

# SOLUÇÃO ANALÍTICA DE UM ESCOAMENTO BIFÁSICO INTERMITENTE HORIZONTAL GÁS-LÍQUIDO EM GOLFADAS

*Paula Francis Benevides*<sup>1</sup>

*Rigoberto E. M. Morales*<sup>2</sup>

**Resumo:** O escoamento gás-líquido intermitente em padrão golfada de líquido é composto por uma sucessão de bolhas de gás alongadas e pistões de líquido. Esta seqüência de bolhas alongadas e pistões de líquido interage cinematicamente e dinamicamente à medida que viaja ao longo da tubulação. Estas interações é que produzem o caráter intermitente do escoamento, isto é, elas não são periódicas no tempo nem no espaço. Pretende-se neste trabalho apresentar uma solução analítica para um escoamento em padrão golfada, pois no modelo dinâmico, as bolhas e pistões são objetos computacionais definidos por volumes discretos que estão acoplados devido às trocas de massa e quantidade de movimento em cada célula unitária. Os parâmetros do escoamento são determinados por meio do fechamento de balanços integrais de massa em cada bolha e em cada pistão e de quantidade de movimento em cada pistão. Os pistões de líquido e as bolhas de gás são iniciados na entrada da tubulação. A propagação de cada pistão e cada bolha é seguida dinamicamente pelo modelo revelando como as estruturas de gás e líquido evoluem ao longo da linha. Assim, dada uma distribuição na entrada, o modelo é capaz de calcular as distribuições de comprimentos de bolhas e pistões em qualquer lugar do duto.

**Palavras-chave:** Escoamento bifásico horizontal, estrutura do escoamento, seguimento de pistões.

**Abstract:** The interminttent gas-liquide slug flow is composed of a succession of elongated gas bubbles and liquid slug. The sequence of elongated bubbles and liquid slugs is under kinematics and dynamic interactions along the flow. These interactions are responsible for the flow intermittence profile; they are not periodically in time or in space. The purpose of this work is to present the analytic solution for a slug flow then

---

<sup>1</sup> Licenciada em Matemática – PUC-PR. Especialista em Metodologia de Ciência – FIBM. Mestranda em Engenharia Mecânica e de Materias pela UTFPR. Professora do Departamento Acadêmico de Matemática do UTFPR (Unidade Curitiba).

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Mecânica – UNICAMP/2000. Professor do Damec/UTFPR Laboratório de Ciências Térmicas - LACIT. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

in the dynamic model the bubbles and the slugs are computational objects defined by discrete volumes that are together due to the mass and momentum exchanges in each unit cell. The flow parameters are determined through the closure of mass balance integrals for each gas bubble and liquid slug and through momentum balance integrals for each liquid slug. The liquid slugs and the gas bubbles are formed at the duct inlet. The propagation of each slug and each bubble is dynamically tracked by the model, revealing how the gas and liquid structures evolve along the line. So, given an inlet distribution, the model is capable to calculate the slug and bubble lengths distributions at any location along the pipe.

**Keywords:** Horizontal slug flow, flow structure, slug tracking.

## 1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de escoamentos bifásicos é freqüente tanto na natureza como em processos industriais. Esse tipo de escoamento pode gerar vários padrões, que dependem de quais fases estão presentes, suas quantidades, velocidades e direções. Um tipo de escoamento que vem sendo encontrado há algum tempo pela indústria petrolífera e nuclear é o escoamento bifásico líquido-gás, e mais restritivamente para algumas velocidades de líquido e gás, o escoamento intermitente em golfadas. Este tipo de escoamento caracteriza-se pela seqüência de pistões de líquido e bolha alongadas de forma intermitente e irregular o que torna a sua modelagem bastante complexa. Os pistões de líquido podem conter pequenos bolhas dispersas, e as bolhas alongadas possuem um filme de líquido que as separam da parede do tubo; um esquema ilustrativo deste tipo de escoamento é mostrado na Fig. (1).

