

DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIOS EM UMA CURVA PLANA DE 180 GRAUS

Arlindo de Matos (arlinmat@fem.unicamp.br)
Eugênio Spanó Rosa (erosa@fem.unicamp.br)
Fernando de Almeida França (ffranca@fem.unicamp.br)
FEM/DE UNICAMP CP 6122
13083-970 - Campinas, SP, Brasil.

Resumo. São apresentados resultados experimentais das medições locais da fração de vazio de um escoamento bifásico (ar-água) ocorrendo em uma curva plana com 180 graus de seção quadrada no padrão bolhas dispersas. A segregação das fases foi caracterizada medindo-se a distribuição da fração de vazio local em quatro seções transversais do duto curvo plano por meio de uma sonda elétrica condutiva. O mapeamento da fração de vazios nas seções transversais é mostrado na forma de gráficos de contorno de vazio constante e são discutidos alguns mecanismos responsáveis pela segregação das fases.

Palavras-Chave: curva plana de seção quadrada; escoamento bifásico; escoamento em bolhas.

1 - INTRODUÇÃO

Os avanços no estudo de escoamentos bifásicos cada vez mais requerem um conhecimento detalhado sobre sua estrutura interna. Eles são necessários para: conhecimento de mecanismos básicos sobre o escoamento tais como distribuição e migração de fração de vazios, coalescência, choque ou mudança de padrão entre outros; desenvolvimento de leis constitutivas para modelos multidimensionais (Lahey, 1995) e também para o desenvolvimento e controle de processos industriais tais como queda de pressão, transferência de calor e massa.

É freqüente, em diversas aplicações industriais, a ocorrência de curvas em circuitos bifásicos. Entre algumas destas aplicações pode-se citar: circuitos de circulação natural em reatores nucleares, evaporadores em indústrias químicas, canais de dispositivos eletrônicos de alto desempenho, canais de descarga em bombas bifásicas, separadores de óleo e gás usado na indústria do petróleo entre outras. O presente trabalho enfocará aspectos básicos da distribuição da fração de vazios em uma curva plana de 180 graus para um escoamento bifásico no padrão de bolhas dispersas. A motivação deste estudo está no desenvolvimento de uma base de conhecimento sobre a distribuição de vazios com vistas ao desenvolvimento e aperfeiçoamento de separadores

óleo e gás para operação no fundo de poço. Estes separadores permitirão a operação contínua e mais eficiente de bombas centrífugas utilizadas para elevação do óleo. Nas condições operacionais no fundo do poço o escoamento é caracterizado pelo padrão de bolhas.

Infelizmente os autores desconhecem a existência de trabalhos em medidas experimentais da fração de vazio em uma curva plana de seção quadrada. Mesmo em se tratando de tubos retos com seção não circular os trabalhos experimentais em distribuição de fases são escassos. A maioria dos trabalhos publicados sobre os escoamentos gás-líquido em canais sem curvatura porém, com seção transversal retangular ou triangular, tratam de aspectos fenomenológicos, como os padrões de escoamento e suas transições, ou os analisa a partir de uma abordagem unidimensional, onde as variáveis de interesse são o gradiente de pressão ou a fração de vazio média (Troniewsky e Ulbrich, 1984; Hibiki et al., 1994; Mishima et al., 1993; Keska e Fernando, 1994).

Entre os trabalhos que apresentam medidas experimentais da distribuição da fração de vazio em canais retos não circulares pode-se citar Sadatomi et al. (1982) e Moujaes e Dougall (1987). Os primeiros realizaram um vasto estudo experimental, com interesse principal direcionado para a determinação de expressões para cálculo do gradiente de pressão em canais retangulares, triangulares e anulares concêntricos. A distribuição de fração de vazio na seção transversal de canais retangulares e triangulares é apresentada, e referida como '*um dos mais importantes aspectos do escoamento bifásico em canais não-circulares*'. Os últimos apresentaram medidas de distribuição de fração de vazio, velocidades do gás e do líquido e tamanho de bolhas em canais retangulares estreito. Medições e modelagem do escoamento em bolhas em um canal vertical de seção triangular foram realizadas por Lopes de Bertodano (1994a, 1994b). Os autores utilizaram anemometria de fio quente para fazer medidas locais da fração de vazio e de três componentes da velocidade instantânea do escoamento. Suas medições e soluções numéricas da distribuição das fases indicaram que a fração de vazio tende a apresentar um pico junto à parede, pico este especialmente elevado nos vértices do triângulo. Especificamente sobre o tema foi encontrado apenas o trabalho de Tomiyama (1995) que realizou uma simulação numérica do escoamento ascendente de ar água no padrão bolhas em uma curva de 180 graus.

