

# **INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO (ÁGUA-AR) EM REGIME DE BOLHAS DISPERSAS ATRAVÉS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS E DE ENSAIO ULTRASÔNICO**

**Manolo Pires**

**Vilson Carlos da Silva Ferreira**

**Flávio van der Laan**

**Lucas Gutkoski**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Laboratório de Turbo-Máquinas e Medições de Fluxo, Departamento de Engenharia Mecânica, 90030-170, Porto Alegre, RS, Brasil.

E-mail: manolo@mecanica.ufrgs.br

## **Resumo**

O presente trabalho investiga, experimentalmente, as flutuações de pressão provocadas por descontinuidades e instabilidades internas em ambas as fases do escoamento bifásico. Especificamente, analisa-se os efeitos da resposta dinâmica de nuvens de bolhas no escoamento transiente bifásico. Os efeitos interativos que a variação no volume das bolhas tem na distribuição de pressão e, todavia, no campo de velocidade do escoamento são muitos significativos quando a concentração das bolhas torna maior e a possibilidade do movimento global da mistura surge. Os resultados desta investigação revelam que a presença das bolhas de ar afetam a natureza do meio através dos quais a onda está progredindo, alterando a massa específica e a compressibilidade do meio, e assim, alterando drasticamente a velocidade do som no meio, a qual diminui e torna-se dispersiva. Observou-se que um aumento na fração de vazios causa uma redução substancial na amplitude de resposta da bolha (atenuações).

**Palavras chaves:** Grupo de Bolhas, Escoamento Bifásico, Descontinuidades, Atenuações

## **1. INTRODUÇÃO**

Com o advento da Segunda Guerra mundial, as pesquisas teóricas e experimentais sobre escoamento bifásico foram intensificadas, devido a sua aplicação em reatores nucleares e a aceleração dos programas de pesquisas nucleares para fins bélicos.

O grande interesse pelo escoamento bifásico é devido, principalmente, ainda, a sua aplicação em foguetes, instalações industriais, como por exemplo, nas indústrias químicas e petroquímicas. Estão presentes ainda na natureza, como no caso de fontes geotérmicas para geração de energia.

Assim, uma quantidade apreciável de problemas em processos industriais (por exemplo, em evaporação, condensação, separação de componentes usando destilação) envolvem a medição de fluxos que, intencionalmente ou não, apresentam mais de uma fase e que normalmente envolvem altos custos.

Este tipo de escoamento possui estruturas espaciais complexas e mudam sua forma com o tempo. Estas peculiaridades são as principais razões das flutuações aleatórias em todos os parâmetros hidrodinâmicos do escoamento.

Bolhas de gás suspensas em líquidos sofrem vários fenômenos complexos demais para uma formulação matemática adequada. Nos modelos físico-matemático existentes (modelos homogêneos e separados) as peculiaridades hidrodinâmicas do meio bifásico não são levadas em consideração. Eles negligenciam totalmente os processos internos transientes (como no caso de modelos de escoamentos homogêneos ou modelos avaliados num tempo médio).

Nenhum modelo teórico que os autores pesquisaram, descreve a evolução da estrutura do escoamento bifásico enquanto muda parâmetros importantes da mistura bifásica, tais como, o conteúdo de gás (ar) injetado no escoamento nos limites de seu título  $0 < x < 1$ . Assim as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e de energia não são suficientes para descrever a complexa estrutura espacial e temporal do escoamento bifásico. É necessário suplementá-las com equações constitutivas, expressando as leis de transferência interfacial em termos das variáveis dependentes.

