

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO VERTICAL EM GOLFADAS DE AR E ÁGUA

Luis Gerardo Gómez Bueno, lggomezupb@gmail.com

Luiz Eduardo Melo Lima, lelima@fem.unicamp.br

Eugênio Spanó Rosa, erosa@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP. Rua Mendeleiev, s/n, Cidade Universitária "Zeferino Vaz", Barão Geraldo, Campinas – SP, Caixa Postal: 6122, CEP: 13.083-970.

Resumo. Foram realizadas medidas experimentais em uma tubulação vertical com 26 mm de diâmetro interno, operando com escoamento ascendente de ar e água no padrão intermitente ou “slug”. As características do escoamento foram medidas por meio de dois pares de sensores posicionados a 77D e 257D a jusante do misturador de ar e água. Por meio destes sensores de impedância foram determinados os valores instantâneos dos comprimentos do pistão de água e da bolha alongada de ar, a velocidade do nariz da bolha de ar e a frequência. Através das medidas das populações dos tamanhos, velocidades e frequência são obtidas os valores médios, desvio padrão e histogramas que caracterizam o escoamento intermitente vertical numa faixa de velocidades superficiais de ar e de água correspondente a 0.1 m/s a 2 m/s e 0.3 m/s a 1.5 m/s, respectivamente.

Palavras chave: escoamento bifásico, padrão golfadas, mistura ar-água, velocidade da bolha.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento bifásico de ar e água no padrão de golfadas (*slug flow pattern*) ocorre em processos industriais envolvendo geração de vapor e produção de hidrocarbonetos. O padrão é descrito pela alternância de pistões de água aerados seguidos por bolhas de ar alongadas que ocupam quase a totalidade da seção transversal. Estas estruturas de ar e água não são periódicas, mas irregulares no tempo e no espaço de forma que seus comprimentos, frequência e velocidade estão distribuídos ao redor de valores médios. Frequentemente estas características físicas do escoamento são negligenciadas em modelos fenomenológicos, seja pela própria natureza do modelo não contemplar estes mecanismos físicos (Dukler e Hubbard, 1975, Fernandes et al., 1983, Taitel e Barnea, 1990) ou pela falta de dados experimentais para validar sub-modelos.

De forma a suplantar estas dificuldades Nydal et al. (1992) realizaram um trabalho experimental para caracterizar as propriedades estatísticas do escoamento intermitente de ar e água em tubulações horizontais de 53mm e 90mm de diâmetro. O trabalho apresenta os valores médios e as populações medidas dos comprimentos, velocidade de bolha e fração de vazios para dez pontos experimentais com uma velocidade superficial de água fixa, $J_L = 1,2\text{m/s}$, e variando a velocidade superficial do ar, $0,5\text{m/s} < J_G < 10\text{ m/s}$. Posteriormente, Grenier, (1997) realizou um estudo sobre a evolução das populações dos tamanhos e da velocidade da bolha, da entrada a saída do tubo, visando analisar o processo de formação até atingir o estado estacionário. Um estudo similar ao de Grenier foi realizado por Rosa (2004) em uma tubulação horizontal de acrílico transparente com 26mm de diâmetro envolvendo uma grande faixa de vazões de ar e água. Complementarmente, o efeito do aumento da viscosidade da fase líquida nas estruturas de ar e água presentes num escoamento horizontal em golfadas foi estudado experimentalmente por Rosa et al. (2006).

Enquanto que o escoamento horizontal no padrão de golfadas possui um número de trabalhos caracterizando suas propriedades estatísticas o mesmo não se pode dizer para o escoamento vertical no padrão intermitente. Mao e Dukler (1989) realizaram um trabalho experimental caracterizando os tamanhos médios dos pistões, bolhas, medindo gradiente de pressão, perfil da bolha e tensão na parede para o escoamento co-corrente de ar e água. O campo médio de velocidades e o perfil das velocidades instantâneas ao redor da bolha alongada foram estudados por Kawaji et al (1997). Recentemente Mayor et al. (2008) faz uma comparação entre regime laminar e turbulento das velocidades média e instantânea de ascensão das bolhas incluindo suas populações. Provavelmente o primeiro trabalho a tratar de propriedades estatísticas do padrão intermitente em escoamento vertical foi realizado por Hout et al. (2001). O trabalho estuda experimentalmente a evolução das populações da velocidade do nariz da bolha, dos comprimentos dos pistões e dos comprimentos das bolhas em quatro posições axiais do tubo numa grade com cinco condições experimentais.

