; pressão do gás no interior de uma bolha alongada e concentração de bolhas em um pistão não variam axialmente; filme de líquido não aerado; quantidade de movimento associada ao gás e à região do filme de líquido e forças interfaciais entre o gás e o líquido são desprezíveis.

A Fig. 1 apresenta a definição do conceito de célula unitária proposto por Wallis (1969), que será utilizado neste trabalho. Alguns dos principais parâmetros do escoamento estão representados abaixo para uma j -ésima célula com uma inclinação a partir da horizontal, como: comprimento de bolha (L_{Bj}), comprimento de pistão (L_{Sj}), pressão na bolha alongada (P_{GBj}), velocidade do líquido no filme (U_{LBj}) e no pistão (U_{LSj}) e a velocidade das bolhas dispersas no pistão (U_{GSj}).

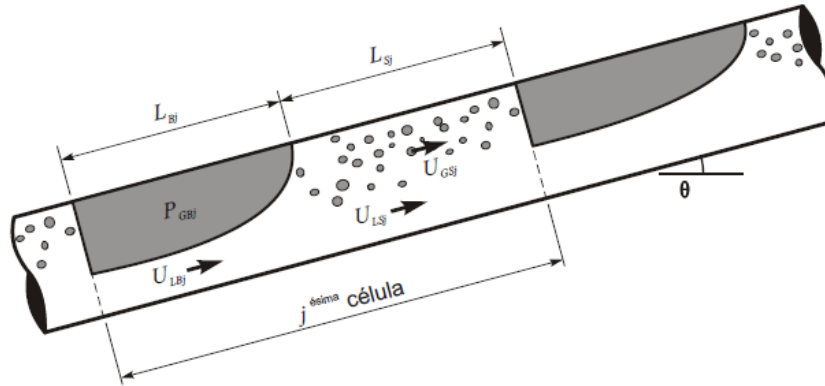


Figura 1. Parâmetros da Célula Unitária (Rodrigues, 2009)

A forma integral da equação da conservação da massa aplicada a um volume de controle é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (1)$$

A Eq. (1) deve ser aplicada para cada fase dentro de cada região da j -ésima célula unitária e algumas aproximações, demonstradas por Rodrigues (2009), se fazem necessárias

para que a modelagem não fique mais complexa. Desta forma, obtém-se as seguintes equações para cada região da célula unitária:

- Para o líquido no pistão:

$$U_{LSxj} = U_{LSj} - \frac{L_{Sj}}{2R_{LSj}} \frac{dR_{LSj}}{dt} \quad (2)$$

$$U_{LSyj} = U_{LSj} + \frac{L_{Sj}}{2R_{LSj}} \frac{dR_{LSj}}{dt} \quad (3)$$

- Para o gás no pistão:

$$U_{GSxj} = U_{GSj} + \frac{L_{Sj}}{2} \left[\frac{1}{(1-R_{LSj})} \frac{dR_{LSj}}{dt} - \frac{1}{\rho_{GSj}} \frac{d\rho_{GSj}}{dt} \right] \quad (4)$$

$$U_{GSyj} = U_{GSj} - \frac{L_{Sj}}{2} \left[\frac{1}{(1-R_{LSj})} \frac{dR_{LSj}}{dt} - \frac{1}{\rho_{GSj}} \frac{d\rho_{GSj}}{dt} \right] \quad (5)$$

- Para o líquido no filme:

$$\frac{d}{dt} (\rho_L AR_{LBj} L_{Bj}) + \rho_L AR_{LSyj} \left(U_{LSyj} - \frac{dy_j}{dt} \right) - \rho_L AR_{LSxj-1} \left(U_{LSxj-1} - \frac{dx_{j-1}}{dt} \right) = 0 \quad (6)$$

- Para a bolha alongada:

$$\begin{aligned} & (1-R_{LBj}-1+R_{LSj}) \frac{dy_j}{dt} - (1-R_{LBj}-1+R_{LSj-1}) \frac{dx_{j-1}}{dt} - L_{Bj} \frac{dR_{LBj}}{dt} + \\ & + L_{Bj} (1-R_{LBj}) \frac{1}{\rho_{GBj}} \frac{d\rho_{GBj}}{dt} + (1-R_{LSj}) U_{GSyj} - (1-R_{LSj-1}) U_{GSxj-1} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Substituindo as Eq. (2) e (3) em (6), e (4) e (5) em (7) e então relacionando as duas equações resultantes, obtém-se o balanço de massa geral de uma célula unitária:

$$U_{LSj-1} - U_{LSj} = \frac{dP_{GBj}}{dt} \left[L_{Bj} \frac{(1-R_{LBj})}{P_{GBj}} + \frac{L_{Sj-1}}{2} \frac{(1-R_{LSj-1})}{P_{GBj-1}} \right] + \left(\frac{1-R_{LSj}}{R_{LSj}} \right) U_{DSj} - \left(\frac{1-R_{LSj-1}}{R_{LSj-1}} \right) U_{DSj-1} \quad (8)$$

Onde U_{LSj} é a velocidade do líquido no pistão, U_{DSj} é a velocidade de deslizamento das bolhas dispersas no pistão, P_{GBj} é a pressão do gás na bolha alongada, L_{Bj} e L_{Sj} são os comprimentos da bolha e do pistão e R_{LBj} é a fração de líquido no pistão.