No escoamento bifásico em regime de bolhas dispersas surgem complicadas interações como: colisões, coalescência entre bolhas adjacentes, interações entre bolhas e a parede do tubo e variações instantâneas da geometria das bolhas, que afetam o potencial hidrodinâmico local do escoamento, causando flutuações na pressão estática na velocidade, e violento movimento turbulento do líquido. A variação resultante do campo do escoamento induz mudanças no movimento das bolhas, e estas podem resultar em uma flutuação mais violenta ou heterogeneidade do escoamento. Muitos esforços têm sido despendidos analiticamente, tais como, os trabalhos de Hsieh & Plesset (1961), Wijngaarden (1966,1968,1976 e 1984), Scott (1981), Dágostino & Brennen (1989), Nakoryakov et al (1994), Takahira et al (1994), Ferreira (1997) e muitos outros, mas tais modelos não podem representar a situação do escoamento como ele realmente existe e podem somente ser aplicado para escoamento em condição estritamente limitada ou bem definida. Por outro lado, embora uma grande quantidade de trabalhos experimentais tem sido realizadas sobre escoamento com bolhas em diferentes sistemas líquido-gás, comparações de resultados de muitas pesquisas fornecem pouca informação básica de forma a dar uma visão do fenômeno físico. Isto é devido ao fato que tais pesquisas foram confinadas na medida de um ou dois parâmetros sob diferentes condições do escoamento e da complexa natureza estatística dos movimentos aleatórios do fluido induzido por bolhas movimentando de forma aleatória. Assim, o conhecimento básico sobre o mecanismo deste complexo escoamento é ainda muito limitado, embora bolhas de gás em líquido seja uma visão muito familiar.

O presente trabalho é uma investigação experimental das flutuações de pressão local do escoamento bifásico em regime de bolhas dispersas. Escoamento este através de uma tubulação horizontal de 50 mm de diâmetro interno sob pressões aproximadamente atmosférica. Ênfase será dada no seguinte:

- 1) Medidas de flutuações de pressão;
- 2) Cálculo das intensidade das flutuações de pressões provocadas pelas bolhas;

## **2. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO**

Os dados experimentais foram obtidos de um circuito de teste mostrado na Figura 1. O circuito de teste faz parte da bancada de calibração de medidores de fluxo do tipo gravimétrica, existente no Laboratório de Turbo-Máquinas e Medições de Fluxo (UFRGS-LTMF) usada para calibrar medidores de fluxo de 0,1 até 5 kg/s com incerteza de  $\pm 1\%$  de

fundo de escala (FS). Este circuito compreende três seções diferentes: (1) Seção de entrada; (2) Seção de desenvolvimento e (3) Seção de teste.

A seção de entrada é um dispositivo denominado “condicionador de fluxo” constituído de uma expansão da seção transversal do tubo de seção de teste de 50 mm para 150 mm, onde foram instalados um orientador de escoamento tipo “favo de abelha” e um respiro. O objetivo da instalação do condicionador associado ao orientador do escoamento é eliminar possíveis escoamentos secundários e flutuações provocadas pela bomba ou pelos acessórios da tubulação. O respiro foi instalado para extrair o ar presente no escoamento (possível cavitação provocada pela bomba) e que pode alterar os dados.

A seção de desenvolvimento consiste de uma tubulação reta, sem acidentes de 50 mm de diâmetro, com um comprimento equivalente a 60 diâmetros (3000 mm), com o objetivo de promover o pleno desenvolvimento do perfil de velocidades.

A seção de teste consiste de um tubo horizontal de acrílico de 50 mm de diâmetro interno, instalado externamente sobre o mesmo, 2 sensores piezoelétricos diametralmente opostos, (o sensor superior é o sensor transmissor de sinal ultra-sônico de rádio-frequência e o inferior o receptor). O sensor do tipo piezoelétrico possui uma frequência de ressonância de 140 KHz, saída do sinal de 4 a 20 mA.

A injeção de ar é feita através de um tubo de cobre em forma de “L” com 10 mm de diâmetro com vários pequenos orifícios ao redor da perna inferior do “L”. Com esta solução o ar é misturado radialmente dentro d’água.