Este trabalho apresenta as medidas experimentais das frações de vazio local e seu valor médio em quatro seções transversais de uma curva plana de 180 graus com seção transversal quadrada em três condições operacionais distintas. As medidas de fração de vazios foram realizadas utilizando-se uma sonda elétrica condutiva. A segregação das fases e o processo de migração das bolhas devido à existência do campo centrífugo é revelada.

2 – APARATO EXPERIMENTAL E TÉCNICA DE MEDIDA

O aparato experimental é apresentado esquematicamente na Fig. 1. As medidas são realizadas em uma curva plana de 180 graus de seção transversal quadrada com lado de 34,1 mm e de raio interno de 60,0 mm precedida e sucedida por um duto reto de mesma seção transversal, com comprimento equivalente a 77 vezes o diâmetro hidráulico. A corrente bifásica de água-ar foi introduzida no início da seção de desenvolvimento por um misturador de meio poroso (borbulhador). O borbulhador tem uma configuração concêntrica com o ar sendo injetado pelo centro e a água, passando pelo espaço anular. A passagem da água pelo elemento poroso faz com que as bolhas se descolem do

borbulhador produzindo uma população de diâmetro aproximadamente constante e igual a 2.5 mm.

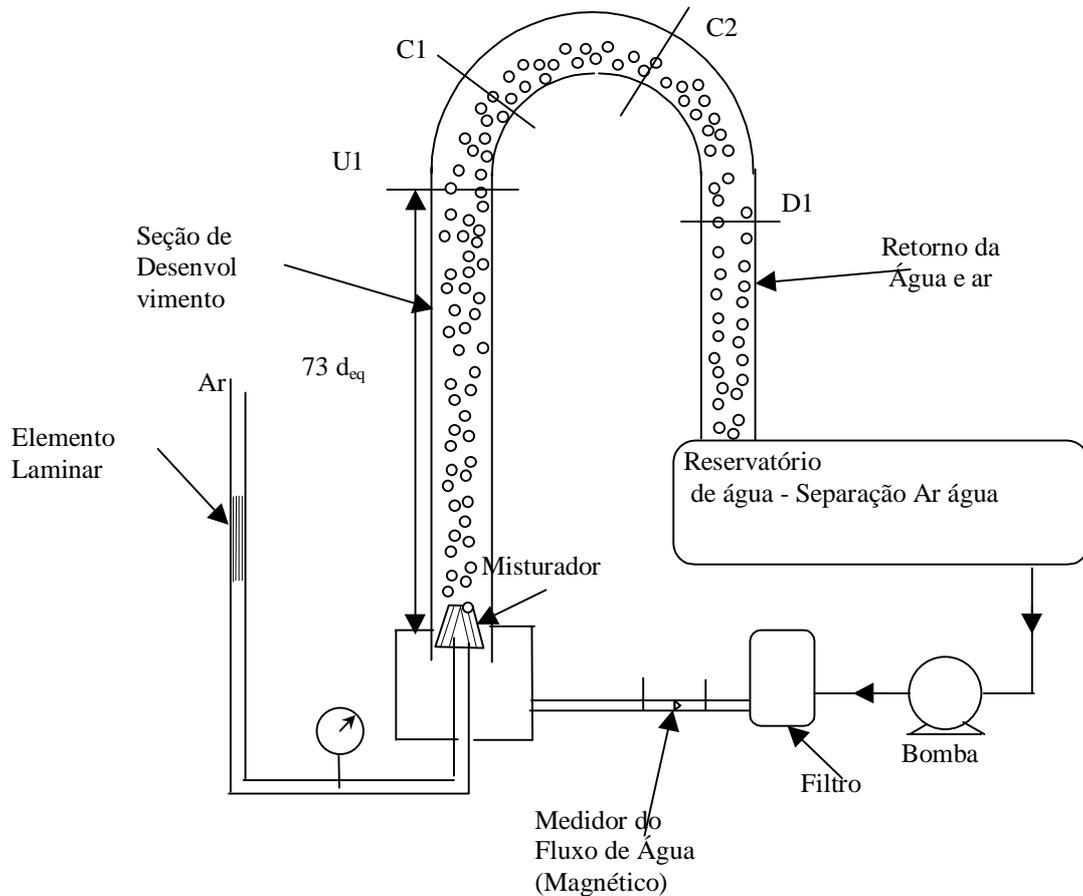


Figura 1 - Representação esquemática do aparato experimental

A água foi movimentada por uma bomba centrífuga, enquanto que o ar foi suprido por um reservatório de pressão constante. As vazões de água e ar foram medidas, com incerteza de 2%, por um medidor magnético e um elemento laminar, respectivamente. A pressão manométrica na seção de medidas variou entre 0,035 Bar a 0,454 Bar, dependendo das vazões estabelecidas, enquanto que a temperatura manteve-se constante em 23°C. O sistema operou na faixa de vazões que correspondeu a velocidades superficiais variando entre 0,8 m/s a 2,5 m/s para o líquido, e 0,03 m/s a 0,2 m/s para o gás, nas condições de pressão e temperatura da seção de medidas.