A forma integral da equação da conservação da quantidade de movimento aplicada a um volume de controle é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho u dV + \int_{SC} \rho u \vec{V} \cdot d\vec{A} = \sum F \quad (9)$$

A Eq. (9) deve ser aplicada para a fase líquida no pistão da célula unitária analisada. Após a aplicação no volume de controle especificado e através das aproximações propostas por Rodrigues (2009), temos:

$$P_{GBj} - P_{GBj+1} = \rho_L R_{LSj} L_{Sj} \frac{dU_{LSj}}{dt} + 2C_{LSj} \rho_L \frac{L_{Sj}}{D} U_{LSj}^2 + 2C_{LBj+1} \rho_L S_{LBj+1} \frac{L_{Bj+1}}{D} U_{LBj+1}^2 +$$

$$+ (R_{LSj} L_{Sj} + R_{LBj+1} L_{Bj+1}) \rho_L \sin \theta + \left[\frac{L_{Sj}}{2} \left(\frac{dx_j}{dt} + \frac{dy_j}{dt} \right) - L_{Sj} U_{LSj} \right] \rho_L \frac{dR_{LSj}}{dt} \quad (10)$$

Onde:

$$C_{LSj} = \frac{\tau_{LSj}}{\frac{1}{2} \rho_L U_{LSj}^2} \quad (11)$$

$$C_{LBj+1} = \frac{\tau_{LBj+1}}{\frac{1}{2} \rho_L U_{LBj+1}^2} \quad (12)$$

$$S_{LBj+1} = \frac{S_{LBj+1}}{\pi D} \quad (13)$$

Onde P_{GB} é a pressão do gás na bolha alongada, ρ_L é a densidade do líquido, R_{LS} e R_{LB} são as frações de líquido no pistão e no filme, L_S e L_B são os comprimentos do pistão e da bolha, U_{LS} e U_{LB} são as velocidades do líquido no pistão e na bolha, D é o diâmetro da tubulação, θ é a inclinação da tubulação, s_{LB} é o perímetro molhado adimensional e x e y são as fronteiras do pistão.

O lado esquerdo da Eq. (10) representa a diferença de pressão entre duas bolhas consecutivas no escoamento, enquanto o lado direito desta equação apresenta a quais fenômenos está associada essa variação de pressão, que são a variação da quantidade de movimento no pistão, as forças de atrito e gravitacional. As Eq. (8) e (10) compõem um sistema que deve ser resolvido numericamente em função das variáveis U_{LS} e P_{GB} .

3 DISCRETIZAÇÃO NUMÉRICA

A discretização das equações diferenciais (8) e (10) é feita através do método numérico de diferenças finitas. Porém, para discretizar estas equações são necessárias algumas simplificações e considerações, como, por exemplo, a definição do fator de pressão (14). Através dessas simplificações, encontradas no trabalho de Rodrigues (2009), ambas as Eq. (8) e (10) podem ser reescritas pelas Eq. (15) e (16), respectivamente.

$$H_{GBj} = \frac{P_{GBj}}{\rho_L} \quad (14)$$

$$U_{LSj-1} - U_{LSj} = \frac{dH_{GBj}}{dt} \left(\frac{L_{Bj} R_{GBj}}{H_{GBj}} + \frac{L_{Sj} R_{GSj}}{2H_{GBj}} + \frac{L_{Sj-1} R_{GSj-1}}{2H_{GBj-1}} \right) + \Delta U_{DSj} \quad (15)$$

$$H_{GBj} - H_{GBj+1} = R_{LSj} L_{Sj} \frac{dU_{LSj}}{dt} + 2C_{LSj} \frac{L_{Sj}}{D} U_{LSj}^2 + \frac{1}{\rho_L} (\Delta P_{Sj+1} + \Delta P_{Gj} + \Delta I_j) \quad (16)$$

Onde:

$$\Delta U_{DSj} = \frac{(1 - R_{LSj})}{R_{LSj}} U_{DSj} - \frac{(1 - R_{LSj-1})}{R_{LSj-1}} U_{DSj-1} \quad (17)$$

$$\Delta P_{Sj+1} = 2C_{LBj+1} s_{LBj+1} \rho_L \frac{L_{Bj+1}}{D} U_{LBj+1}^2 \quad (18)$$

$$\Delta P_{Gj} = (R_{LSj} L_{Sj} + R_{LBj+1} L_{Bj+1}) \rho_L g \sin \theta \quad (19)$$

$$\Delta I_j = \left[\frac{L_{Sj}}{2} \left(\frac{dx_j}{dt} + \frac{dy_j}{dt} \right) - L_{Sj} U_{LSj} \right] \rho_L \frac{dR_{LSj}}{dt} \quad (20)$$

Os termos (17), (18), (19) e (20) representam, respectivamente: termos referentes à velocidade do gás no interior do pistão; queda de pressão devido ao atrito entre a parede do tubo e o líquido do filme; queda de pressão devida à força gravitacional que atua sobre o líquido presente no pistão e no filme; e a variação da quantidade de movimento no interior do pistão devido à variação temporal da fração de líquido no pistão.