Utilizando-se de um gerador de funções, o sensor piezoelétrico transmissor da seção de teste foi excitado por uma onda senoidal na frequência de 140 KHz (correspondente a frequência de ressonância do sensor). Este sinal ultrasônico de 140 KHz foi modulado aleatoriamente em amplitude e fase durante a passagem de bolhas pela seção de teste e excita o sensor piezoelétrico receptor diametralmente oposto. Os sinais do sensor piezoelétrico receptor foram amplificados e posteriormente demodulados para remover as componentes de alta frequência do sinal. Os sinais assim demodulados e filtrados com filtros passa – baixa representam as flutuações aleatórias de pressão provocadas pelas bolhas no escoamento. Estes sinais de pressão foram adquiridos via software, numa frequência de aquisição de 100 KHz, taxa de aquisição de 100.000 pontos num intervalo de tempo de 1 segundo. Simultaneamente e de forma sincronizada com os sinais de pressão foram capturados e gravadas em fitas magnéticas as imagens do movimento das bolhas no intervalo de tempo correspondente ao de aquisição (1 segundo). Para isto utilizou-se de uma câmera digital CCD monocromática, com velocidade de obturação de 1/100 segundo. As imagens foram digitalizadas em 30 quadros por segundo.

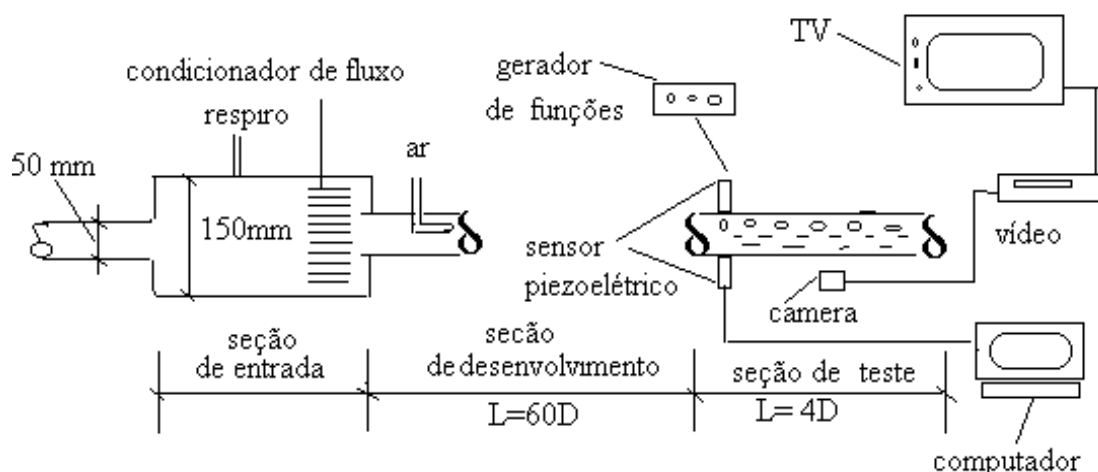


Figura 1 Seção de Testes

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

As medições foram efetuadas para diferentes fluxos mássicos água e ar. Esta seção apresenta alguns resultados obtidos. A Figura 2 mostra as flutuações de pressão no domínio do domínio do tempo para o escoamento unifásico com fluxo mássico de água de 1,03 kg/s e