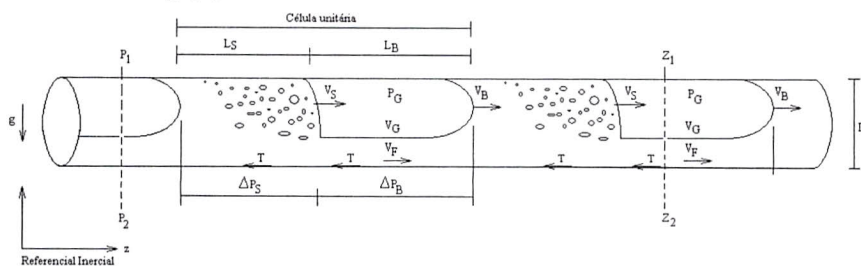


Figura 1. Esquema do escoamento intermitente líquido-gás.

O escoamento gás-líquido no padrão de golfadas, também conhecido como 'slug flow', ocorre com freqüência na produção de óleo em campos terrestres e marítimos. A predição das propriedades das estruturas gás-líquido (tamanho, freqüência e velocidades), assim como seu gradiente de pressão são relevantes na indústria de petróleo para o dimensionamento de linhas, de separadores gás-líquido assim como previsão do inventário de óleo e gás no reservatório. As

recentes descobertas de novos campos com óleos pesados ou devido ao crescente aumento da produção de água em campos maduros, encontram-se situações em que os óleos tem alta viscosidade seja pelo seu baixo grau API ou pela ocorrência de emulsões do tipo água em óleo. Este novo cenário traz grandes desafios para produção causada pela drástica mudança das propriedades da fase líquida.

Os primeiros trabalhos referentes a esse tipo de escoamento surgiram na década de 60; foram iniciados após a introdução do conceito de célula unitária (Wallis (1969)), e deram origem a uma classe de modelos conhecidos por modelos de célula unitária (figura 1). Essa classe de modelos considera o escoamento hidrodinamicamente desenvolvido, de forma que o escoamento torna-se periódico no espaço e no tempo. Apesar de necessitarem de algumas correlações e equações constitutivas, esses modelos são simples de serem aplicados e podem chegar a resultados interessantes sem muita complexidade.

Os modelos baseados nos de dois fluidos e de deslizamento foram introduzidos nas décadas de 80 e 90. A partir dos anos 90, tem-se caminhado para uma solução através de modelos lagrangeanos, que seguem o desenvolvimento de bolhas e pistões ao longo do escoamento. Modelos computacionais podem ser implementados, nos quais as bolhas e pistões são objetos computacionais, e suas propriedades são atualizadas a cada distância percorrida pela frente de bolha.

Baseados em princípios de conservação de massa e de quantidade de movimento, eles são mais generalistas e requerem menor uso de correlações empíricas para fechamento. Capazes de modelar fenômenos transientes e considerar interações entre estruturas gás-líquido, eles encontraram aplicações para determinação de queda de pressão.

A modelagem do escoamento em um padrão golfada com o propósito de se calcular parâmetros do escoamento foi proposta inicialmente por Duckler & Hubbard (1975), posteriormente utilizada e modificada por Nicholson et al (1978) e Taitel & Barnea (1990), entre outros. Duckler & Hubbard (1975) utilizaram o conceito de célula unitária com o intuito de representar as estruturas gás-líquido. O presente trabalho apresenta um desenvolvimento analítico para o cálculo das propriedades ao longo do escoamento, com base em equações vindas de modelos de célula unitária. O modelo prevê, principalmente, a evolução dos comprimentos de bolhas e pistões, e faz uma análise da variação dessas propriedades para a variação de algumas propriedades inerentes ao líquido que está escoando.

## **2. SOLUÇÃO ANALÍTICA DE UM ESCOAMENTO IDEALIZADO**

### **2.1. Desenvolvimento da Solução**

O escoamento bifásico líquido-gás intermitente em golfadas pode ser idealizado de forma que exista uma solução analítica. Isto é possível fazendo-se as hipóteses abaixo:

- a) O escoamento é isotérmico em duto de seção transversal constante.
- b) O escoamento é periódico, isto é, os comprimentos de bolhas e pistões são todos idênticos na entrada do duto ( $z = 0$ ).
- c) As bolhas possuem fração de vazio constante no tempo e no espaço.
- d) Os pistões de líquido são não-aerados.
- e) A velocidade da frente de uma bolha é função unicamente da velocidade de do líquido no pistão precedente, isto é, não há efeito de esteira.