O objetivo deste trabalho é a caracterização das propriedades médias e instantâneas relativas ao escoamento vertical ascendente de ar e água no padrão de golfadas. Ele complementa as medidas experimentais de Hout et al. (2001) por meio de uma análise experimental tomada em 16 pontos experimentais que abrangem a quase totalidade da região de existência do padrão de golfadas. O estudo apresenta correlações para os valores médios, a evolução dos parâmetros ao longo da linha e as funções densidade de probabilidade.

2. APARATO EXPERIMENTAL E TÉCNICA DE MEDIDA

O aparato experimental está representado esquematicamente na Fig. 1. A seção de testes consiste de uma tubulação de acrílico posicionada na vertical com 26mm de diâmetro interno e comprimento total de 7950mm ou 306 diâmetros livres. Um misturador posicionado na extremidade inferior da seção de testes produz a mistura bifásica de ar e água ascendente. A mistura percorre os 306D da linha, faz uma curva suave de 180° numa mangueira flexível de 37mm e é descarregada num tubo vertical com 75mm de diâmetro com extremidade superior aberta para atmosfera e a inferior conectada a uma linha que leva ao tanque de armazenamento de água. O tubo vertical (*drop leg*) atua como um separador de ar e água. O ar é descarregado na atmosfera pela extremidade superior do tubo enquanto que a água retorna ao tanque em um circuito fechado. Uma bomba centrífuga recebe água do reservatório e descarrega na linha com pressão, temperatura e a vazão mássica monitoradas. Ar comprimido a uma pressão de 8Barg é fornecido à seção de testes com pressão, temperatura e vazão monitorados.

As medidas das propriedades das golfadas (comprimentos, velocidade, frequência) são realizadas em duas estações de medição localizadas a 77 e a 257 diâmetros livres a jusante do misturador ar-água. Cada estação de medição possui dois sensores de impedância espaçados axialmente de 4D e um sensor de pressão. Ao final da seção de testes a temperatura da mistura também é medida. Os sensores de impedância fazem a detecção da passagem de ar e água na estação por meio da variação da impedância do meio. O princípio físico de operação e suas características estão descritos em Mastelari et al. (2005). Os sinais dos sensores gêmeos são digitalizados, adquiridos e processados fornecendo os comprimentos das bolhas e dos pistões que passaram pela estação de medição assim como a velocidade da bolha e o período da passagem de um pistão seguido por uma bolha. O processamento dos sinais está descrito em Rosa (2002) e Rosa (2001). Os sinais analógicos dos sensores são adquiridos a uma frequência de amostragem de 3KHz por um período de 120s por meio de um sistema da *National Instruments*. Em cada ponto experimental a aquisição é repetida três vezes por um sistema garantindo as amostras uma população de no mínimo 200 bolhas.

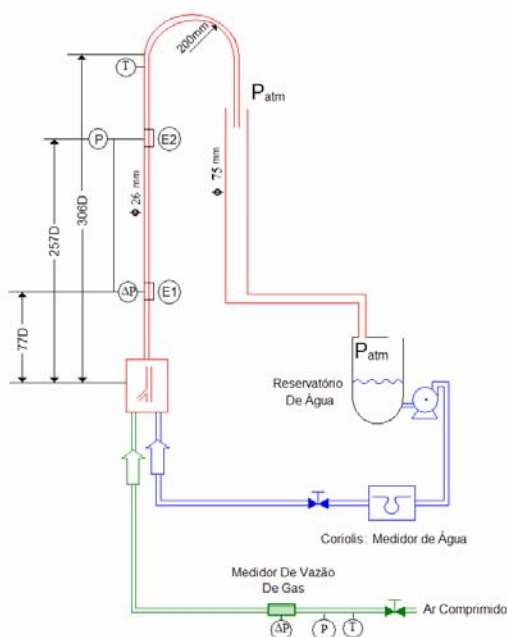


Figura. 1. Representação esquemática do circuito de testes vertical.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram executados um total de 16 testes com velocidades superficiais de ar e água variando entre 30 e 220cm/s e 30 e 120cm/s, respectivamente. Os resultados experimentais mostrados nas tabelas 1 e 2 correspondem às medidas realizadas nas estações #1 e #2, respectivamente. Os valores 'in-situ' das velocidades superficiais de água, de ar e da mistura, J_L , J_G e J , respectivamente, estão mostrados nas colunas 2, 3 e 4. A velocidade da frente da bolha, o comprimento da bolha, o comprimento do pistão e a pressão, VB, LB, LS e P, estão nas colunas 5, 6, 7 e 8, sendo que os comprimentos estão expressos de forma adimensional em função do diâmetro da tubulação. O número total de bolhas amostradas e a frequência de passagem destas bolhas pelas estações são identificados por Nb3 e F, colunas 9 e 10. O coeficiente de variação, definido como sendo a razão entre o desvio padrão da variável e o seu valor médio, é calculado para a velocidade da bolha e para os comprimentos da bolha e do pistão, SVB/VB, SLB/LB e SLS/LS, colunas 11, 12 e 13. Por referência são calculados o número de Froude ($Fr = J/\sqrt{gD}$) e o Reynolds ($Re = JD/\nu_L$) do pistão de água nas

colunas 14 e 15. Por último as colunas 16 e 17 da tabela 1 mostram o gradiente de pressão médio entre estações de medida e a taxa de coalescência média de bolhas expressa por: $R = -100 (D/L) \ln(F_2/F_1)$.