De maneira implícita, a modelagem matemática discretiza as equações em relação ao espaço pela integração das propriedades ao longo de cada célula no escoamento. Resta, então, apenas a discretização em relação ao tempo, que é realizada pelo método das diferenças finitas de Crank-Nicholson apenas para as variáveis U_{LS} e P_{GB} , enquanto as demais são utilizadas com seus valores já conhecidos em um tempo antigo.

Desta maneira, discretizando-se as equações (15) e (16) e reorganizando-as para que as variáveis avaliadas no tempo novo fiquem separadas das variáveis avaliadas no tempo antigo, obtemos, respectivamente:

$$\begin{aligned} -U_{LSj-1}^N + H_{GBj}^N \left(\frac{2L_{Bj} R_{GBj}}{H_{GBj}^O \Delta t} + \frac{L_{Sj} R_{GSj}}{H_{GBj}^O \Delta t} + \frac{L_{Sj-1} R_{GSj-1}}{H_{GBj-1}^O \Delta t} \right) + U_{LSj}^N = \\ = U_{LSj-1}^O - U_{LSj}^O + \left(\frac{2L_{Bj} R_{GBj}}{\Delta t} + \frac{L_{Sj} R_{GSj}}{\Delta t} + \frac{L_{Sj-1} R_{GSj-1}}{\Delta t} \frac{H_{GBj}^O}{H_{GBj-1}^O} \right) - 2\Delta U_{Dj} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} -H_{GBj}^N + U_{LSj}^N \left(\frac{2R_{LSj} L_{Sj}}{\Delta t} + 4C_{LSj} \frac{L_{Sj}}{D} U_{LSj}^O \right) + H_{GBj+1}^N = \\ = -H_{GBj}^O - H_{GBj+1}^O + \frac{2R_{LSj} L_{Sj} U_{LSj}^O}{\Delta t} - \frac{2}{\rho_L} (\Delta P_{Sj+1} + \Delta P_{Gj} + \Delta I_j) \end{aligned} \quad (22)$$

Nas equações (21) e (22) os sobrescritos N e O indicam as variáveis avaliadas no tempo novo e no tempo antigo, respectivamente. Estas equações devem ser aplicadas para todas as células unitárias ao longo do escoamento, da primeira à última.

4 RELAÇÕES DE FECHAMENTO

Para a solução do modelo de seguimento de pistões aqui estudado, um dos importantes parâmetros necessários é a fração de líquido na região do filme. Para determinar esse parâmetro utilizamos o Modelo de Bolha proposto por Taitel e Barnea (1990). Este último é um modelo estacionário para a solução do escoamento em golfadas horizontal, vertical e inclinado, onde os autores propõem três modelos para que o formato da bolha alongada seja considerado.

Sabe-se que é necessário o conhecimento de diversas variáveis para a solução do modelo de bolha, tais como a velocidade da bolha alongada U_T e a frequência da célula unitária f . Portanto é necessário o uso de correlações que forneçam o valor dessas variáveis a partir de parâmetros do escoamento como a inclinação e a geometria da tubulação, propriedades e vazões dos fluidos. Essas correlações são conhecidas como correlações de fechamento.

a. Frequência da Célula Unitária:

A frequência da célula unitária pode ser entendida como o número de pistões que atravessam um determinado ponto da tubulação em certo intervalo de tempo. Combinando a Eq. (23) com o modelo de bolha de Taitel e Barnea (1990), é possível prever o formato da célula unitária.

$$f = \frac{U_T}{L_S + L_B} \quad (23)$$

Diversas correlações foram desenvolvidas para a frequência da célula unitária, de acordo com o ajuste de diferentes dados experimentais obtidos em diversos cenários, com diferentes inclinações e geometrias de tubulação, vazões e propriedades das fases. Para a elaboração deste artigo nenhuma correlação de frequência foi utilizada, apenas os valores de frequência experimentais.

b. Velocidade da Bolha Alongada:

A velocidade translacional da bolha alongada é a velocidade com que a bolha se propaga através do líquido. Ela é determinada pela fórmula:

$$U_T = (C_0 j + C_{inf} \sqrt{gD})(1+h) \quad (24)$$

Onde C_0 e C_{inf} dependem do número de Reynolds, Froude, Eötvös e da inclinação da tubulação. Os valores médios de C_0 variam entre 1 e 1.2 e de C_{inf} variam entre 0.34 e 0.54;

para regime turbulento. A constante h está relacionada ao efeito de esteira, e será abordada em seguida.