A solução analítica é determinada através do balanço de massa de gás seguindo uma bolha (lagrangeano), do balanço de massa de gás em uma seção transversal (euleriano) e considerando que a pressão de uma bolha é conhecida durante sua trajetória longo do duto.

Considerando apenas uma célula unitária viajando pelo tubo, pode-se dizer que a pressão na bolha varia de forma linear da entrada para a saída do tubo. A pressão de uma bolha de gás em função de sua posição  $z$  no duto é dada por:

$$P_{G(z)} = P_{Gsaida} + \lambda(L - z) \quad (1)$$

onde  $P_{G(z)}$  é a pressão da bolha em qualquer ponto  $z$  do tubo,  $P_{Gsaida}$  é a pressão saída ou de descarga e deve ser conhecida (em geral ela é igual à pressão atmosférica),  $\lambda$  é o gradiente linear de pressão que a bolha sofre ao longo do escoamento e  $L$  o comprimento total do tubo; onde  $\lambda$  pode ser obtido de um escoamento real, o que limita a solução a alguns casos conhecidos, ou através da simulação numérica do escoamento, o que requer muito mais trabalho. Uma abordagem analítica para o gradiente de pressão é a análise da queda de pressão na célula unitária (Taytel e Barnea, 93). Essa queda de pressão é dividida em uma devido ao pistão e outra devido ao filme de líquido, e é avaliada da seguinte forma:

$$\Delta P_s = f_s \left( \frac{L_s}{D} \right) \frac{\rho_L J^2}{2} \quad (2)$$

$$\Delta P_f = f_f \left( \frac{L_B}{D} \right) \frac{\rho_L \bar{V}_f^2}{2} \left( \frac{S_L}{\pi D} \right) \frac{1}{R_f} \quad (3)$$

onde  $\Delta P_s$  é a queda de pressão no pistão,  $\Delta P_f$  é a queda de pressão no filme líquido,  $f_s$  e  $f_f$  são os fatores de atrito para o pistão e filme, respectivamente,  $\rho_L$  é a densidade do líquido,  $\bar{V}_f$  é a velocidade do filme de líquido,  $R_f$  é a fração de líquido da região da bolha e filme, e  $S_L$  é o comprimento do arco que está em contato com o filme, conforme pode ser visto na Fig.(2).

$$f_s = \begin{cases} \frac{64}{Re_s}, & Re_s < 2000 \\ \frac{0,316}{Re_s^{1/4}}, & Re_s \geq 2000 \end{cases} \quad ; \text{ onde } Re_s = \frac{\rho_L J_{(z)} D}{\mu_L} \quad (4)$$

e

$$f_s = \begin{cases} \frac{64}{Re_f}, Re_f < 2000 \\ \frac{0,316}{Re_f^{1/4}}, Re_f \geq 2000 \end{cases} ; \text{ onde } Re_f = \frac{\rho_L \bar{V}_f D_h}{\mu_L} \quad (5)$$

Nas Eq.(4) e (5), a viscosidade do líquido,  $\alpha_L$ , é levada em consideração. Esse é um ponto importante, pois a variação dessa viscosidade será o objeto de estudo desse trabalho.

Na Eq.(5) aparece a variável  $D_h$ , que é o diâmetro hidráulico da região do filme líquido, e é igual a:

$$D_h = \frac{\pi D^2 R_f}{(S_L + S_I)} \quad (6)$$

A variável  $S_I$  da Eq.(6) é comprimento da linha de contato entre o filme e a bolha, e pode ser melhor visualizado na Fig. (1).