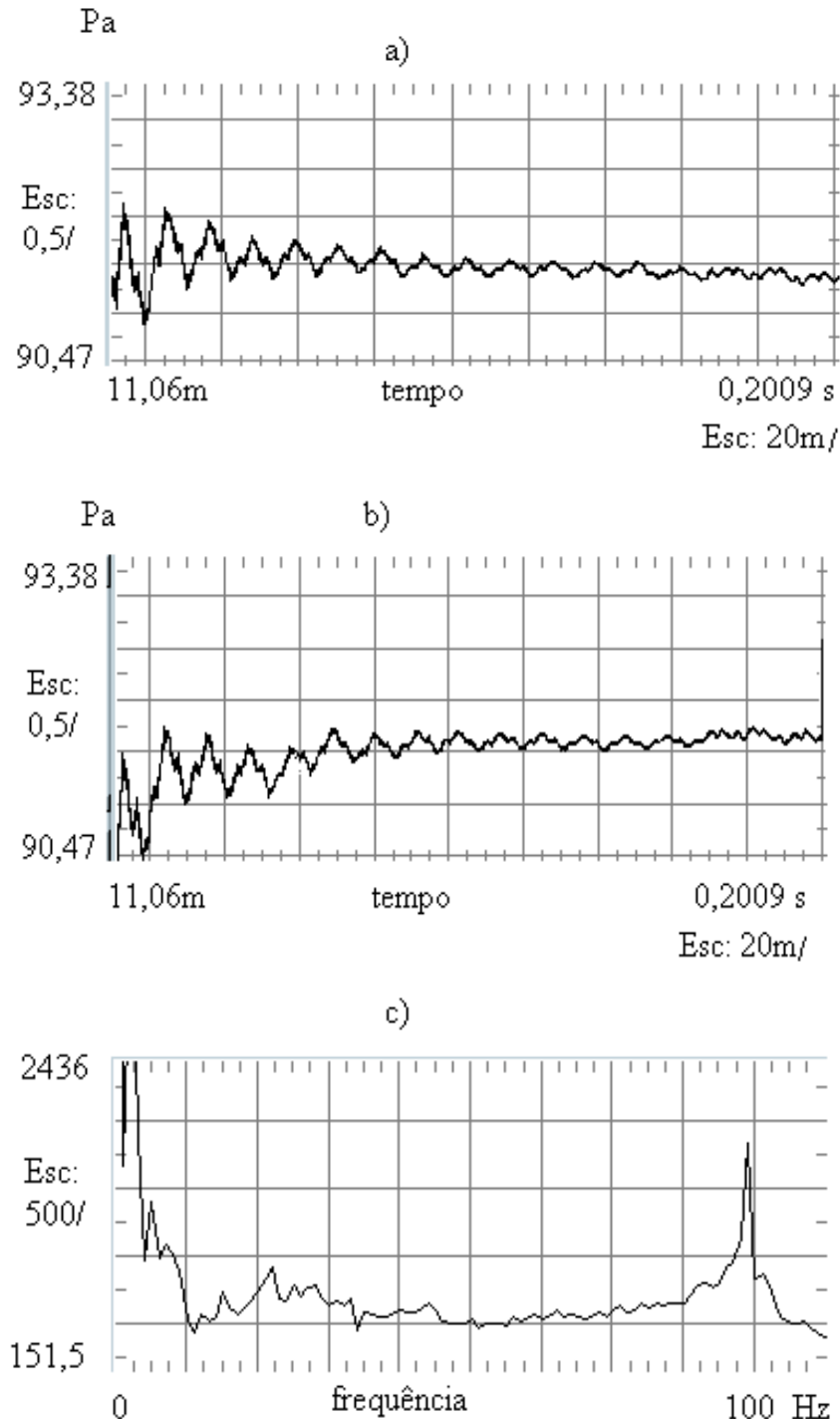


Figura 2 Flutuações de pressão correspondente a : a) Escoamento unifásico com Fluxo Mássico  $m = 1,03 \text{ kg/s}$  (água) b) Escoamento Bifásico com Fluxo Mássico  $m = 1,03 \text{ kg/s}$  (água) e  $m = 0,000010775 \text{ kg/s}$  (ar) c) Espectro de Frequência correspondente ao Escoamento Bifásico .

para escoamento bifásico com um fluxo mássico de 1,03 kg/ s de água e 0,000010775 kg/ s de ar, tanto no domínio do tempo e o espectro de frequência correspondente.