Diversos autores propuseram correlações para o cálculo de C_0 e C_{inf} , de acordo com diferentes bases de dados experimentais. Para a realização do presente estudo, a única correlação utilizada foi a proposta por Bendiksen (1984) para dutos de 2.54 a 5 cm, com inclinações entre +90 e -90 a partir da horizontal. Para esses casos, Bendiksen (1984) propôs:

$$C_0 = \begin{cases} \text{Re}_m \geq 2000 \begin{cases} 1,2; & Fr_m \geq 3.5 \\ 1; & Fr_m < 3.5 \end{cases} \\ \text{Re}_m < 2000; & 2 \end{cases} \quad (25)$$

$$C_{inf} = \begin{cases} \frac{0.345}{\left(1 + \frac{3805}{Eo^{3.06}}\right)^{0.58}} \sin\theta; & Fr_m \geq 3.5 \text{ e } Re_m \geq 2000 \\ \text{ou} \\ \left(0.542 - \frac{1.76}{Eo^{0.56}}\right) \cos\theta + \frac{0.345}{\left(1 + \frac{3805}{Eo^{3.06}}\right)^{0.58}} \sin\theta \end{cases} \quad (26)$$

Onde:

$$Fr_m = \frac{j}{\sqrt{gD}} \quad (27)$$

$$Re_m = \frac{\rho_L j D}{\mu_L} \quad (28)$$

$$Eo = \frac{(\rho_L - \rho_G) g D^2}{\sigma} \quad (29)$$

c. Efeito de Esteira:

A região de turbulência de uma célula unitária do escoamento em golfadas se encontra na região compreendida entre o fim da bolha alongada e o começo do pistão, e é caracterizada pela passagem de pequenas bolhas descoladas da traseira da bolha alongada para o pistão de líquido. Ao mesmo tempo, parte dessas bolhas re-coalescem com a própria bolha alongada, o que resulta em um fenômeno de recirculação. As bolhas que realmente se desprendem desta zona de recirculação, coalescem com a interface da bolha sucessiva (Brauner, 2003).

O fator de esteira é a relação empírica que modela o efeito desse fenômeno que ocorre na traseira da bolha alongada. Uma das correlações que define o fator de esteira é:

$$h = a_w \exp\left(-b_w \frac{L_s}{D}\right) \quad (30)$$

onde a_w e b_w são constantes experimentais propostas por diferentes autores para diferentes bases de dados. No caso do presente trabalho, estão presentes as constantes experimentais

propostas por Grenier (1997) e Rodrigues (2009) para escoamento horizontal de água e ar. Estas constantes são apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1. Constantes do fator de esteira

	a_w	b_w
Grenier (1997)	0.4	0.5
Rodrigues (2009)	0.4	1.0

5 RESULTADOS

Para estudar a convergência do modelo e a influência das correlações em questão, foi desenvolvido um programa em linguagem Fortran95. Este programa calcula importantes parâmetros do escoamento, como comprimentos de pistão e bolha, velocidade translacional da bolha e outros. Porém, para que isso seja possível, o programa necessita de dados de entrada, como velocidades superficiais das fases, frequência, propriedades da tubulação, propriedades das fases, entre outros.

a. Dados Experimentais

A configuração experimental utilizada na obtenção dos dados experimentais foi semelhante à utilizada por Rosa (2006). Foi utilizado um caso de escoamento horizontal de ar e água, com determinadas velocidades superficiais de líquido e gás. Os parâmetros utilizados estão presentes nas Tab. 2 e 3.

Tabela 2. Configuração Experimental

	Ar e água (A@W)
Comprimento do tubo (m)	20.098 (773D)
Diâmetro do tubo (m)	0.026
Inclinação do tubo (°)	0
Viscosidade do líquido (Pa.s)	0.000855
Densidade do líquido (kg/m ³)	1000
Estação de medição 1	0
Estação de medição 2	3.588 (138D)

Estação de medição 3	9.568 (368D)
Estação de medição 4	19.6 (650D)

Tabela 3. Configurações Experimentais dos Fluidos

Ponto	J_L (m/s)	J_G (m/s)	Freq. (Hz)	C_0	C_{INF}
A@W4	0.52	0.52	2.89	1.12	0

b. Configuração Numérica

Para cada um dos casos de escoamento horizontal foram realizadas seis simulações, cada uma combinando uma correlação de velocidade da bolha com uma de fator de esteira. As seis combinações realizadas para cada caso de escoamento estão representadas na Tab. 4.

Tabela 4. Combinações de simulação

Simulação	Correlação de velocidade da bolha (C_0 e C_{inf})	Correlação de fator de esteira (a_w e b_w)
1	C_0 e C_{inf} experimentais	Sem fator de esteira
2	C_0 e C_{inf} experimentais	Rodrigues (2009)
3	C_0 e C_{inf} experimentais	Grenier (1997)
4	Bendiksen (1984)	Sem fator de esteira
5	Bendiksen (1984)	Rodrigues (2009)
6	Bendiksen (1984)	Grenier (1997)

c. Resultados

Os resultados obtidos numericamente foram plotados contra os valores experimentais, exceto nos casos da taxa de coalescência e do número de bolhas coalescidas, para os quais não

existiam valores experimentais disponíveis para comparação. Abaixo, nas Fig. 2 a 5, estão presentes os resultados obtidos para o caso do escoamento.