A fração de líquido pode ser relacionada com a fração de vazio da bolha por:

$$R_f = 1 - \bar{R}_G \quad (7)$$

Para o cálculo da velocidade do filme de líquido, deve-se aplicar um balanço de massa no filme, chegando a uma relação entre a velocidade do filme e a velocidade da frente de bolha:

$$\bar{V}_f = V_B + \frac{(J_{(z)} - V_B)}{R_f} \quad (8)$$

Os termos  $S_I$  e  $S_L$  mostrados na Fig. (2) podem ser avaliados de acordo com as seguintes correlações, que são válidas para as frações de vazio que comumente ocorrem no "slug flow":

$$S_L \cong (0,5269 R_f + 0,2365) D \quad (9)$$

$$S_I \cong 0,3045 D \quad (10)$$

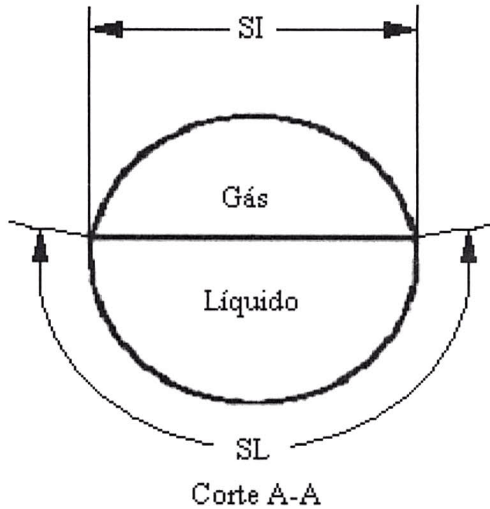


Figura 2 - Esquema com a aproximação da seção transversal do filme de líquido.

Após calculada a queda de pressão total na célula unitária, pode-se calcular o gradiente de pressão para a célula unitária:

$$\lambda_U = \frac{(\Delta P_s + \Delta P_f)}{(L_s + L_b)} \quad (11)$$

Como o escoamento é periódico e sem interação entre bolhas, pode-se extrapolar o gradiente de pressão de uma célula, como sendo o gradiente de pressão ao longo de todo o tubo. Dessa forma a resolução do problema parece simples; calcula-se a queda de pressão na célula de acordo com as Eq.(2) e (3), o gradiente de pressão, de acordo com a Eq. (11). Esse gradiente de pressão pode ser extrapolado para o tubo inteiro; então ele torna-se o parâmetro que faltava para a resolução da Eq.(1)

A solução acaba não sendo tão simples assim, pois o cálculo do gradiente de pressão pela Eq. (11) necessita do conhecimento dos comprimentos de pistão e bolha, que só podem ser calculados com base no gradiente de pressão inicial. Dessa forma problema fica amarrado, pois uma formulação depende da outra.

Assim, foi pensando um método iterativo, no qual um "chute" inicial para o gradiente de pressão levaria ao cálculo de todas as propriedades do escoamento ao longo do tubo, inclusive os comprimentos de pistão e bolha. Com esses valores, pode-se calcular a queda de pressão na célula viajando ao longo do tubo, e o gradiente de pressão da célula.

Tomando esse gradiente de pressão da célula como o novo gradiente de pressão total do tubo, faz-se o processo novamente, com o gradiente corrigido. Novamente calcula-se as propriedades ao longo do escoamento, encontrando os comprimentos de pistão e bolha. Refazendo-se os cálculos a cada novo gradiente de pressão, o método acaba convergindo para um gradiente de pressão definitivo. Finalmente, o gradiente de pressão definitivo é utilizado para o cálculo definitivo das propriedades ao longo do tubo.

A equação (1) propõe que para qualquer instante de tempo a pressão de uma bolha só depende de sua posição  $z$  no duto. A Fig. (1) ilustra a situação em que as bolhas que passam pelas posições  $z_1$  e  $z_2$  apresentam sempre as mesmas pressões  $P_1$  e  $P_2$ , respectivamente.