Um detalhamento da seção de testes é dado na Fig. 2. O escoamento e a geometria da curva estão caracterizados pelo sistema de coordenadas (x, y, z). O eixo z identifica a direção principal do escoamento. A aceleração da gravidade está representada na figura pelo vetor \vec{g} . As medidas de pressão e fração de vazios foram tomadas em quatro seções transversais distribuídas entre a entrada e saída da curva. Conforme indicado na Fig. 2, as seções U1, C1, C2 e D1 estão posicionadas, respectivamente, a 50 mm do início da curva, a 45 graus, a 110 graus e a 40 mm a jusante da curva. Na parte externa (em relação à curva) das seções transversais U1, C1, C2 e D1, há orifícios para medida da pressão manométrica representados na figura pela letra P. Os vetores que aparecem antes da seção U1 indicam o sentido do escoamento. À esquerda, no alto da figura, há

um detalhe da seção transversal do duto curvo, com a indicação do posicionamento do plano de simetria do escoamento, que corresponde a $x = 17,05$ mm.

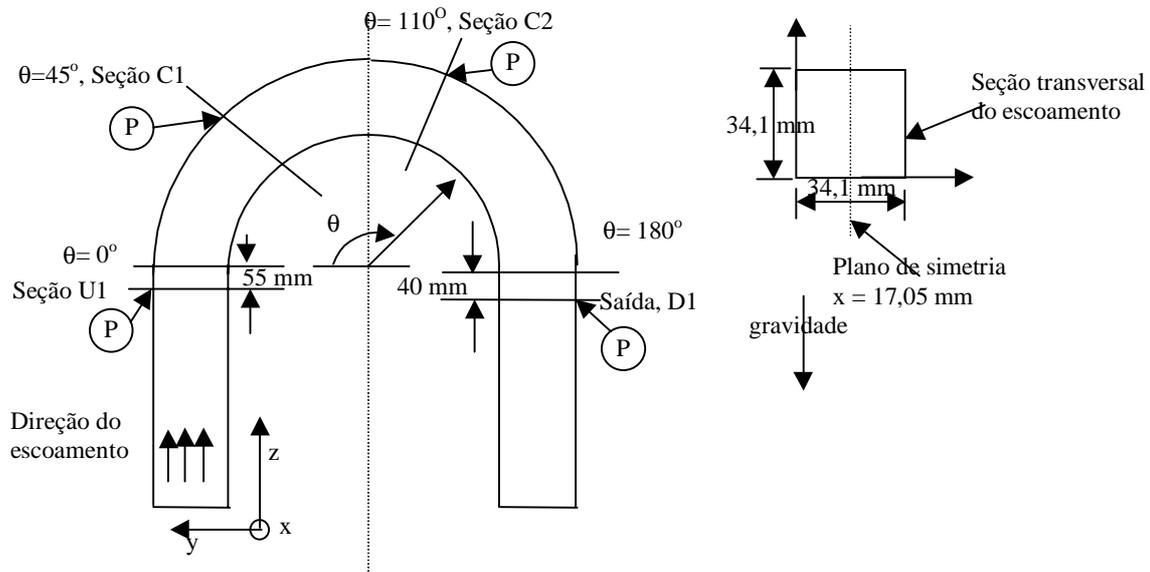


Figura 2– Detalhamento da localização das seções de medida, localização do plano de simetria, pontos de medida de pressão e sentido do escoamento na seção de teste.

Para medir-se a distribuição de fases, a sonda foi inserida no escoamento através de quatro furos com 2 mm de diâmetro, na parede da lateral da curva (plano yz). Um mecanismo de deslocamento transversal e azimutal na direção x permitiu o posicionamento da sonda em qualquer ponto de medida no plano (xy) para as respectivas seções U1, C1, C2 e D1. O mecanismo de deslocamento transversal é acionado por um micrômetro digital que tem uma incerteza de $\pm 0,02$ mm. O deslocamento azimutal foi realizado manualmente contra a escala de um transferidor com $\pm 1^\circ$ de resolução. O sinal gerado pela sonda foi adquirido e gravado com uma frequência de 50 kHz durante um período de 40 segundos. Para tanto, utilizou-se uma placa de aquisição de dados de 12 bits da National Instruments (AT-MIO 16), instalada no barramento de um PC-Pentium II.