Tabela 1. Dados experimentais obtidos na estação de medição #1.

Teste	(cm/s) JL	(cm/s) JG	(cm/s) J	(cm/s) VB	(L/D) LB	(L/D) LS	mbar abs P	# bolhas Nb3	(Hz) F	(---) SVB/VB	(---) SLB/LB	(---) SLS/LS	(---) Fr	(---) Re	(mbar/m) GP	R
1	33	46	79	104	9.5	11.1	1270	656	1.9	0.08	0.29	0.39	2.3	2066	50	0.19
2	31	73	104	128	15.5	11.7	1207	624	1.8	0.10	0.31	0.44	3.2	2702	40	0.20
3	33	94	127	156	18.9	11.4	1196	670	2.0	0.14	0.32	0.44	4.0	3304	37	0.25
4	30	142	172	198	28.3	11.2	1168	631	1.9	0.16	0.36	0.43	5.8	4479	32	0.29
5	61	40	102	129	5.9	10.1	1386	774	3.1	0.05	0.18	0.38	2.6	2647	67	0.20
6	61	83	144	172	10.2	10.5	1332	1063	3.2	0.09	0.30	0.43	4.2	3746	53	0.28
7	88	60	148	182	6.5	9.4	1452	1072	4.4	0.06	0.19	0.38	3.9	3846	69	0.23
8	118	54	172	212	5.2	8.1	1567	409	6.2	0.08	0.13	0.33	4.3	4464	80	0.20
9	29	18	47	70	5.2	11.2	1380	229	1.6	0.09	0.15	0.39	1.2	1221	69	0.13
10	54	23	77	108	5.1	10.2	1392	249	2.7	0.09	0.13	0.38	1.9	2008	70	0.19
11	52	38	90	112	5.5	10.2	1377	680	2.7	0.05	0.18	0.35	2.3	2327	66	0.20
12	79	27	106	139	4.9	10.2	1440	63	3.5	0.04	0.11	0.31	2.5	2749	78	0.12
13	31	178	208	262	36.8	10.7	1190	217	2.1	0.29	0.40	0.49	3.9	5414	31	0.24
14	63	156	219	263	20.2	11.0	1293	334	3.2	0.23	0.32	0.45	4.6	5689	48	0.24
15	125	82	207	240	6.0	8.6	1438	387	6.4	0.09	0.22	0.37	4.7	5371	77	0.26
16	124	141	265	294	9.0	9.2	1440	649	6.2	0.13	0.33	0.44	6.2	6879	71	0.30

Tabela 2. Dados experimentais obtidos na estação de medição #2.

Teste	(cm/s) JL	(cm/s) JG	(cm/s) J	(cm/s) VB	(L/D) LB	(L/D) LS	mbar abs P	# bolhas Nb3	(Hz) F	(---) SVB/VB	(---) SLB/LB	(---) SLS/LS	(---) Fr	(---) Re
1	33	57	90	117	15.8	16.8	1035	490	1.4	0.10	0.32	0.39	1.7	2340
2	31	86	117	142	26.3	17.1	1020	445	1.3	0.12	0.33	0.41	2.1	3048
3	33	110	143	171	34.6	17.9	1024	446	1.3	0.13	0.37	0.40	2.6	3716
4	30	163	193	218	54.8	18.9	1018	396	1.1	0.16	0.37	0.48	3.4	5021
5	61	52	114	137	8.8	15.6	1074	758	2.2	0.06	0.29	0.40	2.1	2953
6	61	102	163	187	19.3	17.8	1082	687	1.9	0.08	0.31	0.46	3.0	4246
7	88	77	165	196	10.2	15.7	1128	1024	2.9	0.06	0.30	0.46	3.1	4293
8	118	71	189	225	6.9	13.5	1193	1386	4.3	0.05	0.26	0.43	3.6	4903
9	29	23	52	74	7.4	14.7	1056	444	1.3	0.05	0.25	0.37	1.0	1363
10	54	30	84	114	7.5	15.3	1063	444	1.9	0.06	0.28	0.40	1.6	2195
11	52	49	101	121	8.9	15.5	1066	675	1.9	0.06	0.29	0.39	1.9	2615
12	79	36	115	146	5.9	13.7	1072	875	2.9	0.06	0.23	0.41	2.2	2985
13	31	203	233	296	66.2	17.1	1042	145	1.4	0.20	0.40	0.48	4.2	6069
14	63	188	251	315	38.8	19.4	1070	236	2.1	0.15	0.34	0.46	4.6	6534
15	125	109	234	281	10.7	16.2	1075	465	4.0	0.07	0.29	0.46	4.4	6087
16	124	183	307	361	20.0	18.5	1107	408	3.6	0.08	0.29	0.50	5.7	7979

