

## VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM MODELO DE CÉLULA UNITÁRIA PARA ESCOAMENTOS DE GÁS E LÍQUIDO EM REGIME DE GOLFADAS.

Marc Zwanziger

DE/FEM/UNICAMP - Caixa Postal 6122, Campinas/SP, Brasil. CEP: 13083-970.

[marczw@gmail.com](mailto:marczw@gmail.com)

Eugênio Spanó Rosa

DE/FEM/UNICAMP - Caixa Postal 6122, Campinas/SP, Brasil. CEP: 13083-970.

[erosa@fem.unicamp.br](mailto:erosa@fem.unicamp.br)

**Resumo:** Realizou-se a comparação dos resultados de um modelo de célula unitária de escoamentos bifásicos de gás e líquido em regime de golfadas com uma extensa base de dados experimentais, determinando-se a influência, na precisão do modelo, das relações auxiliares de fechamento, utilizadas para obter a velocidade da bolha e o comprimento do pistão de líquido. Os modelos de célula unitária de fato representam os fenômenos físicos do escoamento em regime de golfadas, mas a precisão destes modelos se mostra fortemente dependente das relações auxiliares.

**Palavras chave:** bolha, slug, golfadas, célula unitária.

### 1. Introdução.

O estudo dos escoamentos de gás e líquido no padrão de golfadas é relevante para o desenvolvimento de diversos ramos da indústria, com destaque para a indústria do petróleo. Os avanços na produção de gás e óleo em águas profundas impõem que se conheça com maior precisão o comportamento deste tipo escoamento, em especial a queda de pressão na tubulação. A tarefa tem se mostrado um desafio, pois os modelos atualmente disponíveis na literatura não são satisfatórios, falhando na abrangência, na precisão, ou em ambos.

O padrão de golfadas caracteriza-se pela passagem alternada de pistões de líquido seguidos, na tubulação, por longas bolhas de gás, conforme o esquema da Fig. 1.

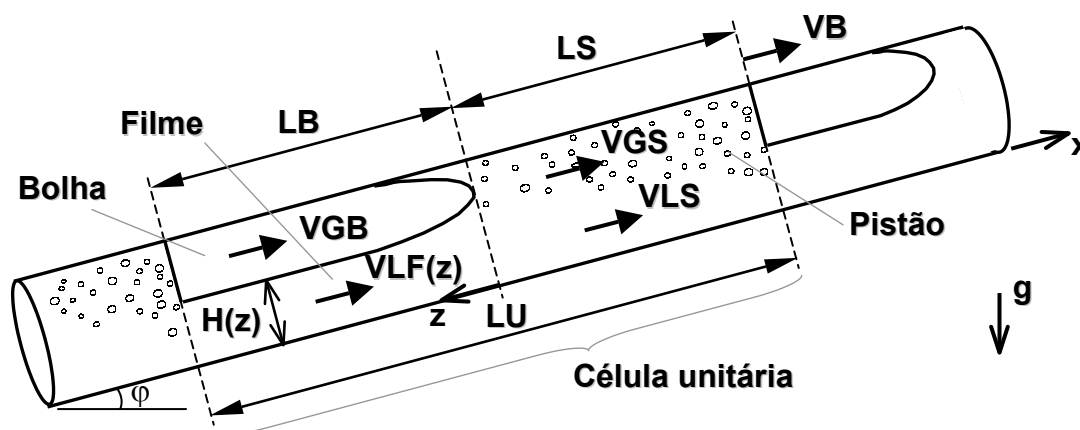


Figura 1 - Representação esquemática da célula unitária.

Na Fig. 1, LB é o comprimento da bolha, LS é o comprimento do pistão, LU é o comprimento da unidade, VB é a velocidade do nariz da bolha, VGB é a velocidade do gás na bolha, VGS é a velocidade do gás no pistão, VLF é a velocidade do líquido no filme, VLS é a velocidade do líquido no pistão,  $\phi$  é o ângulo de inclinação da tubulação com a horizontal, "g" é a aceleração da gravidade e H é a altura do filme de líquido abaixo da bolha. As velocidades são relativas ao eixo da coordenada "x", que tem a mesma direção e sentido do escoamento, e é fixo ao tubo. O eixo da

coordenada “z”, por sua vez, tem a mesma direção, mas sentido contrário ao escoamento, e tem como origem o nariz da bolha, acompanhando esta em seu movimento. As variáveis VLF e H podem variar ao longo de LB, e neste caso são funções da coordenada “z”.

Denomina-se cada um dos pares pistão-bolha por *célula*. As células se repetem quase periodicamente - *quase*, pois as irregularidades das estruturas de gás e líquido também são uma característica deste padrão. O escoamento é intrinsecamente transiente, tendo em vista que o tamanho e a velocidade dos pistões e das bolhas variam, não se repetindo nem no tempo, nem no espaço. Não obstante, estes valores distribuem-se em torno de valores médios.

As variações são atribuídas ao processo de formação e à interação dinâmica entre as estruturas, na medida em que evoluem ao longo da tubulação. Estes fenômenos são complexos para se modelar, mas, considerando-se o escoamento como periódico, torna-se desnecessário modelá-los. Neste caso, as células são consideradas idênticas, e uma única célula representa as demais. Esta célula é denominada *célula unitária* (Wallis, 1969).

São necessárias ainda simplificações de ordem espacial para modelar o escoamento. O escoamento do gás e do líquido nas regiões do nariz e da cauda das bolhas têm efeitos intrinsecamente tridimensionais. O escoamento do líquido na cauda de uma bolha, por exemplo, pode afetar o movimento de outra que a esteja seguindo (Mossis e Grifith, 1962). Não obstante, os modelos de célula unitária consideram estes escoamentos como unidimensionais, inclusive no nariz e na cauda das bolhas.

A família dos modelos de célula unitária teve origem nestas simplificações. Estes modelos são unidimensionais e restringem-se aos fenômenos presentes em um único par de pistão e bolha. Os efeitos tridimensionais são condensados por meio de equações auxiliares e coeficientes. A solução é obtida para a célula unitária, e os resultados são estendidos ao escoamento como um todo.