A função densidade de fase, $N_g(x,y,z,t)$ indica a ocorrência ou não da fase gás (bolha de ar) no ponto de medida localizado pela coordenada (x,y,z) no instante t . Ela foi obtida aplicando-se um valor de corte ao sinal da sonda. Valores de voltagem acima do valor de corte foram identificados como presença de líquido, com $N_g(x,y,z,t) = 1$; valores de voltagem abaixo do valor de corte indicaram a presença de gás, com $N_g(x,y,z,t) = 0$. Assim, a fração de vazio local, $\alpha(x,y,z)$, é obtida fazendo-se a média temporal da função densidade de fase:

$$\alpha[x, y, z] = \frac{1}{T} \int_t N_g(x, y, z, t) dt \quad (1)$$

onde T é o período de amostragem do sinal. A fração de vazios média na seção transversal, $\langle \alpha \rangle$, é determinada a partir da média da fração de vazios local ponderada pela área:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{A} \int_A \alpha \cdot dA \quad (2)$$

3 – ENSAIOS PRELIMINARES

A execução dos testes experimentais foi precedida de diversos ensaios preliminares para que fossem verificados: a existência de simetria com relação aos dados experimentais de fração de vazios e o número de pontos e sua localização em cada seção de medidas.

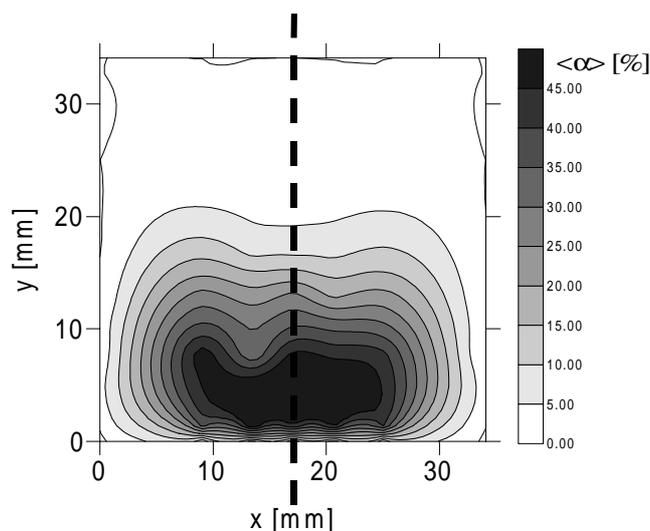


Figura 3 - Verificação experimental da simetria para x igual a 17,05 mm para a seção C2 com $(J_L; J_G) = (2,20 \text{ m/s}; 0,23 \text{ m/s})$.

Devido a geometria da curva plana é esperado que haja uma simetria no escoamento e nas medidas de fração de vazios com relação ao plano (x, y) . A verificação experimental desta condição de simetria é necessária para validar os procedimentos experimentais de geração de bolhas, do alinhamento da própria seção de desenvolvimento e da curva plana e reduzir o trabalho experimental de posicionamento da sonda e do processamento de dados. Este teste foi parcialmente realizado em Matos A. *et al.*, 1999, quando foi comprovada a existência de simetria dos dados experimentais de fração de vazio na seção do tubo reto de desenvolvimento. No presente trabalho a verificação será realizada apenas para a seção C2 da curva plana. As conclusões obtidas com os resultados da seção C2 serão estendidas para as outras seções. O teste foi conduzido para um par de velocidades superficiais do líquido e do gás iguais à $(J_L; J_G) = (2,20 \text{ m/s}; 0,23 \text{ m/s})$ e foram tomados 36 pontos de fração de vazios obtidos a partir de uma grade nas direções x e y . As medidas locais de fração de vazios são mostradas na Figura 3 na forma de um gráfico de contorno de vazio constante. Tomando-se como referência a posição x igual a 17,05 mm pode-se constatar visualmente um espelhamento dos dados de fração de vazios. Evidentemente esta concordância não é absoluta, mas considerando as incertezas associadas às medições considera-se como satisfatória a comprovação da existência da simetria.

O estabelecimento do número de medidas locais de fração de vazios por seção de medida tem implicações diretas no tempo de execução dos testes assim como na

determinação da fração de vazios média na seção. O cumprimento destas duas tarefas requer um número mínimo de posições da sonda no plano (x, y) de tal modo que o tempo por ensaio seja pequeno, mas suficiente o necessário para garantir que o processo de média ponderada pela área, Eq. (2), não seja comprometido pela insuficiência de pontos causando um erro na determinação final da fração de vazios média da seção transversal. A seção U1 foi considerada para avaliar o número de posições da sonda devido aos elevados gradientes de fração de vazios que ela apresenta próximo às paredes, (Matos *et al.*, 1999).