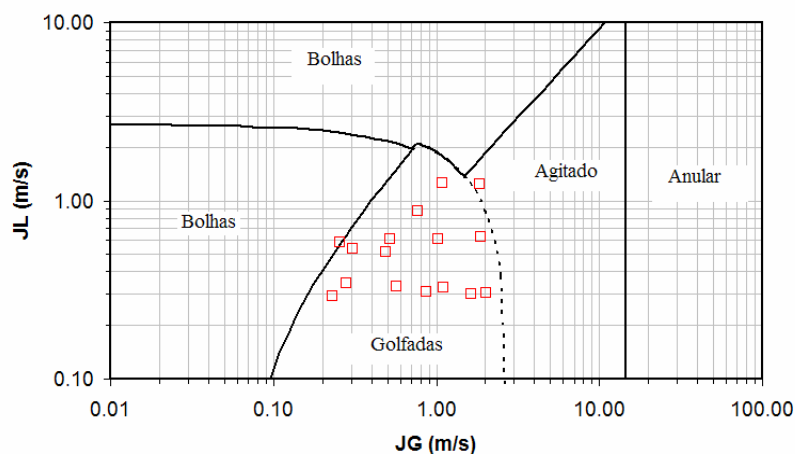


Figura. 2. Mapa de padrão de fluxo para escoamento vertical de Taitel, Barnea e Dukler (1980).

O padrão de escoamento durante os testes foi identificado como golfadas através inspeção visual. Por referência as condições operacionais da estação # 2 estão apresentadas no mapa de padrão de Taitel et. al. (1980), veja Fig. 2, confirmando a ocorrência do padrão de golfadas e indicando que a grade cobre desde uma faixa de velocidades intermediária a alta a zona de ocorrência de golfadas no mapa.

A velocidade media do nariz da bolha, que é uma relação puramente cinemática em função da velocidade do pistão de água na sua frente, é definida pela seguinte equação (Nicklin, 1962):

$$VB = C_o J + C_\infty \sqrt{gD} \quad (1)$$

sendo VB a velocidade média do nariz da bolha, J a velocidade superficial de mistura, g a aceleração da gravidade, D o diâmetro da tubulação, C_o parâmetro de distribuição de fase e C_∞ a constante de velocidade de deslizamento. Reescrevendo a Eq. 1 na forma adimensional, mostrada na ordenada e abscissa da Fig. 3, determina-se, por regressão linear, os valores das constantes C_o e C_∞ nas estações 1 e 2 em 1,1 e 0,35 e 1,12 e 0,35 respectivamente. Os valores experimentais para C_o estão dentro da faixa de valores medidos por Bendiksen (1984), $1,1 < C_o < 1,2$. Destaca-se a estação #1, por estar próxima do misturador, pode haver uma persistência dos efeitos de formação na velocidade resultando num $C_o = 1,1$.

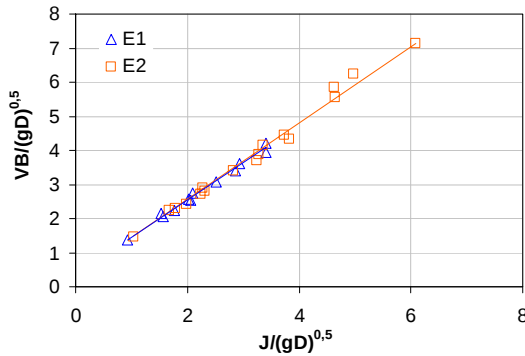


Figura 3. Velocidade adimensional da bolha em função do número de Froude.

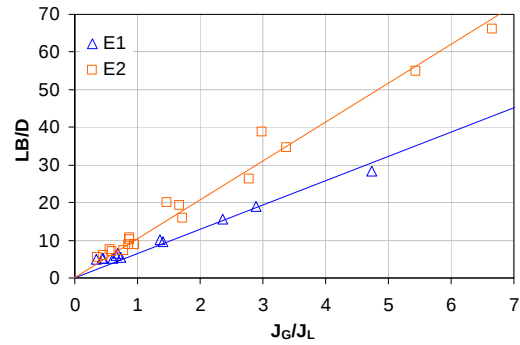


Figura 4. Comprimento adimensional da bolha, LB/D , em função da razão entre as velocidades do ar e do água.