O comprimento total da bolha pode ser determinado através da conservação da massa de gás seguindo uma bolha. Como o pistão de líquido é não aerado, a massa de gás na bolha é constante. Isto permite estabelecer uma relação entre  $L_B$ ,  $P_G$  e  $R_G$ .

$$m_G = \rho_G \bar{R}_G Vol_G = \frac{P_G}{RT} \bar{R}_G A_T L_B = CTE \quad (12)$$

onde  $R$  é a constante universal dos gases,  $T$  é a temperatura e  $A_T$  é a área da seção transversal. No modelo a fração de vazios e a temperatura do gás na bolha são constantes, portanto o produto da pressão pelo comprimento da bolha é constante:

$$P_G L_B = CTE = P_{G(z)} L_{B(z)} = P_{G(0)} L_{B(0)} \quad (13)$$

ou, em termos do comprimento da bolha:

$$L_{B(z)} = \frac{L_{B(0)} P_{G(0)}}{P_{G(z)}} \quad (14)$$

onde  $L_{B(z)}$  é o comprimento de uma bolha em uma posição qualquer  $z$  do tubo,  $L_{B(0)}$  é o comprimento da bolha na entrada e é a pressão de entrada.

Como as bolhas e pistões são gerados periodicamente, pode-se dizer que a média da vazão mássica de líquido entre a geração de uma célula pistão-bolha e outra é a mesma. Além disto, como o líquido é incompressível, a vazão média de líquido em cada célula é constante. Em vista disto, pode-se dizer que sua velocidade superficial,  $j_L$ , também é. Na prática,  $j_{G(z=L)}$  pode ser conhecida através da medida de vazão em volume de gás na saída. Como o líquido é incompressível, a velocidade superficial de líquido,  $j_L$ , é constante ao longo do tubo, assim a velocidade da mistura em qualquer posição  $z$  é dada por:

$$J_{(z)} = j_L + j_{G(z)} \quad (15)$$

onde a velocidade superficial de líquido é constante ao longo de toda a tubulação, e deve ser um dado de entrada do problema.

Os comprimentos dos pistões ao longo do duto podem ser obtidos a partir de um balanço de massa de gás na seção transversal desejada, logo:

$$L_{S(z)} = \left[ \frac{V_{B(z)} \bar{R}_G}{j_{G(z)}} - 1 \right] L_{B(z)} \quad (16)$$

Ou então, podem ser obtidos a partir das frequências das células na seção desejada, com a seguinte relação.

$$L_{S(z)} = \frac{V_{B(z)} \bar{R}_G - j_{G(z)}}{\bar{R}_G f_{u(z)}} \quad (17)$$

Ainda, para se obter os comprimentos de bolhas, Eq.(4), é necessário conhecermos os comprimentos de bolha na seção de entrada, logo:

$$L_{B(z=0)} = \frac{L_{S(z=0)}}{\left[ \frac{V_{B(z=0)} \bar{R}_G}{j_{G(z=0)}} - 1 \right]} \quad (18)$$

Se conhecermos as frequências das células na seção de entrada, podemos utilizar a seguinte equação:

$$L_{B(z=0)} = \frac{j_{G(z=0)}}{\bar{R}_G f_{u(z=0)}} \quad (19)$$

Ainda, a hipótese (e), a velocidade  $V_B$  da frente de uma bolha nas Eq. (9), (10) e (11) é calculada como:

$$V_{B(z)} = (V_{B(z)})_\infty = C_0 U_{(z)} + V_0 \quad (20)$$

onde  $C_0$  é uma constante e  $V_0$  é a velocidade de deslizamento, no presente estágio dos estudos será desprezado, ou seja,  $V_0 \cong 0$ .



## 2.4 Ordem da Solução e Condições de Contorno

O procedimento de cálculo é realizado em duas etapas. Na primeira etapa é realizado um cálculo iterativo para determinar o gradiente de pressão ( $\Delta p$ ), com  $\Delta p$  conhecido, na segunda etapa é realizado o cálculo da evolução das variáveis geométricas e físicas envolvidas no escoamento em golfadas ao longo de toda a tubulação.

Para determinar o gradiente de pressão ( $\Delta p$ ) do escoamento é realizada a seguinte seqüência de cálculos.