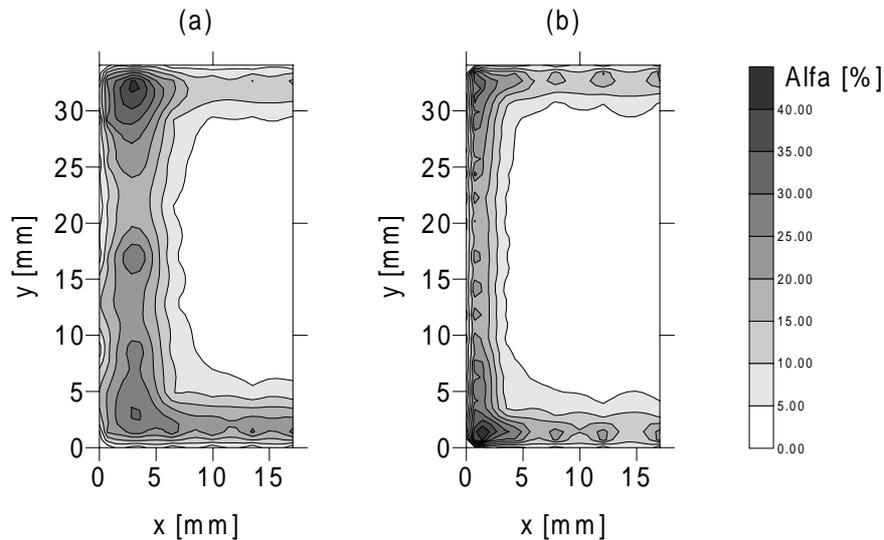


Figura 4- Distribuição de fração de vazio (%) na seção U1 para: (a) 42 posições e, (b) 105 posições da sonda.

Dois testes foram conduzidos com grades de 42 e 105 posições que varreram meia seção transversal em vista da simetria. As velocidades superficiais do líquido e gás foram de $(J_L; J_G) = (1,3523 \text{ m/s}; 0,1468 \text{ m/s})$ e $(1,2934 \text{ m/s}; 0,1374 \text{ m/s})$ que correspondem ao teste com 42 e 105 posições, respectivamente. Elas não coincidem pois foram realizadas em dias diferentes entretanto, teve-se um cuidado de ajusta-las o melhor possível para que fosse permitido uma comparação direta entre testes. A distribuição de fração de vazio é mostrada na figura 4. Numa primeira observação visual constata-se que a distribuição de fases do escoamento, em ambos os casos, é similar, indicando que o padrão de escoamento foi mantido e, também, que o procedimento de medição foi correto em ambos os casos. As implicações em se estabelecer uma grade com 42 posições, figura 4a, resultam em uma fração de vazio média calculada de $\langle \alpha \rangle = 12,03\%$. Se a medida da fração de vazio local é realizada em 105 posições, figura 4b, a fração de vazios média é igual a $\langle \alpha \rangle = 8,42\%$. Evidentemente, há que se estabelecer um critério para verificar se as medições de fração de vazio local e o respectivo valor médio na seção de testes estão corretos. Adotamos como referência, o valor da fração de vazio média calculada pelo modelo bifásico homogêneo, neste caso 9,79% e 9,60%, correspondendo aos testes da figura 4a e 4b, respectivamente. Observa-se que quando 42 posições de medidas são utilizadas, a fração de vazios média é superior à fração de vazio calculada pelo modelo homogêneo. Isto é inconsistente pois o modelo homogêneo para o escoamento ascendente em U1 estabelece um limite superior para $\langle \alpha \rangle$ uma vez que ele não admite o deslizamento ou movimento relativo entre as fases (a fração de vazio é simplesmente a razão entre a vazão de gás e a vazão total das fases). Esta constatação indica que a caracterização da fração de vazio com 42 posições por seção de

medidas é insuficiente, entretanto, com 105 posições consegue-se a caracterização da fração de vazio.

Em vista dos testes preliminares as medidas de fração de vazio nas seções U1, C1, C2 e D1 passaram a ser executadas em somente metade da seção transversal considerando a simetria e em 105 posições.

4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foi realizado um mapeamento da distribuição de vazios nas seções U1 a D1 para três pares de vazões de líquido e gás. Os testes são identificados de #1 a #3 conforme mostra a tabela 1 com as correspondentes velocidades superficiais. Devido a impossibilidade de se conduzir num único teste as medidas nas seções U1 a D1 sem interromper os fluxos de ar e água, as velocidades J_L e J_G entre as medidas de uma seção para outra foram mantidas tão próximo quanto possível. Assim, a tabela 1 reporta os valores médios de J_L e J_G para os testes #1 a #3. De forma complementar as condições operacionais são mostradas na quarta e quinta coluna da tabela valores correspondentes a uma estimativa do número de Froude, Fr , e a fração de vazio considerando um modelo homogêneo, $\langle\alpha\rangle_h$. Froude é definido pela Eq. (3) e expressa uma razão entre as forças de empuxo e centrífuga:

$$Fr = \frac{\text{Empuxo}}{\text{Centrífuga}} = \frac{(\rho_L - \rho_G) \cdot g}{(\rho_L \cdot V_L^2 - \rho_G \cdot V_G^2) / R_M} \cong \frac{g \cdot R_M}{[J_L / (1 - \langle\alpha\rangle_h)]^2}, \quad (3)$$

onde os subscritos L e G referem-se as fases líquido e gás, V e ρ são a velocidade e densidade, R_M o raio médio da curva e J a velocidade da mistura, ($J=J_L+J_G$). A fração de vazios correspondente a um escoamento homogêneo (sem deslizamento entre fases) é dada pela Eq. (4):

$$\langle\alpha\rangle_h = \frac{J_G}{J}. \quad (4)$$

Tabela 1 - Valores J_L , J_G , n. Froude e $\langle\alpha\rangle_h$ para os testes realizados.

Teste	J_L (m/s)	J_G (m/s)	Fr	$\langle\alpha\rangle_h$ (%)
#1	2,12	0,13	0,17	5.8
#2	1,33	0,14	0,42	9.5
#3	0,84	0,03	1,06	3.4

A partir dos valores que Fr assume pode-se afirmar que a magnitude da força centrífuga decresce em relação a força de empuxo do teste #1 ao teste #3. Com relação a concentração de gás, o teste #2 é o que apresenta os maiores valores seguidos pelos testes #1 e #3.

No teste #1, mostrado na primeira fileira da figura 5, observa-se que a fração de vazio na seção U1 é elevada próximo a paredes do duto e seu valor é quase nulo na região central, isto é, as bolhas apresentam o “pico junto à parede” (*wall peaking*) típico de escoamentos em bolhas ascendentes. Na seção C1 a força centrífuga já atua para segregar as fases: a fração de vazio tem concentração mais elevada na parte interna da curva, mas ainda tem-se bolhas de ar na parte superior; a região central da seção ainda permanece com fração de vazio próxima de zero. Nas seções C2 e D1 observa-se que a fração de vazio ocorre somente da região central da seção para a parte interna da curva.

Isto é, a curva plana atua efetivamente como um separador de fases, com as bolhas de ar migrando para a parte interna da seção, na a condição operacional caracterizada em #1.