O primeiro modelo de célula unitária é atribuído a Dukler e Hubbard (1975). Este foi desenvolvido para escoamentos horizontais. Nicholson, Aziz e Gregory (1978) propuseram correções e extensões ao modelo de Dukler e Hubbard. Fernandes, Semiat e Dukler (1983), fundamentados nos conceitos e idéias de Dukler e Hubbard, propuseram um modelo para escoamentos verticais. Posteriormente, Kokal e Stanislav (1989) propuseram uma forma alternativa de fechamento das equações de balanço. Por último, Taitel e Barnea (1990) propuseram um modelo de célula unitária para escoamentos horizontais, verticais e inclinados.

Todos os modelos acima têm em comum o fato de necessitarem de equações auxiliares para o fechamento das equações de balanço de massa e de quantidade de movimento, pois há mais variáveis que equações disponíveis. As diferenças verificadas entre os resultados obtidos com os modelos e os dados experimentais são atribuídas à imprecisão nestas equações auxiliares, bem como a algumas das simplificações adotadas nas equações de balanço. Decidiu-se investigar em que medida a incerteza dos resultados advém das equações auxiliares, ou das simplificações adotadas, ou de ambas.

Para levar a cabo esta investigação, foi adotado o modelo de célula unitária de Taitel e Barnea (1990) como modelo de teste. A precisão do modelo foi aferida comparando-se seus resultados contra dados experimentais. Obteve-se resultados do modelo com e sem a utilização das equações auxiliares de fechamento, substituindo estas por valores experimentais.

## 2. O modelo de Taitel e Barnea

Nesta seção, é apresentado de forma condensada o modelo de Taitel e Barnea (1990), mostrando suas principais equações e destacando suas principais características e simplificações.

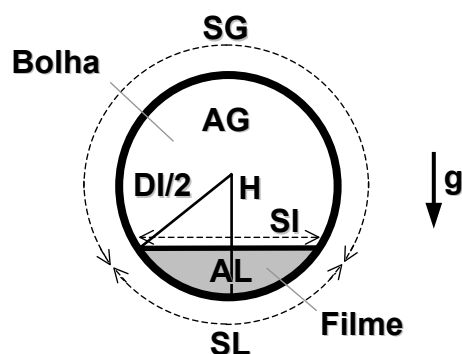


Figura 2 - Corte transversal da célula unitária na região da bolha de gás e do filme de líquido.

No modelo, a geometria do pistão de líquido é aproximada por um cilindro de comprimento LS. A geometria do conjunto formado pela bolha de gás e pelo filme de líquido também é aproximada por um cilindro, de comprimento LB.

No corte transversal, a interface entre o gás e o líquido é retilínea e horizontal, conforme o esquema da Fig. 2. Na figura, SG é o perímetro seco, SL o perímetro molhado, SI o perímetro da interface, H a altura de filme, DI o diâmetro interno da tubulação, AG a área ocupada pelo gás e AL a área ocupada pelo líquido. A soma destas últimas resulta na área A da seção transversal interna do tubo. Pode-se modelar o filme de líquido abaixo da bolha com altura H variável ou, de forma simplificada, com altura H constante. Neste segundo caso, a interface é plana e horizontal. O modelo de Taitel e Barnea possui três variações, ou, na terminologia original, três casos - C1, C2 e C3. Os casos C1 e C2 são com H variável, ao passo que o caso C3 é com H constante.

O procedimento para obter as variáveis H, LS e LB, que completam a geometria da célula unitária, é descrito a seguir: Parte-se das variáveis de entrada do modelo, listadas na Tab. 1, que devem se conhecidas *a priori*. Em seguida, calcula-se as variáveis cuja obtenção depende das relações auxiliares de fechamento, listadas na Tab. 2.

Tabela 1. Variáveis de entrada ao modelo de Taitel e Barnea.

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO	UNIDADE
DI	Diâmetro interno da tubulação.	m
$\phi$	Ângulo da tubulação com a horizontal.	rad
$\rho_L$	Massa específica do líquido.	Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_G$	Massa específica do gás.	Kg/m <sup>3</sup>
$\mu_L$	Viscosidade dinâmica do líquido.	N.s/m <sup>2</sup>
$\mu_G$	Viscosidade dinâmica do gás.	N.s/m <sup>2</sup>
JL	Velocidade superficial do líquido.	m/s
JG	Velocidade superficial do gás.	m/s

Tabela 2. Variáveis obtidas com as relações auxiliares de fechamento.

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO	UNIDADE
LS	Comprimento do pistão.	m
VB	Velocidade da bolha.	m/s
RLS	Fração de líquido no pistão.	-
VGS	Velocidade do gás no pistão.	m/s

Conhecendo-se as variáveis listadas nas Tabs. 1 e 2, pode-se calcular a altura de filme H. A equação destinada a obter H denomina-se *modelo de bolha*. Yoshizawa (2005) mostrou que os modelos de bolha pertencentes aos modelos de célula unitária disponíveis na literatura são equivalentes, pois as equações propostas podem ser obtidas a partir de simplificações de uma equação mais completa. Esta equação mais completa (Eq. 1a) foi a proposta por Taitel e Barnea (1990), e leva em consideração as tensões nas interfaces entre o gás e tubo, entre o líquido e o tubo, e entre o gás e o líquido.

$$\frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\frac{\tau_L \cdot S_L}{AL} - \frac{\tau_G \cdot S_G}{AG} - \frac{\tau_I \cdot S_I}{AL} - \frac{\tau_I \cdot S_I}{AG} + (\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \text{sen}(\phi)}{(\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \text{cos}(\phi) - \rho_L \cdot \frac{ULF^2}{RBF} \cdot \frac{\partial RBF}{\partial H} - \rho_G \cdot \frac{UGB^2}{(1 - RBF)} \cdot \frac{\partial RBF}{\partial H}} \quad (1a)$$

A Eq. 1a representa o caso C1 do modelo. As Equações 1b e 1c são simplificações sugeridas pelos próprios autores, representando os casos C2 e C3 do modelo, respectivamente. No caso C2, desconsidera-se os termos relativos ao gás da bolha, ou seja,  $\tau_G$ ,  $\tau_I$  e  $\rho_G$ :

$$\frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\frac{\tau_L \cdot SL}{AL} + \rho_L \cdot g \cdot \text{sen}(\phi)}{\rho_L \cdot g \cdot \text{cos}(\phi) - \rho_L \cdot \frac{ULF^2}{RBF} \cdot \frac{\partial RBF}{\partial H}} \quad (1b)$$