- 1) Aproximar um valor inicial para o gradiente de pressão ( $\Delta p$ ).
- 2) Determinação da pressão sofrida pelas bolhas, qualquer que seja a posição em que elas se encontrem (Eq. (1)). Este é um dado de entrada do modelo analítico e deve ser conhecido previamente.
- 3) Determinação da velocidade superficial do gás ao longo de toda a tubulação (Eq. (17)).
- 4) Determinação da velocidade de mistura ao longo de toda a tubulação (Eq. (18)).
- 5) Determinação da velocidade das frentes de bolha ao longo de toda a tubulação (Eq. (23)).
- 6) Determinação da freqüência na seção de entrada da célula unitária do tubo  $f_u$  calculada a partir de dados experimentais ou a partir de correlações empíricas. No presente trabalho será utilizada a correlação de Heywood e Richardson (1979):

$$f_u = 0.0434 \left[ \frac{j_L}{j_{L(0)}} \left( \frac{2.02}{D} + \frac{j_{L(0)}^2}{gD} \right) \right]^{1.02},$$

- 7) Determinação do comprimento das bolhas na seção de entrada (Eq.(19) ou Eq.(20)).
- 8) Determinação dos comprimentos de bolhas ao longo de toda a tubulação (Eq. (9)).
- 9) Determinação da velocidade do filme de líquido (Eq.(8)).
- 10) Determinação do fator de atrito para o pistão (Eq.(4)).
- 11) Determinação do fator de atrito para o filme (Eq.(5)).
- 12) Determinação do diâmetro hidráulico da região do filme líquido (Eq. (6)).
- 13) Determinação da queda de pressão do pistão (Eq. (2)).
- 14) Determinação da queda de pressão do filme líquido (Eq.(3)).

Para resolver o problema se requer dos seguintes de dados de entrada:

- PR1) o gradiente linear de pressão, utilizado na Eq.(1);
- PR2) os fatores cinemáticos do deslocamento da bolha ( $C_0$  e  $V_0$ ), utilizados na Eq. (23);

- PR3) a fração de vazio,  $R_G$ , (aqui considerada constante no tempo e no espaço), utilizada nas Eq.(19) a (22);
- PR4) o comprimento  $L$  do tubo, utilizada nas Eq.(1);
- PR5) a velocidade superficial do gás na secção de saída,  $j_G$ , utilizada na Eq. (17);
- PR6) a velocidade superficial do líquido de entrada,  $j_L$ , utilizada na Eq. (18);
- PR7) o diâmetro do tubo, utilizada na Eq. (6) e (9);
- PR8) o comprimento de contato entre o filme e a bolha  $S_f$ , utilizada na Eq. (6).

Feito todos esses cálculos, temos como determinar então o gradiente de pressão ( $\square$ ) certo, utilizando a Eq. (11)

### 2.3 Resultados com Valores Numéricos

Aqui é apresentada a solução analítica de um escoamento periódico sem efeito de esteira. O escoamento periódico é aquele no qual os comprimentos de bolhas e pistões são todos idênticos na entrada do duto ( $z = 0$ ).

Para a solução em questão, a configuração tem linha e vazões de gás e líquido coincidentes com simulações realizadas no MULTLAB / FEM - UNICAMP e cujos dados estão disponíveis no MULTLAB (Rosa (2003)). Para esta solução, foi admitido conhecido o valor dos comprimentos de pistões na seção de entrada. O modelo utiliza alguns dados de entrada referentes à geometria do tubo, vazões de líquido e gás e propriedades do escoamento. A tabela (1) indica quais foram os dados de entrada utilizados.

Tabela 1. Valores numéricos a serem utilizados na solução analítica.

Diâmetro do tubo, $D$	0,026 m
Comprimento do tubo, $L$	20 m
Velocidade superficial do líquido de entrada, $j_L$	0,5 m/s
Velocidade superficial do gás na seção de saída, $j_{G(z=L)}$	0,5 m/s
Pressão na seção de saída do tubo, $P_s$	94700 Pa ( $P_{atm}$ )
Fração volumétrica de líquido da bolha $R_f$ ( $1 - R_g$ )	0,46
Comprimento da linha de contato entre o filme e a bolha	0,00792
Fração de vazio das bolhas (adimensional), $R_G$	0,54
Constante para o cálculo da velocidade da bolha, $C_0$ (adimensional)	1,2

De acordo com a formulação, nota-se que a densidade do líquido,  $\rho$ , e a viscosidade do líquido,  $\mu_L$ , são levados em consideração.