Na Fig. 4 observa-se a variação do comprimento da bolha em função da razão de velocidades entre o ar e o água. Os dados mostram uma direta correspondência entre o aumento da razão ar-água e o aumento da bolha. Entretanto a taxa do aumento de comprimento da estação #2 é maior que da estação #1. O aumento da taxa ocorre por dois motivos: à expansão do ar e à coalescência de bolhas que se fundem e formam bolhas de maior comprimento. O aumento de LB devido à expansão do ar pode ser previsto utilizando um modelo de ar ideal e isotérmico. Considerando que a massa de ar na bolha é constante, $LB \cdot P = LB_0 \cdot P_0$, onde LB_0 e P_0 são valores de referência. A taxa de variação de LB e P ao longo do tubo podem então ser estimadas por:

$$\frac{dLB}{dx} = -(LB_0 P_0) \left(\frac{1}{P^2} \right) \left(\frac{dP}{dx} \right). \quad (2)$$

Como o gradiente da pressão é uniforme ao longo do tubo pode se esperar que a taxa de variação de LB devido a expansão do ar varie inversamente ao quadrado da pressão. Como a pressão na estação #1 é maior que a pressão na estação #2 espera-se que sua taxa de variação na estação #2 seja maior daquela observada na estação #1.

O comprimento médio do pistão permaneceu entre $8D$ e $12D$ para as medidas na estação #1 enquanto que na estação #2 ele variou entre $12D$ a $20D$, veja Fig. 5. Os dados não apresentam uma tendência definida com o parâmetro $JL/(FD)$ contrariando uma tendência observada em escoamentos horizontais (Rosa et al. 2006). Apesar da falta de correlação o espalhamento dos valores de LS/D dá uma noção que este valor não é constante ao longo da tubulação e varia em função das velocidades superficiais das fases, entre outros parâmetros.

A frequência de passagem das bolhas nas estações #1 e #2 é mostrada na Fig. 6 em termos dos valores adimensionais da frequência, FD/J_G , em função da razão de velocidades superficiais J_G/J_L . Pode-se encontrar um ajuste de potência entre os parâmetros da ordenada e abscissa do tipo: $FD/J_G = C_1 \cdot (J_G/J_L)^{C_2}$ onde os parâmetros de ajuste, C_1 e C_2 , valem: (0,053, -0,896) para estação #1 e (0,037, -0,967) para a estação #2. A análise paramétrica mostra que a frequência adimensional cresce quando a razão de ar-água diminui. Comportamento similar também é encontrado para misturas ar e água escoando na horizontal, porém com diferentes coeficientes.

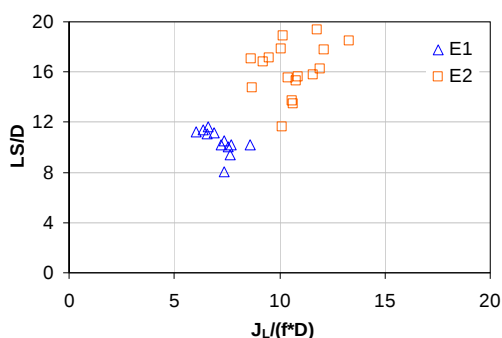


Figura 5. Comprimento adimensional do pistão, LS/D , em função da razão entre a velocidade superficial do água e a frequência das bolhas.

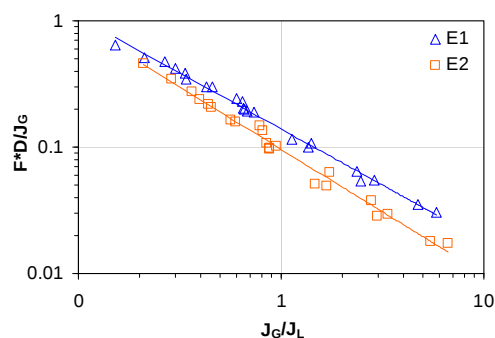


Figura 6. Frequência adimensional versus razão entre as velocidades superficiais do ar e do água

Uma das principais características do escoamento no padrão de golfadas é a alternância entre o pistão de água e a bolha de ar. Ela pode ser caracterizada por meio do fator de intermitência β definido pela razão entre comprimentos: $\beta = LB/(LB+LS)$. Pode-se associar ao valor de β uma proporcionalidade à concentração volumétrica de ar na célula. A Fig. 7 mostra o fator de intermitência em função da razão de velocidades entre o ar e a mistura. A dependência de β com J_G/J mostra uma linearidade para valores de $\beta > 0,4$ sendo os valores de β sistematicamente menores que J_G/J . Isto decorre do fato que no escoamento vertical a bolha alongada de ar transporta cerca de 70% a 90% do ar total, o restante é transportado pelo pistão de água na forma de bolhas dispersas. Assim LB sozinho não é proporcional ao volume de ar transportado. Valores de β inferiores a 0,4 exibem um desvio do comportamento linear. Atribui-se este comportamento porque o comprimento relativo da bolha é cada vez menor e o padrão de golfadas aproxima-se de sua transição para bolhas dispersas.