No caso C3, procura-se determinar a altura de equilíbrio do filme, na qual as tensões nas interfaces e as forças gravitacionais se compensam. Neste caso, a aceleração do filme é nula, de modo que sua velocidade e altura são constantes. Com altura de filme constante,  $\partial H/\partial z$  é nulo. Com  $\partial H/\partial z$  nulo, a Eq. 1a resulta na Eq. 1c:

$$\frac{\tau_L \cdot SL}{AL} - \frac{\tau_G \cdot SG}{AG} - \frac{\tau_I \cdot SI}{AL} - \frac{\tau_I \cdot SI}{AG} + (\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \text{sen}(\phi) = 0 \quad (1c)$$

Para facilitar a compreensão, as variáveis das Eqs. 1a, 1b e 1c estão representadas nas Figs. 1 e 2, exceto  $\rho_L$ ,  $\rho_G$ , ULF, UGB e RBF. As variáveis  $\rho_L$  e  $\rho_G$  representam as densidades do líquido e do gás, respectivamente. As variáveis ULF e UGB representam, respectivamente, as velocidades do líquido no filme e do gás na bolha, relativas à célula unitária, ou seja, a um referencial que se move com a bolha (Eqs. 2a e 2b):

$$ULF = VLF - VB \quad (2a)$$

$$UGB = VGB - VB \quad (2b)$$

RBF representa a fração de líquido na seção transversal do tubo (Fig. 2), que pode ser definida como a razão entre a área molhada AL e a área total A da seção transversal. A diferencial  $\partial RBF/\partial H$  (presente nas Eqs. 1a e 1b) é dada pela Eq. 3:

$$\frac{\partial RBF}{\partial H} = \frac{8\sqrt{(HN-1).HN}}{\pi} \quad (3)$$

As tensões de cisalhamento  $\tau_G$ ,  $\tau_L$  e  $\tau_I$  estão representadas na Fig. 3.  $\tau_G$  é a tensão de cisalhamento entre o gás e a parede do tubo,  $\tau_L$  é a tensão de cisalhamento entre o líquido e a parede do tubo, e  $\tau_I$  é a tensão de cisalhamento na interface entre o gás e o líquido.

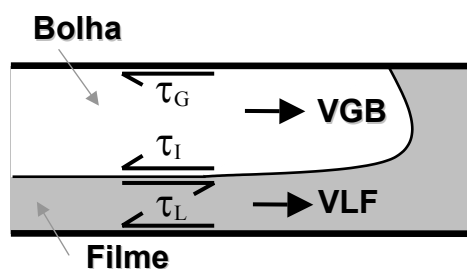


Figura 3 – Tensões de cisalhamento nas interfaces.

As tensões  $\tau_G$ ,  $\tau_L$  e  $\tau_I$  são dadas pelas equações 4a, 4b e 4c, respectivamente:

$$\tau_G = \frac{f_G \cdot \rho_G \cdot VGB^2}{2} \quad (4a)$$

$$\tau_L = \frac{f_L \cdot \rho_L \cdot VLF^2}{2} \quad (4b)$$

$$\tau_I = \frac{f_I \cdot \rho_I \cdot (VGB - VLF)^2}{2} \quad (4c)$$

Onde  $f_G$ ,  $f_L$  e  $f_I$  são os fatores de atrito entre o gás e o tubo, o líquido e o tubo, e gás e o líquido, respectivamente. Para maiores detalhes, veja Taitel e Barnea (1990).

As Equações 1a e 1b são equações diferenciais de primeira ordem, que podem ser resolvidas numericamente em um processo de marcha. Por outro lado, a Equação 1c é algébrica, e sua raiz deve ser encontrada numericamente. Todas as variáveis das Eqs. 1a, 1b e 1c são funções da altura de filme H ou das variáveis listadas nas Tabs. 1 e 2, ou de uma combinação destas. Conhecidas estas variáveis, é possível resolver qualquer uma das Eqs. 1a, 1b e 1c.

Os modelos de bolha definem a forma da bolha (a altura de filme H), mas não o comprimento da mesma (LB). Para obter LB, lança-se mão do balanço de massa de gás ou de líquido na célula unitária. Do balanço de gás, deriva a Eq. 5a:

$$\frac{LS.(VLS.RS - JL)}{VB} = \frac{(JL - VLS.RS - VB(1 - RS))LB}{VB} + \int_0^{LB} (1 - RBF).dz \quad (5a)$$

Na Equação 5a, RS é a fração volumétrica de líquido no pistão. Esta equação é utilizada como critério de parada na solução das Eqs. 1a e 1b. Em cada passo da integração, calcula-se o lado direito da Eq. 5a, assumindo-se que LB é o comprimento integrado até o último passo. A integração prossegue até que a equação seja satisfeita, determinando assim LB. Na solução da Eq. 1c, RBF é constante, pois H é constante. Desta forma, LB pode ser calculado analiticamente com a Eq. 5a. Em qualquer dos casos, para utilizar a Eq. 5a, deve-se conhecer LS, que pode ser obtido com uma relação auxiliar de fechamento (vide Tab. 2).

A Eq. 5a foi originalmente proposta por Taitel e Barnea (1990) para obter LB. As Eqs. 5b e 5c são variações linearmente dependentes da Eq. 5a, e também podem ser utilizadas para obter LB.

$$\frac{LU.(JL - VLS.RS)}{VB} = LB.(1 - RS) - \int_0^{LB} (1 - RBF).dz \quad (5b)$$

$$\frac{VLS.RS}{VB.\beta} + (1 - RS) - \frac{JL}{VB.\beta} = \frac{1}{LB} \int_0^{LB} (1 - RBF).dz \quad (5c)$$

Conforme a escolha da equação (5a, 5b ou 5c), deve-se conhecer uma das três variáveis: LS, LU, ou  $\beta$ , respectivamente. Assim, não é necessário conhecer LS para utilizar as Eqs. 5b ou 5c.

Obtido H, LB, e qualquer uma das três variáveis: LS, LU, ou  $\beta$ , pode-se partir para o cálculo de outras variáveis de interesse, como a queda de pressão na célula unitária, por exemplo. Neste estudo, a implementação do modelo resumiu-se à obtenção das variáveis geométricas.