A Fig. 2 apresenta os valores médios de importantes propriedades do escoamento (comprimento de pistão, comprimento de bolha, velocidade translacional da bolha, pressão dentro da bolha, taxa de coalescência e número de bolhas coalescidas) obtidos para o ponto 4, para o caso em que foram utilizados os coeficientes C_0 e C_{inf} experimentais. A Fig. 3 apresenta os valores médios das mesmas propriedades e para o mesmo ponto, porém para o caso em que foi utilizada a correlação de Bendiksen para determinar os coeficientes C_0 e C_{inf} . A importância desses gráficos está na facilidade em visualizar a comparação entre os valores médios experimentais com os valores obtidos numericamente, que é um importante ponto da análise.

As Fig. 4 e 5 seguem a mesma ordem das anteriores em relação às combinações de correlação, porém, trata-se de gráficos das funções de densidade de probabilidade (FDP/PDF) para os parâmetros de comprimento de pistão, comprimento de bolha e velocidade translacional, obtidos em três diferentes estações de medição (estações de medição 2, 3 e 4). A partir destes gráficos é possível visualizar a mudança no comportamento do escoamento ao longo da tubulação, e ao mesmo tempo comparar os dados experimentais com os resultados numéricos.

Analisando primeiramente os comprimentos de bolha e pistão mostrados nas Fig. 2 a 5, observa-se que para os casos em que o efeito de esteira foi desconsiderado os resultados obtidos divergem dos experimentais. Enquanto para os casos em que o fator de esteira proposto por Rodrigues (2009) foi utilizado há uma eficaz aproximação dos resultados para os comprimentos de bolha. Porém, para os comprimentos de pistão os resultados mostram-se menores que os experimentais. O exato oposto ocorre para a utilização do fator de esteira proposto por Grenier (1997), que determina comprimentos de pistão muito próximos dos experimentais, porém com comprimentos de bolha muito maiores.

Para a velocidade da bolha alongada, as simulações realizadas não apresentaram grandes diferenças nos resultados entre si. Contudo, comparadas aos dados experimentais, ficaram menores no começo da tubulação e maiores no final. Para os casos em que os coeficientes C_0 e C_{inf} foram determinados pela correlação de Bendiksen (1984), essa diferença entre resultados numéricos e experimentais foi ainda maior.

Na análise da pressão dentro da bolha alongada, assim como anteriormente no caso da velocidade, os resultados numéricos não apresentaram grandes divergências entre si. No entanto, para este parâmetro, também não houve uma significativa diferença entre resultados numéricos e experimentais.

A análise para a taxa de coalescência e número de bolhas não pode ser realizada de maneira completa pela falta de resultados experimentais disponíveis para a comparação. Todavia, observações que relacionem os casos de simulação entre si também possuem relevância. Nota-se que, para ambos os parâmetros, a simulação realizada desconsiderando o efeito de esteira não gera a coalescência de bolhas, enquanto o fator de esteira de Grenier (1997) gera uma coalescência muito maior que o de Rodrigues (2009), principalmente no início da tubulação.