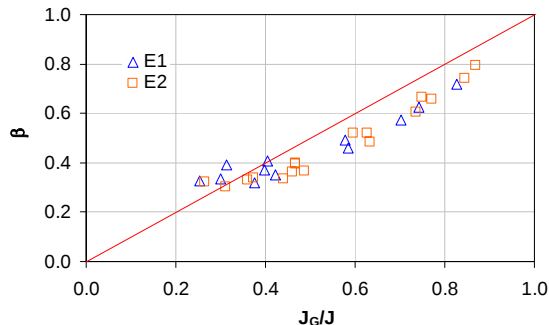


Figura 7. Fator de intermitência versus razão de velocidades entre o ar e a mistura.

A Figura 8 explora as características das populações de VB, LB/D , LS/D e F na forma de funções de densidade de probabilidade, PDF. Elas são estimadas a partir de histogramas, com vinte classes, utilizando um processo de interpolação e suavização descrito em Saporta (1990). A análise é feita para os testes #1, #3 e #6. Os testes #1 e #3 possuem a mesma vazão de água mas aproximadamente o dobro da vazão de ar. Já os testes #3 e #6 têm a mesma vazão de ar mas aproximadamente o dobro da vazão de água.

A seguir é analisado o efeito do aumento da vazão de ar. A Figura. 8a mostra as PDF de VB para os testes #1 e #3 e sua evolução ao longo das estações #1 e #2. O aumento do ar faz o seu valor mais provável aumentar assim como seu desvio padrão. O comprimento médio da bolha assim como seu desvio padrão crescem com o aumento da vazão de ar, veja Fig. 8b. É interessante observar que PDF de LB é simétrica com forma próxima de uma distribuição normal. A PDF de LB exibe um deslocamento à direita entre as estações #1 e #2 indicando uma diminuição da população das bolhas menores e o surgimento de populações de bolhas maiores. Isto se deve ao fenômeno de coalescência de bolhas no interior do tubo que faz com que duas bolhas vizinhas se fundem em uma única bolha causando o aumento do comprimento. A população dos comprimentos dos pistões e das frequências das células é praticamente insensível à variação da vazão de ar, Figs. 8c-d. Este comportamento é coerente. A Fig. 6 mostra que a dependência do valor médio de F com J_G é fraca uma vez que os coeficientes da potência de (J_G/J_L) são próximos de -1. Por outro lado, a PDF de LS entre as estações #1 e #2 desloca-se para a direita indicando o surgimento de pistões com comprimentos maiores na estação #2 em relação à estação #1. Isto também se deve ao fenômeno de coalescência de bolhas. À medida que há uma coalescência a massa de água contida no pistão entre as bolhas é distribuída, uma pequena fração cabe ao filme de água

da bolha porque LB aumentou e o restante é transferido para o pistão que vinha atrás fazendo seu comprimento aumentar.

O efeito do aumento da vazão de água nas PDF obtidas dos testes #3 e #6 é analisado na sequência. As populações de VB, Fig. 8a mostram um deslocamento para direita a medida que viajam da estação #1 para estação #2, isto se deve a expansão do ar que faz com que a velocidade da mistura J aumente. Este comportamento coincide com a equação (1) que prevê a velocidade média da bolha em função de J. Por outro lado, uma comparação entre as PDF de VB dos testes #3 e #6 revela que o aumento da vazão de água traz uma diminuição do desvio padrão de VB. As PDF para LB estão mostradas na Fig. 8b. O aumento da vazão de água trouxe um deslocamento para esquerda da PDF de LB e uma diminuição do desvio padrão. Por outro lado há uma grande semelhança da PDF de LB para os pontos #6 e #1 que não possuem vazões de ar e água distintas. Este comportamento pode ser justificado considerando-se que os valores médios de LB/D são proporcionais a razão ar-água (J_G/J_L), veja Fig. 4, e que os pontos #6 e #1 possuem aproximadamente o mesmo ($J_G/J_L \cong 1/2$). Surpreendentemente a PDF de LS manteve-se aproximadamente constante com o aumento da vazão de água, Fig. 8c. Entretanto a PDF de F exhibe um deslocamento a direita e um aumento do desvio padrão com o aumento da vazão de água.