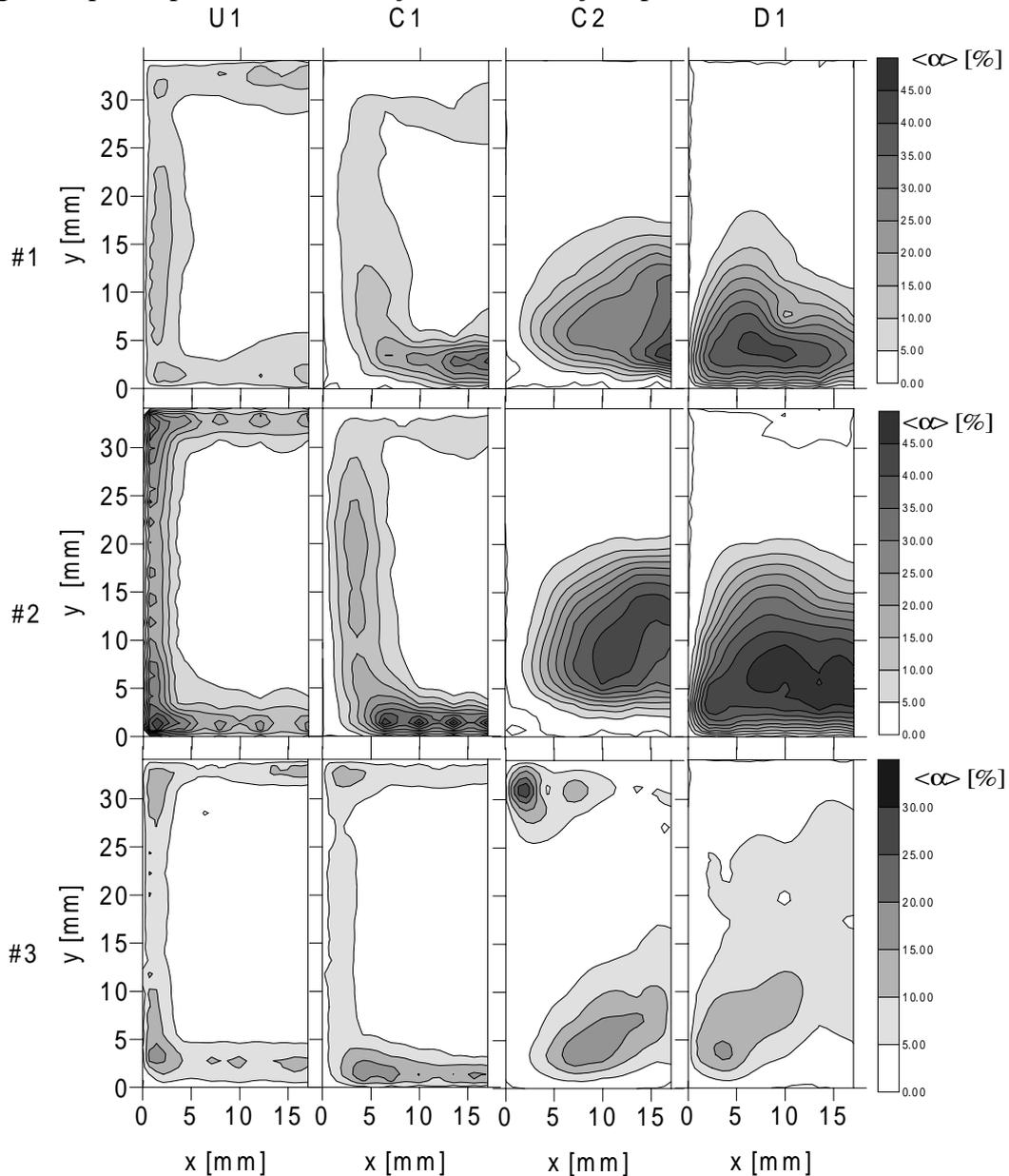


Fig. 5 - Distribuição da fração de vazios nas seções U1, C1, C2 e D1 para os testes #1- fileira superior, #2 - fileira do meio e #3 – fileira inferior.

No teste #2, mostrado na segunda fileira da figura 5, observa-se um comportamento similar ao já descrito para o teste #1. Porém, o efeito de segregação das fases é menos acentuado dado o menor valor da velocidade superficial do líquido e, conseqüentemente, o maior Froude.

O teste #3 por possuir o par de velocidades superficiais de menor valor tem as forças centrífugas da mesma ordem das forças gravitacionais, $Fr \cong 1$. Como decorrência, ele apresenta diferenças na distribuição de fração de vazio conforme mostra a terceira fileira da figura 5. Na seção C1 a parte superior da curva ainda apresenta uma concentração de ar elevada. O mesmo se observa na seção C2, mas a fração de vazio na parte central superior do duto (parte externa da curva) é inferior quando comparada à da seção C1. A seção D1 concentra a fração de vazio na parte inferior da curva, mas de

forma menos acentuada do que nos testes anteriores, que têm velocidades superficiais maiores: a parcela superior desta seção de teste, junto ao raio externo da curva, e que tem fração de vazio próximo de zero, é menor do que a que se observa nos testes #1 e #2.

A evolução da fração de vazios média nas seções U1 a D1 é mostrada na figura 6 para os testes #1 a #3. Por conveniência, a linha tracejada representa a fração de vazios média obtida do modelo homogêneo, $\langle \alpha \rangle_h$. Em todos os testes ocorre um aumento da fração de vazios média. Ele é justificado considerando-se que ao longo da curva de 180 graus há uma inversão no sentido da força de empuxo até atingir a seção D1 que causa um deslizamento entre fases ‘negativo’ ou seja a fase gás se desloca mais lentamente que a fase líquida e que portanto espera-se a que $\langle \alpha \rangle$ aumente. A ocorrência de deslizamento entre fases negativo é esperada também na seção C2 por estar localizada a 110 graus do início da curva e que portanto $\langle \alpha \rangle_{C2}$ deve ser maior que $\langle \alpha \rangle_h$, como mostra a figura. A seção C1 localizada a 45 graus do início da curva tem 70% da gravidade atuando na direção do escoamento e portanto deve apresentar um deslizamento entre fases positivo. Entretanto, os dados experimentais mostram valores de $\langle \alpha \rangle_{C1}$ próximos ou mesmo coincidentes com $\langle \alpha \rangle_h$. A aparente redução ou mesmo supressão do deslizamento entre fases pode ser atribuída aos elevados gradientes de concentração que reduzem o deslizamento e às correntes secundárias formadas pelo campo centrífugo que transportam as bolhas prioritariamente próximo a região de parede onde as velocidades são menores.