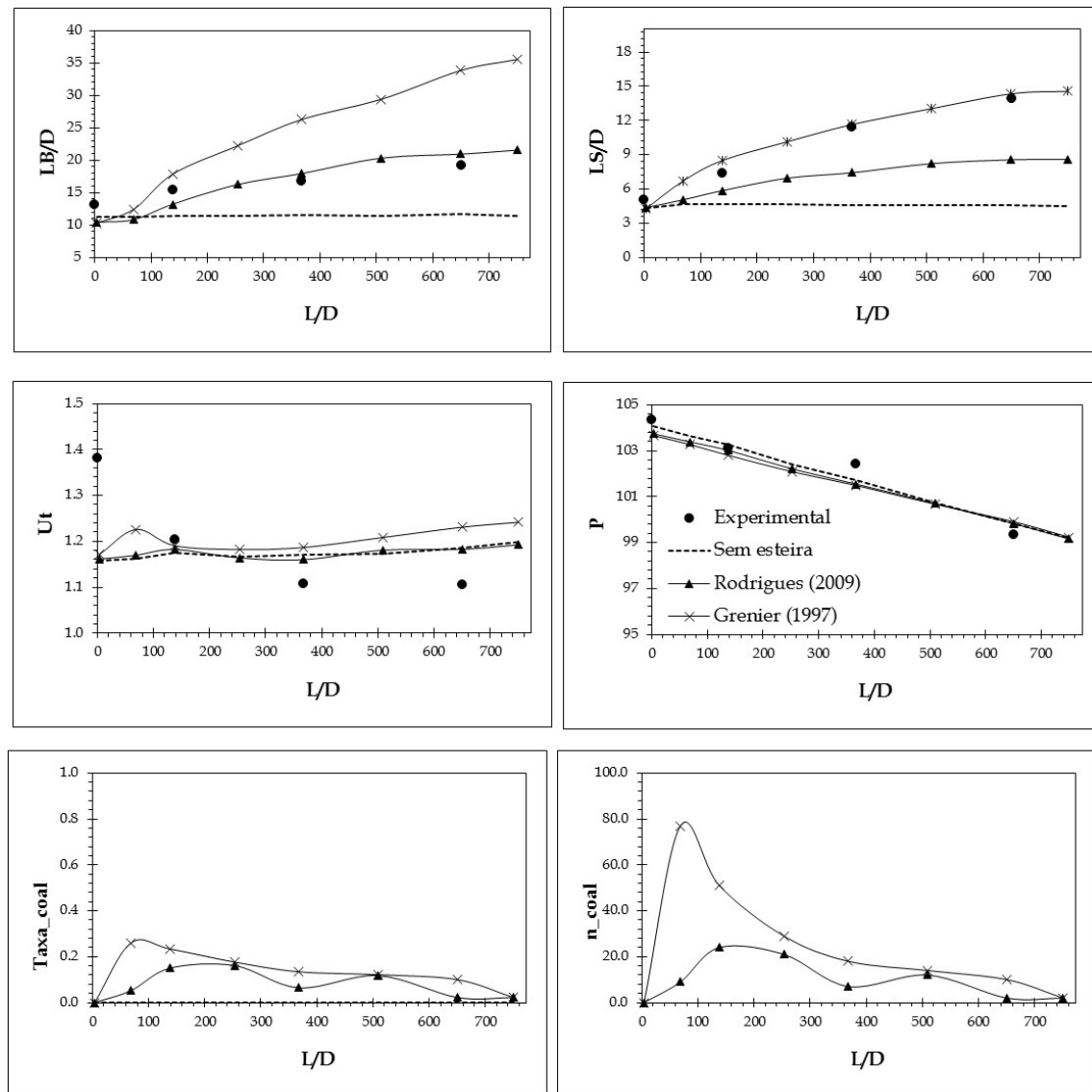


Figura 2. Valores Médios - Ponto A@W4 com C_0 e C_{inf} experimentais

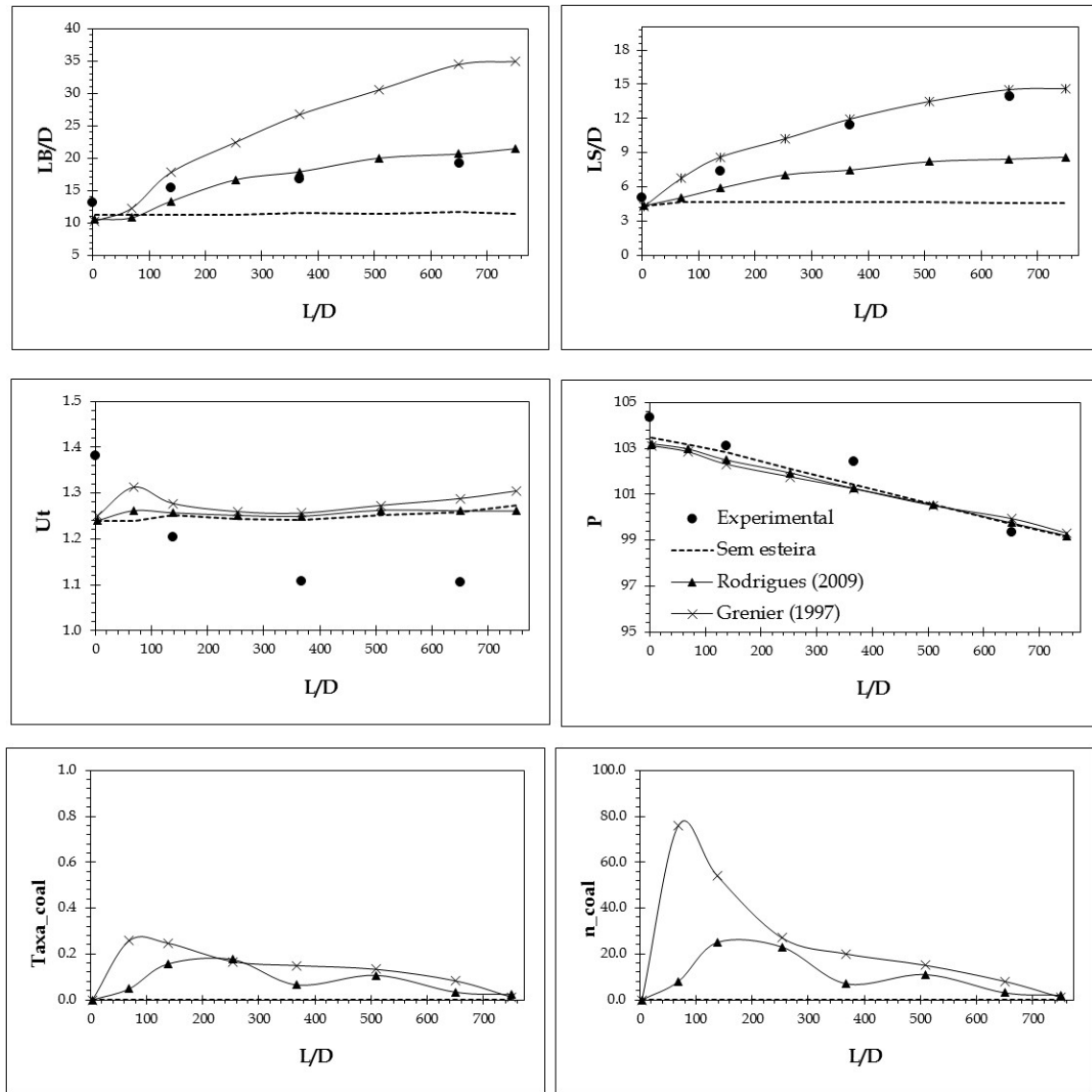


Figura 3. Valores Médios - Ponto A@W4 com C_0 e C_{inf} determinados por Bendiksen