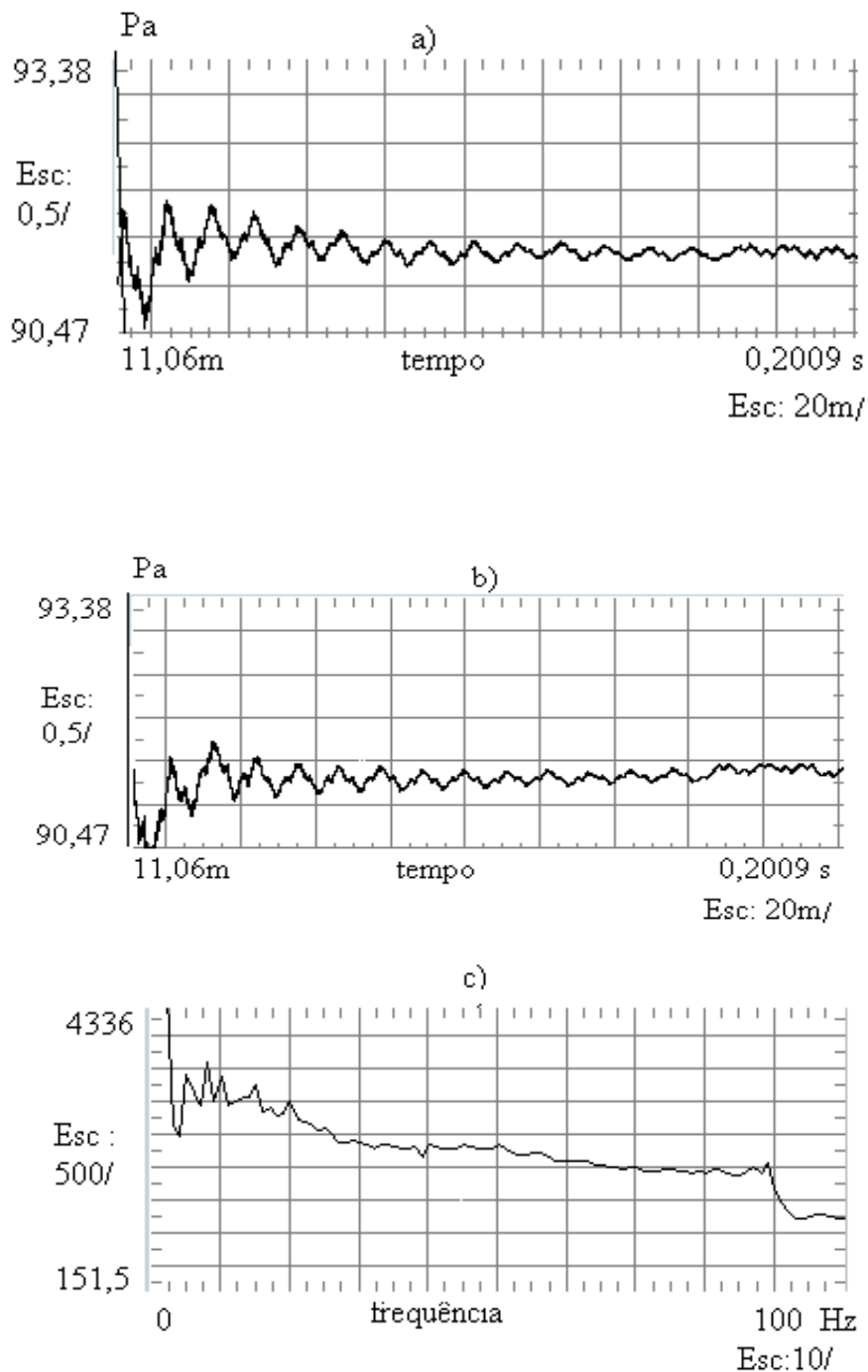


Figura 3 Flutuações de pressão correspondente a: a) Escoamento Unifásico com Fluxo Mássico  $m = 1,37$  kg/s (água) b) Escoamento Bifásico com Fluxo Mássico  $m = 1,37$  kg/s (água) e  $m = 0,00002155$  kg/s (ar) c) Espectro de Frequência correspondente ao Escoamento Bifásico

A Figura 3 mostra as flutuações de pressão no domínio do tempo para o escoamento unifásico com fluxo mássico de água de 1,37 kg/s e para o escoamento bifásico com fluxo mássico de 1,37 kg/s de água e 0,00002155 kg/s de ar no domínio do tempo e o espectro de frequência correspondente.