### 3. Dados experimentais.

Testes experimentais para escoamentos horizontais de gás e de líquido em regime de golfadas foram realizados para diversas condições de operação, variando-se o diâmetro da tubulação, as densidades, as viscosidades e as velocidades superficiais do líquido e do gás. O levantamento dos dados foi realizado em mais de uma montagem experimental. Os dados obtidos estão agregados na Tabela 3. A metodologia pode ser encontrada em Rosa (2004).

Na primeira coluna da tabela estão indicados os fluidos utilizados em cada teste, bem como a distância entre a estação de aquisição de dados e o ponto de injeção do gás e do líquido, em diâmetros da tubulação. A@W refere-se ao par ar e água. A@G refere-se ao par ar e uma mistura de água com glicerina. GN@CAM refere-se ao par gás natural e um óleo cru proveniente do campo de Camorim, em Sergipe. N2@MRL10 refere-se ao par gás N<sub>2</sub> e um óleo cru proveniente do campo de Marlim, na bacia de Campos. Mais de um levantamento de dados foi realizado com os pares A@W e A@G. Nestes casos, foi adicionada uma letra distintiva ao código do fluido - A, B ou C - para distinguir a qual levantamento os dados pertencem.

A segunda coluna da tabela mostra o diâmetro interno DI da seção de testes. A terceira e a quarta colunas mostram as densidades  $\rho_L$  e  $\rho_G$  do líquido e do gás, respectivamente. A quinta e a sexta colunas mostram as viscosidades dinâmicas  $\mu_L$  e  $\mu_G$ , ao passo que sétima e a oitava colunas mostram as velocidades superficiais *in situ* JL e JG, do líquido e do gás, respectivamente. Os dados contidos nas colunas de 2 a 8 são os dados de entrada ao modelo de Taitel e Barnea (vide Tab. 1).

Na nona e na décima colunas estão os valores médios da velocidade VB e do comprimento LS, respectivamente. No modelo de Taitel e Barnea, estas variáveis devem ser obtidas com equações auxiliares de fechamento (vide Tab. 2).

Nas três últimas colunas da Tab. 3, estão os valores médios experimentais das variáveis de saída ao modelo de Taitel e Barnea. LB é o comprimento da bolha, f a frequência da unidade, e  $\beta$  o fator de intermitência (LB/LU).

Tabela 3 - Pontos de operação experimental e resultados medidos.