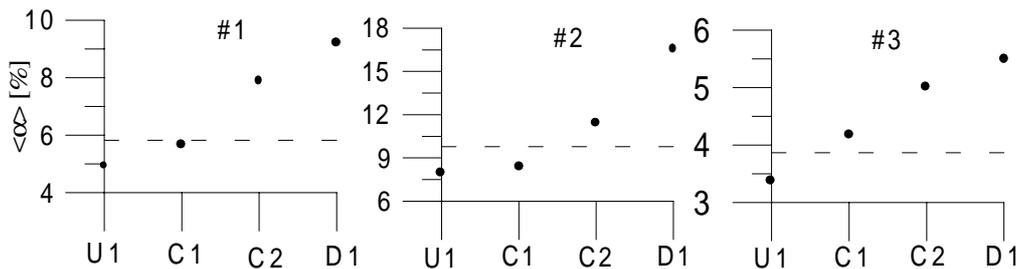


Figura 6 - Distribuição da fração de vazio média na seção transversal, $\langle \alpha \rangle$ para os testes #1 a #3 e (----) a fração de vazio homogênea $\langle \alpha \rangle_h$.

5- CONCLUSÕES

O emprego da sonda elétrica mostrou-se uma técnica experimental capaz de executar o mapeamento da distribuição de fração de vazios numa curva plana de 180 graus. O fenômeno de segregação das fases é dominado pelas forças de empuxo e centrífuga. A primeira é responsável pelo aumento da fração de vazios ao longo da curva devido a inversão do sentido do empuxo com relação ao sentido do escoamento principal. O campo centrífugo por sua vez causa uma assimetria na distribuição do vazio em direção à parede interna da curva. São encontradas neste processo concentrações de até 40% ainda no regime de bolhas dispersas. O mecanismo de migração das bolhas se dá predominante próximo às paredes. A distribuição de fração de vazio para regimes com $Fr < 1$ ocorre de forma assimétrica segregando a maior parte do gás na parte interna da curva e revelando-se uma favorável condição operacional para a curva de 180 graus atuar como separador.

6 – REFERÊNCIAS

- Hibiki T., Mishima K., Yoneda K. Fujine S. Tsuruno A. Matsubayashi M., 1994, Visualization of fluid phenomena using a high frame-rate neutron radiography with a steady thermal neutron beam, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research a vol. 351 pp. 423-436
- Keska, J.K. e Fernando, R.D., 1994, Average physical parameters in an air-water two-phase flow in a small, square-sectioned channel, J. Fluids Engineering, Vol. 116, pp. 247-253.
- Lahey, R.T. Jr., 1995, The CFD analysis of multidimensional phenomena in multiphase flow. Proceeding of the Second International Conference of Multiphase Flow '95-Kyoto, vol. 3, pp. M02-1-M02-8
- Lopez de Bertodano, M.L., Lahey, R.T. and Jones, O.C., 1994a, Phase distribution in bubbly two-phase flow in vertical ducts, Int. J. Multiphase Flow, vol. 20, no. 5, pp. 805-818.
- Lopez de Bertodano, M.L., Lahey, R.T. and Jones, O.C., 1994b, Turbulent bubbly two-phase flow data in a triangular duct, Nuclear Engineering and Design, vol. 146, pp. 43-52.
- Matos, A., Rosa, E.S., França, F.A., Morandin, M. e Morales, R., Análise experimental e numérica de um escoamento vertical ascendente em bolhas em um canal de seção quadrada, XV Cong. Bras. Eng. Mecânica, COBEM Águas Lindóia-SP, em CD rom, Nov. 1999.
- Mishima, K. Hibiki, T. e Nishihara, H., 1993, Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 19, # 1, pp. 115-124.
- Moujaes, S e Dougall R. S., 1987, Experimental Investigation of cocurrent two-phase flow in a vertical rectangular channel, Canadian J. Che. Eng. Vol 65, october, pp. 705-715.
- Sadatomi M., Sato Y., e Saruwatari S., 1982, Two-phase flow in vertical noncircular channels, Int. J. Multiphase Flow vol. 8, n. 6, pp. 641-655.
- Tomiyama, A.; Matsuoka, T.; Fukuda, T. and Sakaguchi, T., 1995, A Simple numerical method for solving an incompressible two-fluid model in a general curvilinear coordinate system, '95-Kyoto, vol. 3, pp. NU23-NU30.
- Troniewski, L. e Ulbrich, R., 1984, Two-phase gas-liquid flow in rectangular channels, Chem. Engineering Science, Vol. 39, # 4, pp. 751-765.

Abstract. *Experimental results of local and cross section average void fraction in an air water flow in bubbly regime occurring on U bend are presented. The phase segregation is characterized by measuring the void fraction profiles along four sections by means of a conductive electrical probe. This flow is dominated by the buoyancy and centrifugal forces. The first is responsible for an increase on the cross section void fraction along the U bend while the former causes the bubble migration toward the inner radius of the curve. It is also observed that mostly of the bubble migrations movements takes place near the walls.*