Foram adquiridos diversos sinais de flutuações de pressões para diferentes fluxos mássicos de água e ar. Iniciou-se com  $m = 0,5 \text{ kg/seg}$  água (escoamento unifásico) e o correspondente escoamento bifásico  $m = 0,5 \text{ kg/seg}$  (água) e  $m = 0,1 \text{ kg/seg}$  ar. A partir daí variou-se o fluxo de mássico de água tanto para o escoamento unifásico quanto para o bifásico de 0,5 kg/seg em 0,5 kg/seg até o fluxo mássico de  $m = 2,0 \text{ kg/seg}$  de água e o de ar 0,2 em 0,2 kg/seg até 2kg/seg.

Os autores fizeram diversas análises, tanto no domínio do tempo, quanto no da frequência, para diferentes frações de vazio testadas, utilizando-se de software de aquisição e análise estatística dos dados. Embora as Figuras 2 e 3 sejam casos particulares, elas são representativas e muito similares aos demais testes efetuados. Dos gráficos das Figuras 2 e 3, foi observado que com a introdução da fase dispersa (bolhas de ar) no escoamento com água :

- A intensidade das flutuações no escoamento bifásico é maior uma ordem de grandeza ou mais do que a do escoamento unifásico;
- O espectro de frequência do escoamento bifásico é mais estreito do que o do unifásico para ao mesmo fluxo mássico. Há alguns picos bem definidos de frequências em ambos escoamentos, os quais provavelmente representam alguns efeitos da própria bancada de medições de fluxo ;
- Em contraste com o escoamento unifásico, o espectro de flutuações de cada parâmetro hidrodinâmico é caracterizado por uma queda máxima em baixa frequência da ordem de 1-10 Hz.

Análise de diversos diagramas de oscilações de pressão no escoamento bifásico obtidos no laboratório de turbo-máquinas da UFRGS revelam a presença nos escoamentos bifásicos de ondas progressivas ligada com sua estrutura espacial temporal.

A Figura 4 mostra as flutuações de pressão provocadas pela adição da fase dispersa (bolhas) nos escoamentos correspondentes aos das Figuras 2.

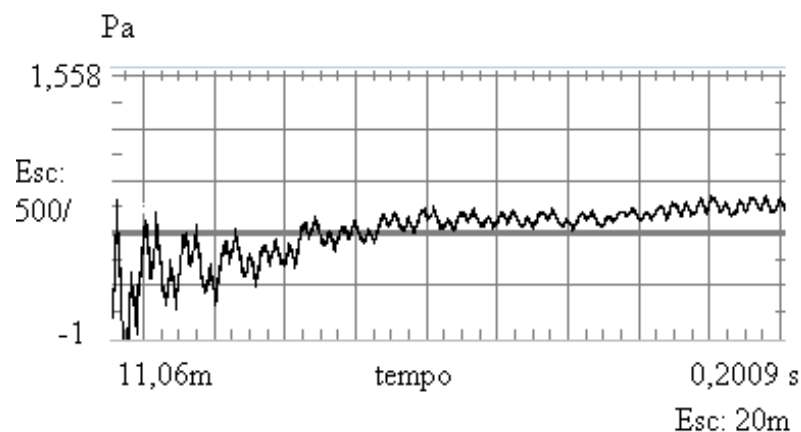


Figura 4 Flutuações de Pressão Provocada pela Fase Dispersa (Bolhas):) Sinal obtido da diferença entre o Escoamento Bifásico e Unifásico da Figura 2.

As flutuações de pressão reais representam uma superposição de um processo harmônico e um ruído aleatório.