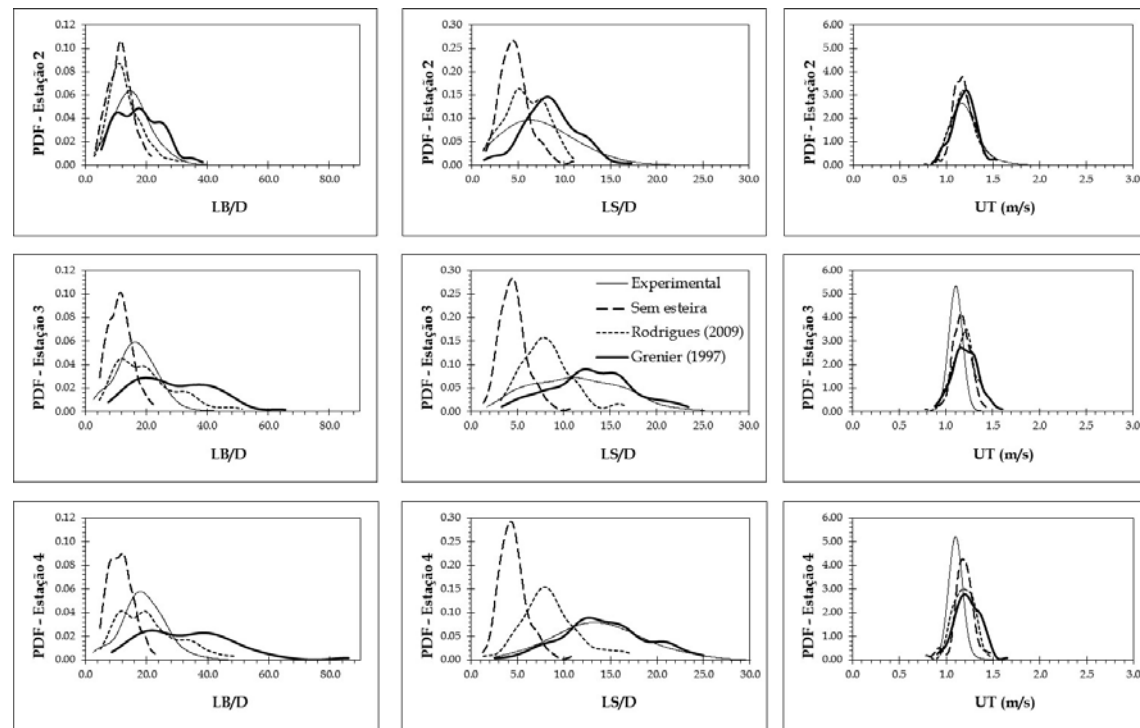


Figura 4. FDP - Ponto A@W4 com C_0 e C_{inf} experimentais

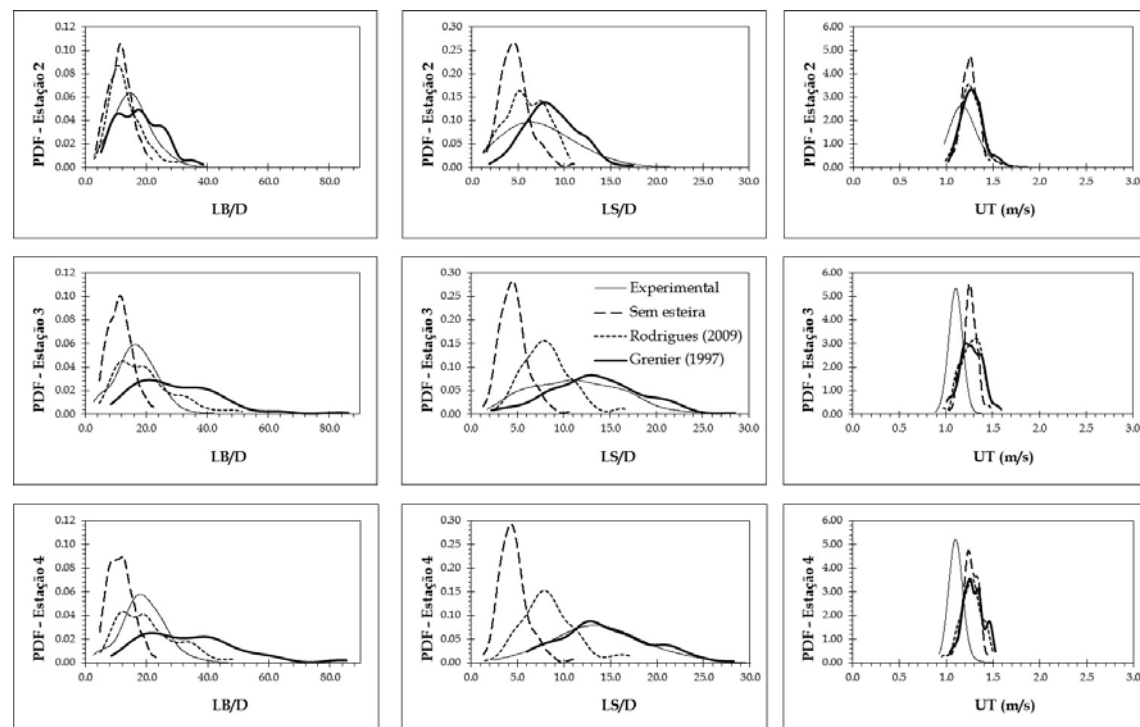


Figura 5. FDP - Ponto A@W4 com C_0 e C_{inf} determinados por Bendiksen

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma revisão bibliográfica das equações de fechamento com o intuito de analisar a influência das mesmas sobre a evolução do escoamento em golfadas. Para isso, foram realizadas simulações combinando diferentes correlações, e os resultados obtidos foram, então, comparados a resultados experimentais. Através da análise apresentada anteriormente, torna-se possível indicar as melhores combinações das equações de fechamento para a determinação de cada parâmetro específico. Para todos os parâmetros analisados, a utilização de C_0 e C_{inf} experimentais apresentou melhores resultados do que a correlação proposta por Bendiksen (1984), embora a diferença entre esses dois métodos não tenha sido muito significativa para a maioria dos parâmetros estudados. Entretanto, as maiores diferenças entre resultados numéricos e experimentais foram encontradas na comparação entre os fatores de esteira utilizados. Na determinação do comprimento da bolha alongada, o fator de esteira proposto por Rodrigues (2009) foi o que se mostrou mais eficaz. Para o comprimento do pistão, a melhor aproximação dos valores numéricos com experimentais foi obtida pelo fator de esteira de Grenier (1997). Na análise realizada para a taxa de coalescência e número de bolhas coalescidas, nota-se que existe uma grande influência da correlação do fator de esteira nesses parâmetros. No entanto, dada a ausência de resultados experimentais para comparação, não é possível determinar qual autor propôs constantes do fator de esteira que melhor aproximem os resultados numéricos dos resultados experimentais. Em relação aos outros parâmetros, a velocidade translacional da bolha alongada e pressão do gás no interior da mesma, todas as simulações apresentaram resultados muito próximos aos dados experimentais. Ao fim deste estudo, nota-se que a maior influência