1	VAR. ENTRADA							REL. AUX.		VAR. SAÍDA		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
FLUIDOS	DI	$\rho_L$	$\rho_G$	$\mu_L$	$\mu_{G.10^5}$	JL	JG	VB	LS	LB	f	$\beta$
-	m	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	cP	Ns/m <sup>2</sup>	m/s	m/s	m/s	m	m	Hz	
A@W 514 A	0,026	998	1,110	0,95	2,0	0,33	0,66	1,11	0,42	1,19	0,688	0,739
A@W 514 A	0,026	998	1,128	0,95	2,0	0,33	1,30	1,84	0,37	2,28	0,694	0,861
A@W 514 A	0,026	998	1,134	0,95	2,0	0,33	1,62	2,20	0,39	3,13	0,623	0,888
A@W 514 A	0,026	998	1,128	0,95	2,0	0,50	0,50	1,13	0,33	0,53	1,326	0,616
A@W 514 A	0,026	998	1,162	0,95	2,0	0,68	0,63	1,51	0,30	0,41	2,102	0,578
A@W 514 A	0,026	998	1,191	0,95	2,0	0,68	1,23	2,22	0,31	0,92	1,800	0,746
A@W 514 A	0,026	998	1,206	0,95	2,0	0,68	1,53	2,59	0,34	1,25	1,622	0,785
A@W 777 B	0,026	998	1,150	0,95	2,0	0,34	0,65	1,09	0,45	1,25	0,639	0,737
A@W 777 B	0,026	998	1,153	0,95	2,0	0,35	1,30	1,83	0,41	2,51	0,626	0,858
A@W 777 B	0,026	998	1,154	0,95	2,0	0,35	1,57	2,17	0,42	3,17	0,604	0,883
A@W 777 B	0,026	998	1,154	0,95	2,0	0,50	0,50	1,09	0,32	0,50	1,323	0,609
A@W 777 B	0,026	998	1,161	0,95	2,0	0,66	0,61	1,37	0,32	0,45	1,792	0,586
A@W 777 B	0,026	998	1,170	0,95	2,0	0,67	1,24	2,17	0,35	1,05	1,556	0,752
A@W 777 B	0,026	998	1,174	0,95	2,0	0,67	1,63	2,61	0,37	1,54	1,369	0,808
A@W 777 C	0,026	998	1,149	0,95	2,0	0,33	0,61	1,03	0,47	1,29	0,582	0,732
A@W 777 C	0,026	998	1,152	0,95	2,0	0,33	1,25	1,77	0,41	2,52	0,604	0,860
A@W 777 C	0,026	998	1,153	0,95	2,0	0,33	1,55	2,12	0,44	3,47	0,543	0,888
A@W 777 C	0,026	998	1,154	0,95	2,0	0,53	0,50	1,11	0,36	0,50	1,292	0,582
A@W 777 C	0,026	998	1,162	0,95	2,0	0,67	0,63	1,44	0,33	0,44	1,867	0,572
A@W 777 C	0,026	998	1,168	0,95	2,0	0,66	1,22	2,13	0,34	1,05	1,526	0,755
A@W 777 C	0,026	998	1,172	0,95	2,0	0,68	1,53	2,53	0,38	1,47	1,367	0,795
A@G 777 A	0,026	1188	1,172	23,9	2,0	0,33	0,63	1,31	0,39	1,13	0,863	0,741
A@G 777 A	0,026	1188	1,177	23,9	2,0	0,33	1,25	1,98	0,34	2,31	0,746	0,872
A@G 777 A	0,026	1188	1,183	23,9	2,0	0,33	1,55	2,41	0,27	2,52	0,862	0,904
A@G 777 A	0,026	1188	1,181	23,9	2,0	0,50	0,47	1,26	0,32	0,42	1,718	0,568
A@G 777 A	0,026	1188	1,197	23,9	2,0	0,67	0,61	1,67	0,21	0,34	3,033	0,625
A@G 777 A	0,026	1188	1,198	23,9	2,0	0,67	1,24	2,41	0,25	0,80	2,285	0,760
A@G 777 A	0,026	1188	1,197	23,9	2,0	0,67	1,53	2,77	0,26	1,08	2,067	0,803
A@G 777 A	0,026	1188	1,196	23,9	2,0	1,33	0,62	2,44	0,25	0,20	5,444	0,442
A@G 777 A	0,026	1188	1,197	23,9	2,0	1,35	1,22	3,10	0,25	0,37	5,027	0,600
A@G 777 B	0,026	1188	1,174	23,9	2,0	0,33	0,63	1,23	0,22	0,69	1,354	0,756
A@G 777 B	0,026	1188	1,183	23,9	2,0	0,33	1,22	1,96	0,24	1,66	1,033	0,875
A@G 777 B	0,026	1188	1,186	23,9	2,0	0,34	1,55	2,43	0,26	2,36	0,929	0,901
A@G 777 B	0,026	1188	1,186	23,9	2,0	0,50	0,47	1,23	0,15	0,25	3,122	0,624
A@G 777 B	0,026	1188	1,197	23,9	2,0	0,67	0,63	1,65	0,20	0,33	3,166	0,625
A@G 777 B	0,026	1188	1,197	23,9	2,0	0,66	1,23	2,40	0,26	0,85	2,172	0,766
A@G 777 B	0,026	1188	1,197	23,9	2,0	0,67	1,54	2,76	0,26	1,08	2,053	0,805
A@G 777 B	0,026	1188	1,198	23,9	2,0	1,35	0,63	2,45	0,24	0,19	5,666	0,436
A@G 777 B	0,026	1188	1,197	23,9	2,0	1,33	1,22	3,05	0,25	0,37	4,869	0,595
GN@CAM	0,154	889	1,163	33,2	2,0	0,33	1,68	3,26	5,43	48,96	0,060	0,892
GN@CAM	0,154	889	1,163	33,2	2,0	0,51	0,52	1,92	5,83	11,51	0,111	0,653
GN@CAM	0,154	889	1,163	33,2	2,0	0,67	0,67	2,16	4,89	10,10	0,144	0,646
GN@CAM	0,154	889	1,163	33,2	2,0	0,67	1,32	2,77	4,33	17,03	0,130	0,797
GN@CAM	0,154	889	1,163	33,2	2,0	0,72	1,72	3,34	4,46	18,87	0,143	0,809
GN@CAM	0,154	889	1,163	33,2	2,0	1,31	0,68	2,83	3,42	3,51	0,409	0,506
GN@CAM	0,154	889	1,163	33,2	2,0	1,32	1,29	3,56	3,26	6,37	0,370	0,662
GN@CAM	0,154	889	1,161	33,2	2,0	1,31	1,67	3,79	3,31	7,15	0,362	0,683
GN@CAM	0,154	889	1,161	33,2	2,0	1,28	2,38	4,21	3,41	9,61	0,323	0,738
GN@CAM	0,154	889	1,163	33,2	2,0	1,29	3,00	4,74	3,41	11,40	0,320	0,770
N2@MRL10	0,029	917	1,182	349	2,0	0,17	0,62	1,53	0,17	0,73	1,695	0,809
N2@MRL10	0,029	917	1,184	340	2,0	0,17	0,77	1,83	0,15	0,87	1,792	0,848
N2@MRL10	0,029	917	1,206	324	2,0	0,17	1,21	2,64	0,15	1,43	1,668	0,906
N2@MRL10	0,029	917	1,278	324	2,0	0,33	0,58	1,78	0,13	0,29	4,263	0,689
N2@MRL10	0,029	917	1,311	400	2,0	0,33	0,70	1,61	0,12	0,25	4,403	0,679
N2@MRL10	0,029	917	1,311	464	2,0	0,33	1,12	1,98	0,13	0,52	3,047	0,801
N2@MRL10	0,029	917	1,311	464	2,0	0,33	1,40	2,94	0,27	0,99	2,331	0,783

#### 4. Comparação dos resultados do modelo com dados experimentais.

Numa primeira etapa, analisou-se a influência da precisão dos modelos de bolha na precisão do modelo de célula unitária de Taitel e Barnea (1990). Foram testados os três casos propostos, descritos pelas Eqs. 1a, 1b e 1c. Para evitar que a propagação das incertezas das equações auxiliares contaminasse a análise, substituiu-se os valores fornecidos pelas equações por valores experimentais. No lugar da Eq. 1a original, utilizou-se como critério de parada a Eq. 5b, pois com esta o modelo forneceu resultados mais precisos. Considerou-se ainda que o pistão de líquido era não-aerado (RLS=1). Os resultados estimados de LB são comparados com os resultados experimentais nas Figs. 4a, 4b e 4c, que apresentam valores normalizados de LB (LB/DI).

Na diagonal central de cada gráfico (linha contínua), os valores calculados são iguais aos valores experimentais. As diagonais pontilhadas, por sua vez, representam os limites de +/- 10% de diferença entre estes valores. Consta em cada gráfico o valor RMS das diferenças entre os valores calculados e os experimentais (Eq. 6 abaixo). No caso de LB e LS, estas diferenças são normalizadas com referência em DI.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (XC_i - XE_i)^2}{N}} \tag{6}$$

Na Equação 6, XC representa os valores calculados, ao passo que XE representa os valores experimentais. N é o número de pontos.

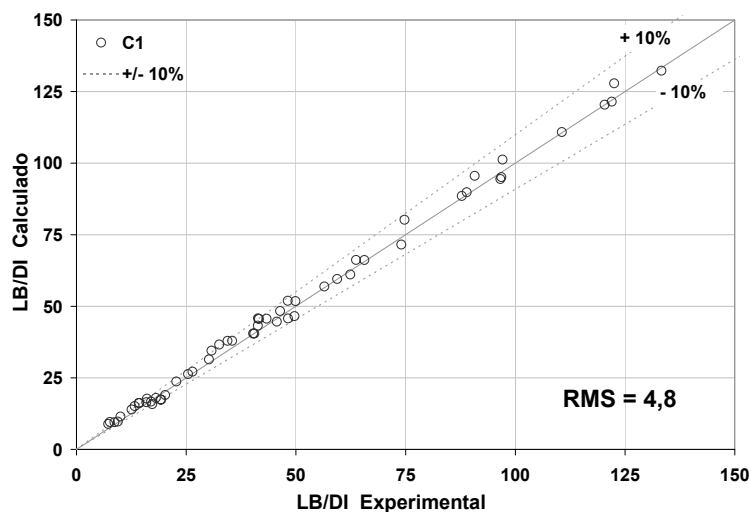


Figura 4a - LB/DI calculado versus LB/DI experimental - caso C1.