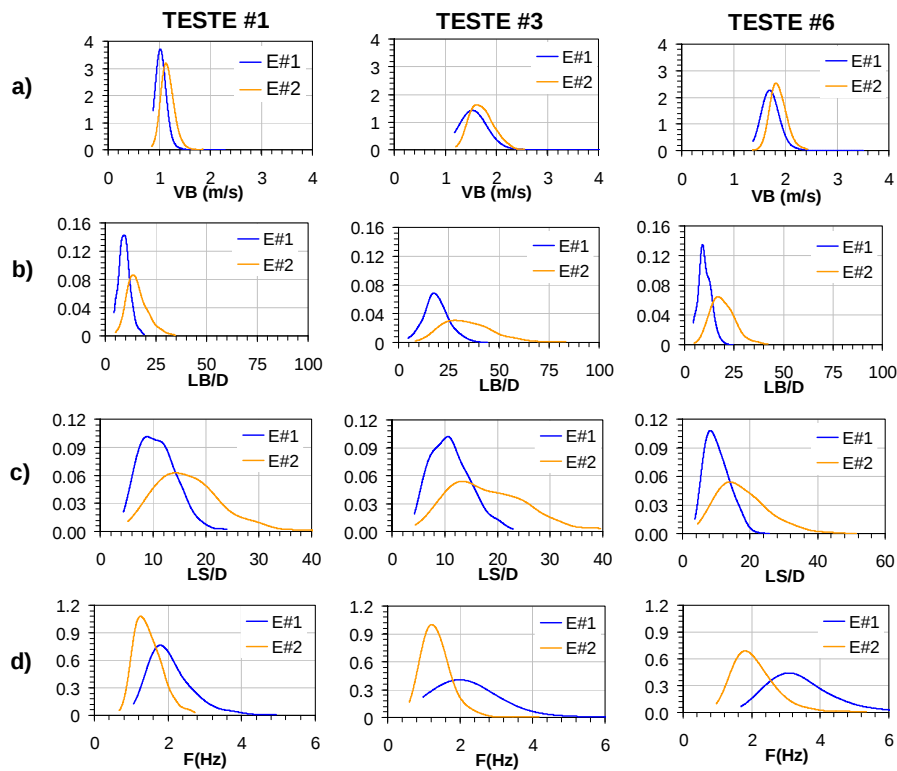


Figura 8. Histogramas de função de densidade de probabilidade da velocidade da bolha, comprimento da bolha, comprimento do pistão de água e frequência para os testes #1, #3 e #6.

4. CONCLUSÕES

O estudo experimental de escoamento vertical em golfadas de ar e água foi feito numa tubulação vertical de acrílico com 8m de extensão e diâmetro interno de 26mm. As vazões de ar e de água empregadas nos testes variaram entre 30 e 220cm/s e 30 e 120cm/s, respectivamente. Esta faixa corresponde a quase a totalidade da zona de ocorrência do padrão golfada no mapa de padrões da Fig. 2. Os parâmetros que descrevem as estruturas de ar e água presentes nas golfadas tais como comprimentos das bolhas, comprimentos dos pistões, velocidades da bolha, pressão nas estações de medição, frequência foram medidos com sucesso utilizando sondas duplas de impedância.

Os valores médios de VB apresentam um comportamento linear com a velocidade superficial da mistura. Os valores experimentais obtidos estão dentro da faixa de valores reportados na literatura. As populações de VB podem ser aproximadas por distribuições normais.

Os valores médios de LB apresentam uma direta correlação com a razão ar-água (J_G/J_L), entretanto a taxa do aumento de comprimento da estação #2 é maior que da estação #1 devido a expansão do ar e a coalescência das bolhas. As populações de LB podem ser aproximadamente representadas por distribuições normais. O comprimento médio do pistão LS variou com a variação das velocidades superficiais de ar e de água entretanto não foi possível encontrar uma

dependência explícita de sua variação com outros parâmetros do escoamento. Os valores médios do fator de intermitência mostram um comportamento linear com a razão de velocidades J_G/J para valores de β superiores a 0,4. Por último, a frequência de passagem das bolhas se mostrou fortemente dependente de J_L e fracamente dependente de J_G .

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido pela Petrobras sob contrato no. 0050.0030935.07.2 para realização deste trabalho.