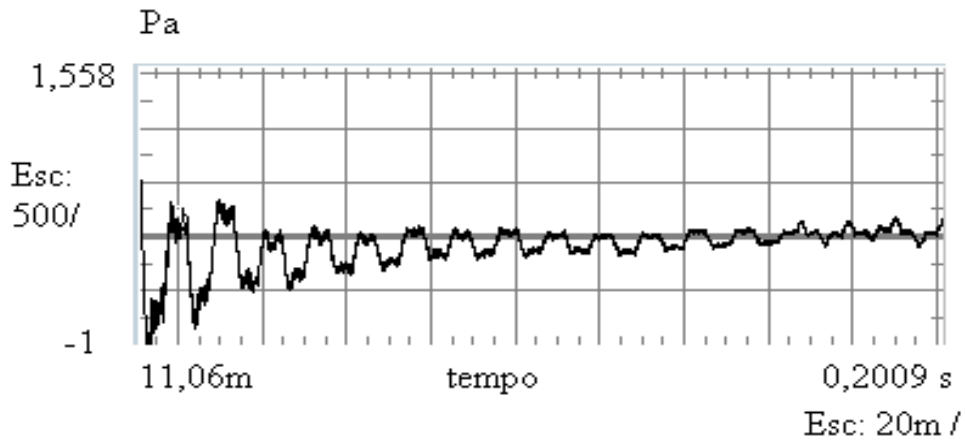


Figura 5 Flutuações de Pressão Provocada pela Fase Dispersa (Bolhas): Sinal obtido da diferença entre o Escoamento Bifásico e Unifásico da Figura 3.

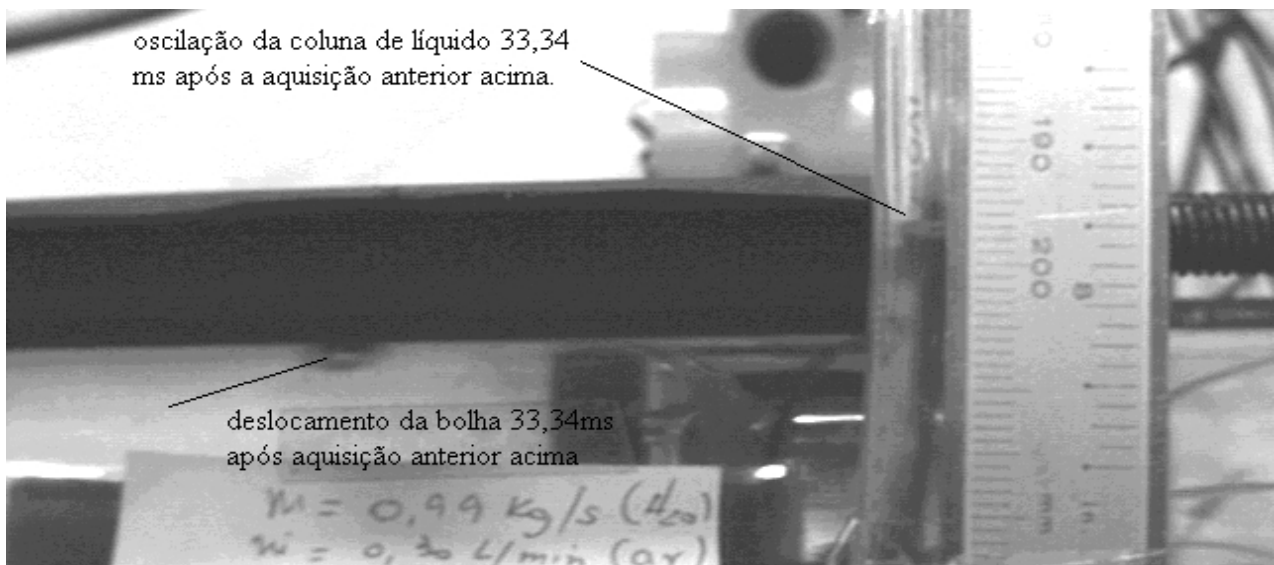
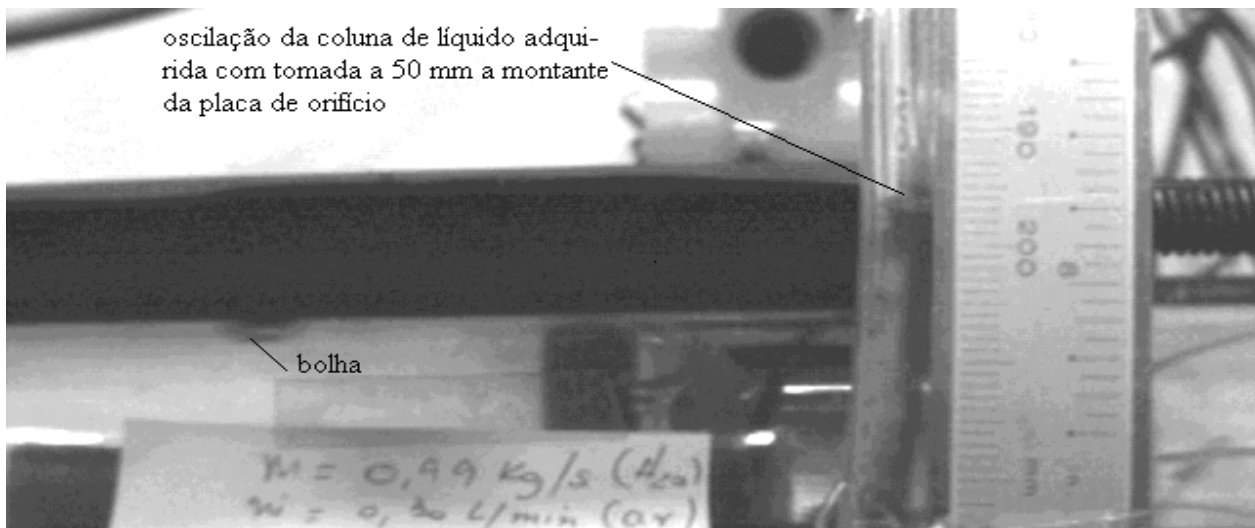