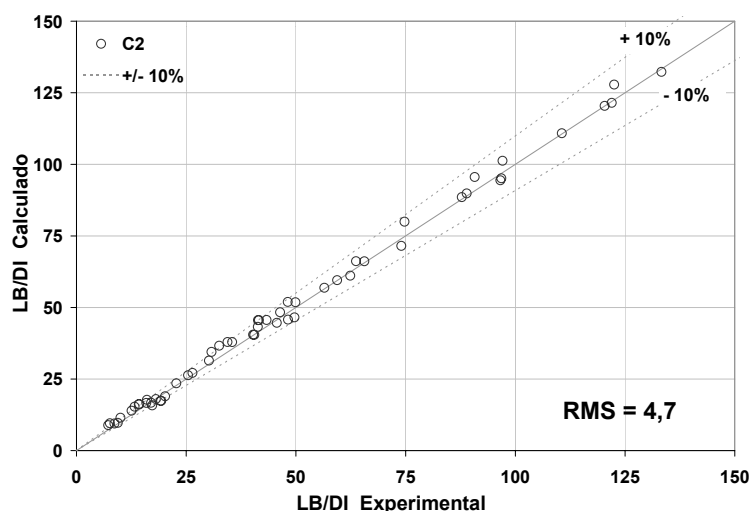


Figura 4b - LB/DI calculado versus LB/DI experimental - caso C2.

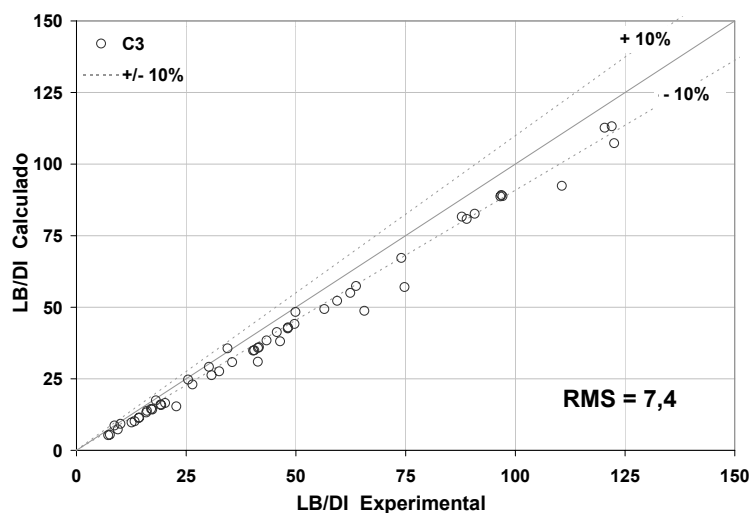


Figura 4c - LB/DI calculado versus LB/DI experimental - caso C3.

O modelo de bolha do caso C1 é o mais completo. O modelo de bolha do caso C2, por sua vez, despreza os termos relativos ao gás da bolha ( $\tau_G$ ,  $\tau_L$  e  $\rho_G$ ). Não obstante, os resultados de ambos são semelhantes, pois ambos fornecem resultados com até 10% de imprecisão. No caso C1, o valor RMS das diferenças é de 4,8 diâmetros, próximo dos 4,7 diâmetros encontrados no caso C2. Conclui-se que as aproximações do caso C2 não prejudicam o modelo. O mesmo não ocorre com as aproximações do caso C3. É visível, no gráfico da Fig. 4c, que os valores calculados são sistematicamente inferiores aos experimentais. Muitos deles estão fora da faixa de +ou- 10% de imprecisão, e o valor RMS de 7,4 diâmetros é superior ao valor RMS dos casos anteriores. Conclui-se que, dos três, o caso C2 do modelo de Taitel e Barnea apresenta a melhor relação custo-benefício, por ser mais simples de calcular que o caso C1, e por fornecer resultados com precisão semelhante a este.

Numa segunda etapa, analisou-se a influência das equações auxiliares de fechamento na precisão do modelo. O modelo de bolha empregado é o definido na Eq. 1b, conforme a conclusão da primeira etapa. Foram utilizadas relações constitutivas auxiliares para estimar o valor de VB e LS. Assim sendo, a equação 5a foi utilizada como critério de parada. O pistão de líquido permaneceu não-aerado (RLS=1).

Em Taitel e Barnea (1990), as relações para VB e LS disponíveis na literatura são discutidas, mas não há uma indicação clara de quais devam ser utilizadas, tendo em vista que não existem relações que forneçam resultados precisos para todos os casos. Para VB, optou-se por utilizar a Eq. 7, com  $C = 2$  no caso de pistão de líquido laminar, ou com  $C =$



1,2 no caso de pistão de líquido turbulento. A transição entre o regime laminar e o turbulento foi definida para o número Reynolds do pistão de líquido (Eq. 8) igual a 2.300.

$$VB = C.J + 0,54.\sqrt{g.DI} \tag{7}$$

$$Re_{LS} = \frac{\rho_L . VLS.DI}{\mu_L} \tag{8}$$

Os valores sugeridos para LS são três: 20DI, 30DI e 32DI. Optou-se por utilizar 30DI. Nos gráficos das Figs. 5 e 6, os valores de VB e LS obtidos com as relações auxiliares são comparados com os valores experimentais. Na Fig. 6, os valores de LS são normalizados com referência em DI (LS/DI).