Tabela 2. Comparação de viscosidade e de densidade.

Líquido	Densidade, $\rho$	Viscosidade, $\mu_L$ ( $N.s/m^2$ )
Água	1000	0,001

Realizando os cálculos e o processo iterativo descrito no trabalho, chegou-se a gráficos para comparação de alguns parâmetros importantes nesse tipo de escoamento.

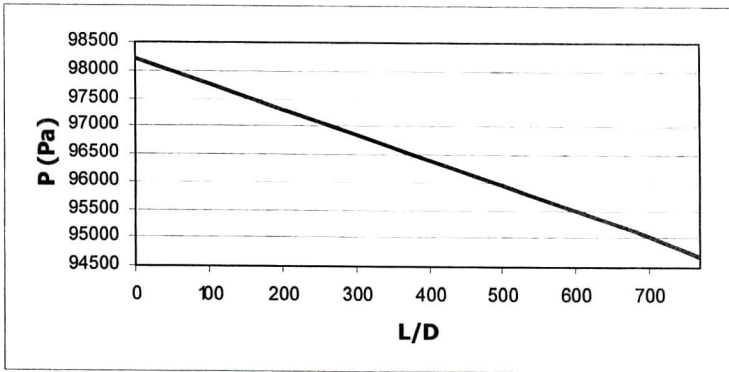


Gráfico 1: Evolução da pressão em uma bolha ao longo da tubulação.

O gráfico (1) demonstra a queda de pressão sofrida por uma bolha ao longo do tubo. A pressão ao longo do tubo leva em consideração a pressão de saída e a perda de atrito.

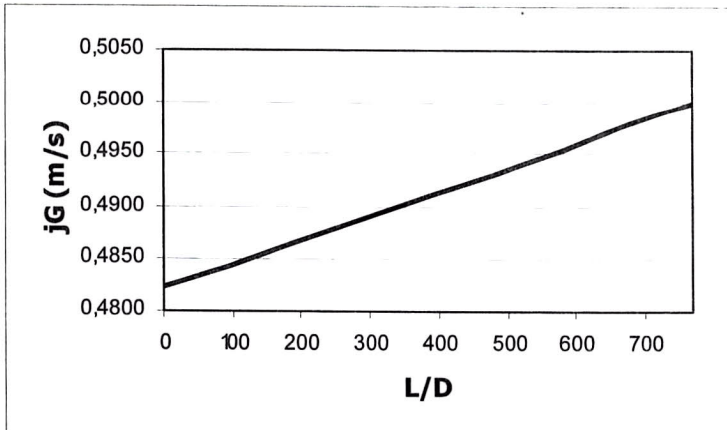


Gráfico 2: Evolução da velocidade superficial do gás (jG) ao longo da tubulação.

O gráfico (2) demonstra a evolução da velocidade superficial de gás ao longo da tubulação. Isso é claro, pois a velocidade superficial de gás na saída é um dado de entrada do problema. A variação de  $j_{G(z)}$  ao longo da tubulação se dá pela Eq. (17), e é inversamente proporcional à pressão em cada posição do tubo, enquanto a pressão diminui,  $j_{G(z)}$  aumenta.

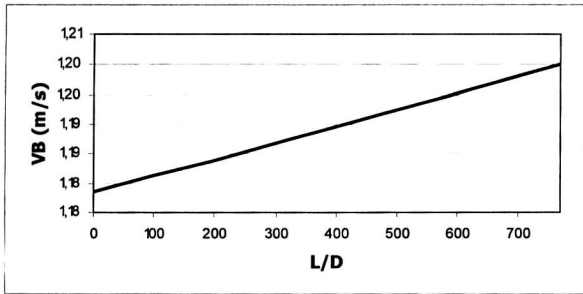


Gráfico 3: Evolução da velocidade da bolha ao longo da tubulação

A velocidade da frente da bolha ao longo do tubo é calculada pela Eq.(23), e sua variação acaba sendo bem parecida com a variação de velocidade superficial de gás, exceto pela escala do eixo ordenado, que esta somando e multiplicando pro alguns fatores.