6. BIBLIOGRAFIA

- Bendiksen, Kjell H., 1984, "Experimental Investigation of the Motion of Long Bubbles in Inclined Tubes", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol 10, No 4, Aug, pp 467-483.
- Dukler, A.E., Hubbard, M.G., 1975, "A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes", *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 14, No. 4, pp. 337-347.
- Fernandes, R. C., Semiat, R., Dukler, A. E., 1983, "Hidrodinamic Model for Gas-Liquid Slug Flow in Vertical Tubes", *AIChE*, JI 29, pp. 981-989.
- Grenier, P., 1997, "Evolution des Longueurs de Bouches Écoulement Intermittent Horizontal", PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.
- Hout, R., Barnea, D., Shemer, L., 2001, "Evolution of Statistical Parameters of Gas-Liquid Slug Flow Along Vertical Pipes", *Int. J. Multiphase Flow*, 27, 1579-1602.
- Kawaji, M., DeJesus, J.M., Tudose, G., 1997, "Investigation of Flow Structures in Vertical Slug Flow", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 175, No. 1-2, Nov 1, 1997, pp. 37-48
- Mao, Z-S; Dukler, A.E., 1989, "An Experimental Study of Gas-Liquid Slug Flow", *Experiments in Fluids*, 8, pp. 169-182.
- Mastelari, N.; Zwanziger, M.; Rosa, E. S., 2005, "Capacitive Sensor for Dynamic Gas-Liquid Phase Detection in Two-Phase Flows", 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, MG, 6-11 Nov.
- Mayor, T.S.; Pinto, A.M.F.R.; Campos, J.B.L.M., 2008, "Vertical Slug Flow in Laminar Regime in the Liquid and Turbulent Regime in the Bubble Wake – Comparison With Fully Turbulent and Fully Laminar Regimes", *Chem. Eng. Sci.*, in press.
- Nicklin, D. J., Wilkes, J. O., Davidson, J. F., 1962. "Two-Phase Flow in Vertical Tubes", *Trans. Of Chemical Engineers*, Vol. 40, pp. 61-68.
- Nydal, O.J.; Pintus, S., Andreussi, P., 1992, "Statistical Characterization of Slug Flow in Horizontal Pipes", *Int. J. Multiphase Flow*, 18, pp. 439-453.
- Rosa, E.S., Morales, E.R, Melo, A.I., Freire, R. and França, F.A., 2001, "The Evolution of Horizontal Slug Flow", XVI Congresso Brasileiro Eng. Mecânica, COBEM, Uberlândia, 26-30 de Nov., pp. 1-10.
- Rosa, E. S., 2002, "Flow Structure in the Horizontal Slug Flow", IX congresso brasileiro de engenharia e ciencias termicas, ENCIT, pp. 1-11.
- Rosa, E. S., 2004, "Flow Structure in the Horizontal Slug Flow", *Thermal Engng*, 3, 2, pp. 151-160.
- Rosa, E.S., Gonçalves, M.A. e Fagundes Netto, J.R., 2006, "Influência da Viscosidade no Escoamento Horizontal Em Golfadas." *Boletim Técnico da Produção de Petróleo*, Rio de Janeiro: PETROBRAS.CENPES, Dezembro, Vol.1, (2).
- Saporta, G., 1990. "Probabilités Analyse des Données et Statistique", Ed. Technip, Paris, France, 494 p.
- Taitel, Y.; Barnea, D., Dukler, A. E., 1980 "Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes", *AIChE Journal*, Vol. 26, No. 3, May, pp. 345-354.
- Taitel, Y., Barnea, D., 1990, "A Consistent Approach for Calculating Pressure Drop in Inclined Slug Flow", Pergamon Press, *Chemical Engineering Science*, Vol. 45, No. 5, pp. 1199-1206.

7. INFORMAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O material no presente documento é de responsabilidade do(s) autor(es).

EXPERIMENTAL STUDY IN VERTICAL SLUG FLOW OF AIR-WATER MIXTURE

Luis Gerardo Gómez Bueno, lggomezupb@gmail.com

Luiz Eduardo Melo Lima, lelima@fem.unicamp.br

Eugênio Spanó Rosa, erosa@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP. Rua Mendeleiev, s/n, Cidade Universitária "Zeferino Vaz", Barão Geraldo, Campinas – SP, Caixa Postal: 6122, CEP: 13.083-970.

Abstract *The statistical characterization of an ascendant mixture of air and water flowing in the slug pattern is performed using experimental data from a vertical line 8 meters long with 26 mm inside diameters. The bubbles and slugs sizes as well as the bubble velocity and cell's frequency are individually measured by twin impedance probes placed at measuring stations located at 77D and 257D downstream the air-water mixer. Also the pressure drop along the line is measured using differential pressure transmitters. The grid test with 16 experimental points has superficial air and water velocities ranging, respectively, from 0,1m/s to 2 m/s and from 0.3m/s to 1.5m/s. Probability density functions are constructed from the sampled populations as well as their mean and standard deviations. Also the evolution of the populations along the two measuring stations is accessed.*

Keywords: two-phase, slug flow, air-water mixture, bubble velocity.