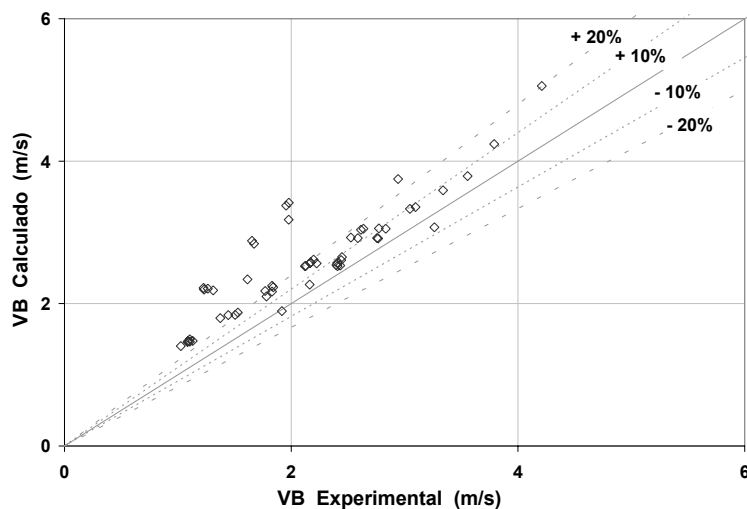


Figura 5 - VB calculado versus VB experimental.

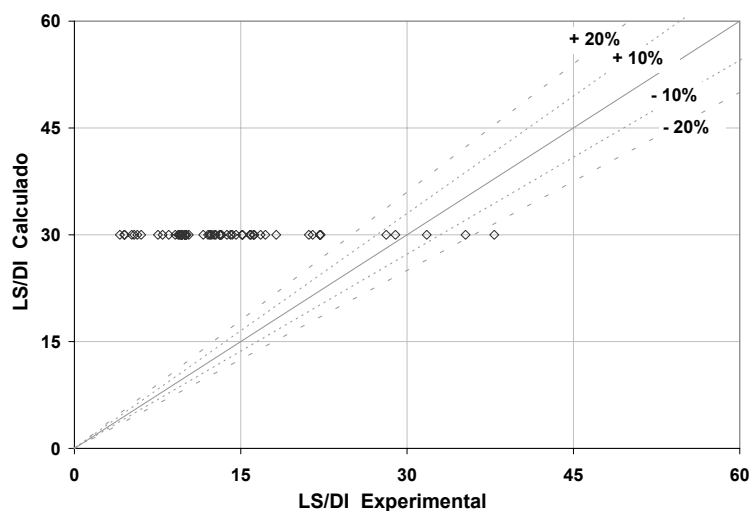


Figura 6 - LS/DI calculado versus LS/DI experimental.

Na figura 5, observa-se que grande parte dos valores de VB estimados estão em uma região fora do intervalo de +ou- 20% de incerteza. Os valores de LS/DI estimados são ainda piores, pois a maior parte deles está fora do intervalo de +ou- 20% de incerteza, conforme pode ser conferido na Fig. 6. A incerteza nas estimativas de VB e LS propaga-se

para as variáveis calculadas. Este efeito torna-se visível nos gráficos das Figs. 7, 8 e 9 a seguir, que apresentam os valores calculados com utilização das relações auxiliares (balão) e com valores experimentais no lugar destas (cruz). Os valores calculados com o modelo de Taitel e Barnea são o comprimento LB da bolha, o fator de intermitência  $\beta$  (LB/LU), e a frequência  $f$  da célula (VB/LU) - Figs 7, 8 e 9, respectivamente. Na figura 7, os valores de LB estão normalizados com referência em DI (LB/DI).

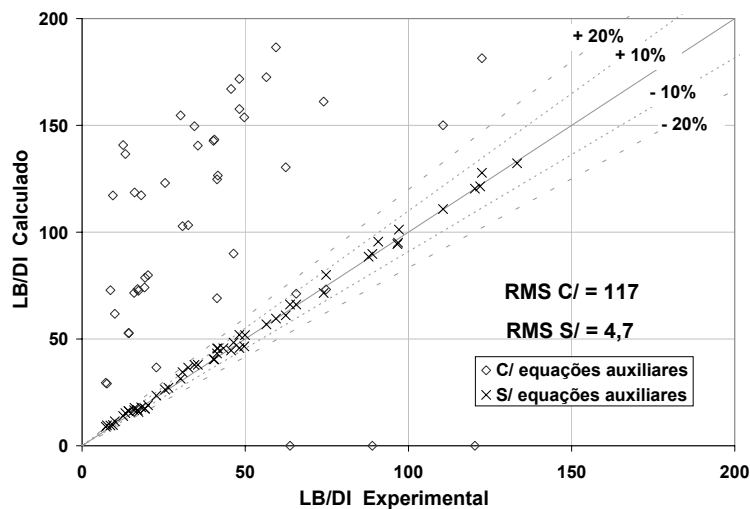


Figura 7 - LB/DI calculado *versus* LB/DI experimental, com e sem a utilização das relações auxiliares.

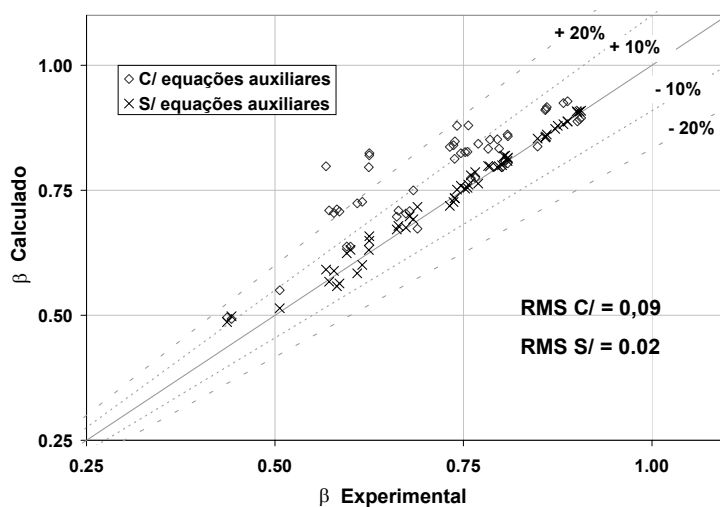


Figura 8 -  $\beta$  calculado *versus*  $\beta$  experimental, com e sem a utilização das relações auxiliares.