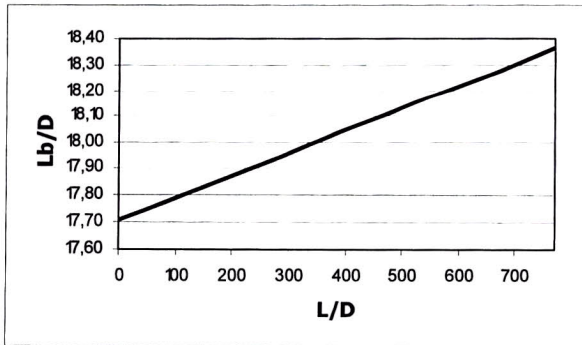


Gráfico 4: Evolução do comprimento da golfada ao longo da tubulação

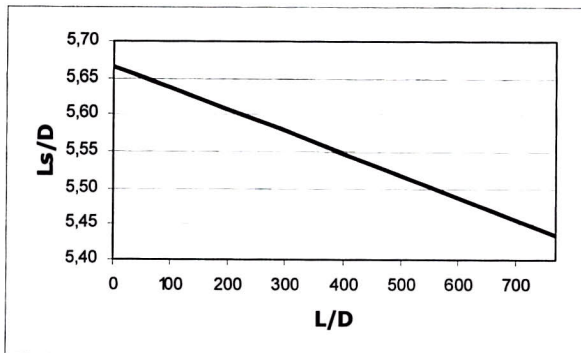


Gráfico 5: Evolução do comprimento do pistão do líquido ao longo da tubulação

Certamente os comprimentos de pistão e bolha ao longo do tubo são alguns dos parâmetros mais importantes para a análise do escoamento em golfadas, e o objetivo dos gráficos (4) e (5) é o de mostrar o desenvolvimento desses dois parâmetros.

## 2.5 Comentários Sobre o Modelo Analítico

- O modelo analítico propaga uma única célula pistão-bolha e não permite a interação entre elas. Assim, ele faz um seguimento lagrangeano de uma célula da entrada até a saída.
- Ele não considera os efeitos viscosos ou inerciais dos termos da equação de transporte da quantidade de movimento. O resultado líquido destes termos é transmitido por meio do perfil de pressão.
- Não há efeitos de entrada ou de saída de bolhas no modelo analítico.
- Se a introdução de bolhas e pistões for periódica, então pode-se dizer que o resultado de uma única bolha repete o que acontece com uma seqüência de bolhas tanto no espaço quanto no tempo.

## REFERÊNCIAS

DUKLER, A. E., Hubbard, M. G. A model for gas-liquid slug in horizontal and near horizontal tubes. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, v.14, (4), 1975.

FAGUNDES NETTO, José Roberto. *Dynamique de poches de gaz isolées en écoulement permanent et non permanent horizontal*. Toulouse: Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1999. Tese (Doutorado).

FRANKLIN, E.M. *Modelagem Numérica para Seguintos Dinâmicos de Bolhas em Escoamento Intermitente Horizontal Gás-Líquido Bordado*, Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2004. Tese (Mestrado)

GRENIER, Philippe. *Evolution des longueurs de bouchons en écoulement intermittent horizontal*. Toulouse: Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1997, 193p. Tese (Doutorado)

ROSA, E.S., Relatório de Pesquisa do projeto Estudo da Termofluidodinâmica de Processos de Produção, PETROBRAS contrato número 650412201-7, 2003.

ROSA, E.S., MORALES, E.R., MELO, A.I., FREIRE, R., FRANÇA, F.A. The evolution of horizontal slug flow, In: *Proceedings of XVI Congresso Brasileiro Eng. Mecânica*, COBEM, Uberlândia, Brazil, 2001, vol 1 a 10, CD ROM.

TAITEL, Y., Barnea, D. Two phase slug flow. In: *Advances in Heat Transfer* (edited by Harnett, J.P. and Irvine, T.F. Jr), v. 20, 1990.

WALLIS, G. B. *One-dimensional two-phase flow*. New York: McGraw-Hill Book Comp., 1969.