das relações de fechamento está sobre os comprimentos de bolha e de pistão - os outros parâmetros são pouco afetados pelas correlações aqui estudadas - e que se torna de extrema relevância adequar as combinações de correlações a serem utilizadas em relação à prioridade de cada parâmetro dentro da sua finalidade.

REFERENCES

- Bendiksen K. H., 1984. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. *Int. J. Multiphase Flow*, 10, 467-483.
- Braunner, N., Ullmann, A., 2003. Modelling of gas entrainment from Taylor bubbles. Part B: A stationary bubble. *International Journal of Multiphase Flow*, 30, pp. 273-290.
- Dukler A. E., Hubbard, M. G., 1975. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 14 (4), 337-347.
- Fernandes, R. C., Semiat, R., Dukler, A. E., 1983. Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes. *AIChE Journal*, vol. 29, n. 6, pp. 981-989.
- Grenier P., 1997. Evolution des longueurs de bouchons en écoulement intermittent horizontal. Toulouse: Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 193p. Tese (Doutorado).
- Rodrigues, H. T., 2009. Simulação numérica do escoamento bifásico gás-líquido no padrão de golfadas utilizando um modelo lagrangeano de seguimento de pistões, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 192p.
- Rosa, E. S., 2006. Análise de Escoamentos em Golfadas de Óleos Pesados e de Emulsões Óleo-água. Quarto Relatório de Atividades e Resultados alcançados, Projeto UNICAMP / CENPES – PETROBRAS, Campinas, SP.
- Rosa, E. S., Mazza, R. A., Morales, R. E., Rodrigues, H. T., Cozin, C., 2014. Analysis of slug tracking model for gas-liquid flows in a pipe. *The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.
- Taitel, Y., Barnea, D., 1990. Two phase slug flow. *Advances in Heat Transfer Hartnett J.P. and Irvine Jr. T.F.*, ed., vol. 20, 83-132, Academic Press.
- Taitel, Y., Barnea, D., 1990. A consistent approach for calculating pressure drop in inclined slug flow. *Chemical Engineering Science*, Vol. 45, No. 5, pp. 1199-1206.
- Wallis, G. B., 1969. One dimensional two-phase flow. New York, McGraw-Hill.