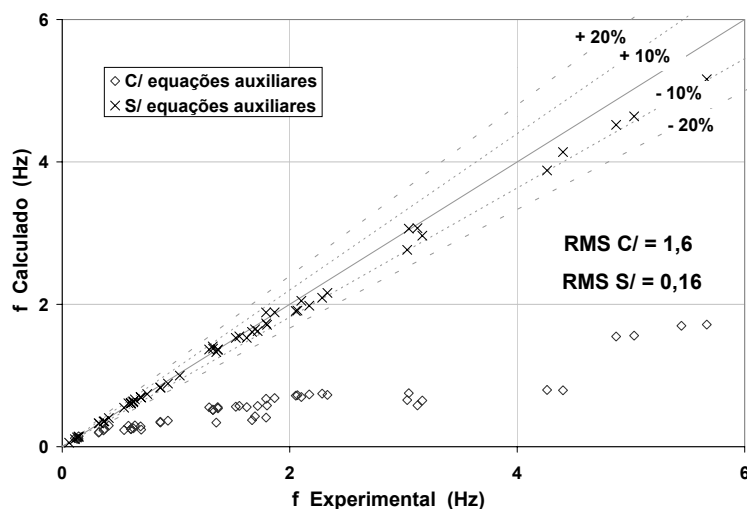


Figura 9 -  $f$  calculado versus  $f$  experimental, com e sem a utilização das relações auxiliares.

Nos gráficos das Figuras 7, 8 e 9, os valores de  $LB/DI$ ,  $\beta$  e  $f$  calculados utilizando-se as relações auxiliares ficaram fora da faixa de  $\pm 20\%$  de imprecisão. Os valores calculados sem a utilização das relações auxiliares, por sua vez, ficaram dentro da faixa de  $\pm 10\%$  de imprecisão. Os valores RMS de  $LB/DI$ ,  $\beta$ , e  $f$ , calculados utilizando-se as relações auxiliares, foram 117 diâmetros, 0,09 e 1,6 Hz, respectivamente. Estes valores são significativamente superiores aos valores RMS das mesmas variáveis, calculadas sem a utilização das relações auxiliares: 4,7 diâmetros, 0,02 e 0,16 Hz, respectivamente.

## 5. Conclusões.

Conclui-se que a imprecisão dos resultados dos modelos unidimensionais de célula unitária para escoamentos em regime de golfadas é devida principalmente às relações auxiliares de fechamento. Substituindo estas por valores experimentais, foram obtidos resultados para  $LB$  dentro do limite de  $\pm 10\%$  de imprecisão, para a ampla variedade de pontos experimentais disponíveis. Utilizando-se de relações auxiliares para  $VB$  e  $LS$ , os resultados obtidos ficaram fora da faixa de  $\pm 20\%$  de imprecisão. Desta forma, as simplificações inerentes ao modelo - a unidimensionalização de um fenômeno tridimensional, e a periodização de um fenômeno transiente - bem como a simplificação adicional adotada - a utilização de pistão de líquido não aerado ( $RLS=1$ ) - não são as principais fontes de imprecisão. As principais fontes de imprecisão são as relações auxiliares de fechamento. O modelo de fato representa os fenômenos físicos deste tipo de escoamento, mas é fortemente dependente destas relações.

Conclui-se ainda que, para a faixa de pontos experimentais investigada, os termos relativos ao gás da bolha ( $\tau_G$ ,  $\tau_1$  e  $\rho_G$ ) não influenciam significativamente os resultados, tendo em vista que o valor RMS das diferenças entre  $LB/DI$  calculado e  $LB/DI$  experimental, para os casos C1 e C2 do modelo, são praticamente o mesmos - 4,8 e 4,7 diâmetros, respectivamente.

Por fim, conclui-se se que o modelo de bolha representado pela Eq. 1c é o pior dos três estudados, pois seus resultados são sistematicamente inferiores aos experimentais, caindo fora da faixa de  $\pm 10\%$  de imprecisão. O modelo representado pela Eq. 1b é o que apresenta a melhor relação custo-benefício, pois esta equação é mais simples de calcular que a Eq. 1a, mas ainda assim fornece resultados tão precisos quanto esta última.

## 6. Referências

- Dukler, A. E., Hubbard, M. G., 1975. "A model for gas-liquid slug flow in horizontal tubes." *Ind. Eng. Chem. Fund.*, Vol. 14, No. 4, pp. 337-347.
- Fernandes, R. C., Semiat, R., Dukler, A. E., 1983. "Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes." *AIChE J.*, Vol. 29, No. 6, pp. 981-989.
- Kokal, S. L., Stanislav, J. F., 1989. "An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes - II. Liquid holdup and pressure drop." *Chemical Engineering Science*, Vol. 44, No. 3, pp. 681-693.
- Mossis, R., Griffith, P., 1962. "Entrance effects in a two-phase slug flow." *J. Heat Transfer*, Vol. 84, pp. 29-39.
- Nicholson, M. K., Aziz, K. Gregory, G. A., 1978. "Intermittent two phase flow in horizontal pipes: predictive models." *Can. J. Chemical Engineering*, Vol. 56, pp. 653-663.

Rosa, E. S., 2004. "Flow structure in the horizontal slug flow." *Science, Thermal Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 151-160.

Taitel, Y., Barnea, D., 1990. "Two-phase slug flow." *Advances, Heat Transfer*, Vol. 20, pp. 83-132. Ed. Academic Press, New York.

Wallis, G. B., 1969. "One-dimensional two-phase flow." Ed. McGraw-Hill, New York, 408p.

Yoshizawa, C. J., 2005. "Estudos de modelos para a forma das bolhas em um escoamento intermitente padrão golfadas." *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil*, 166p.

## **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AN UNIT-CELL GAS-LIQUID SLUG FLOW MODEL**

Marc Zwanziger

DE/FEM/UNICAMP - Caixa Postal 6122, Campinas/SP, Brazil. CEP: 13083-970.

marczw@gmail.com

Eugênio Spanó Rosa

DE/FEM/UNICAMP - Caixa Postal 6122, Campinas/SP, Brasil. CEP: 13083-970.

erosa@fem.unicamp.br

**Abstract** - The numerical results of an unit-cell gas-liquid slug flow model are compared against a wide experimental database. The influence in the model accuracy of the auxiliary relations - used for the bubble velocity and the liquid slug length - is studied. This class of model in fact represents the phenomena, but its precision is strongly dependant of the auxiliary relations.

**Keywords:** bubble, slug, unit-cell.