Figura 6 Flutuações de Pressão Obtidas num Intervalo de Tempo Correspondente a 33,34 ms

Utilizando-se de expressões analíticas propostas por Fokin, (1995), para o escoamento bifásico em regime transiente, foi calculada a intensidade das flutuações de pressões em forma de valores médios quadráticos. Os valores utilizados foram os correspondentes aos fluxos mássicos de água e ar das Figuras 2 e 3. Os valores médios quadráticos calculados, são da ordem de 0,81213 Pa. Verificou-se, que os valores obtidos experimentalmente estão em concordância com os analíticos.

Os resultados mostram efeitos não lineares e dispersivos, causados pela pulsações radiais das bolhas no líquido. Oscilações provocadas por grupo de bolhas afetam o escoamento básico tornando impossível um tratamento analítico do escoamento unifásico.

Conforme, Scott, (1991), oscilações provocadas por bolhas são descritas por certos problemas de autovalores, os quais dão os modos normais e correspondentes frequências de oscilações. Estes modos representam oscilações coletivas do sistema de bolhas, e não podem em geral, ser atribuída a bolhas particulares.

#### **4. CONCLUSÕES**

Embora a presente análise não permita uma exatidão dos resultados quantitativos, não havendo dados suficiente para ser conclusivo, os resultados desta investigação revelam um número de importantes efeitos em escoamentos confinados com bolhas. Atenuações extremamente altas são produzidas em água contendo bolhas suspensas de ar. A presença das bolhas de ar afetam a natureza do meio através dos quais a onda esta progredindo, alterando a massa específica e a compressibilidade do meio, e assim, alterando drasticamente a velocidade do som no meio, a qual diminui e torna dispersiva.

Efeitos de inércia na dinâmica das bolhas são importantes quando a frequência de excitação é comparável com a frequência natural da bolha. Observou-se que um aumento na fração de vazios causa uma redução substancial na amplitude de resposta da bolha (atenuações). Constatou-se ainda, que quando uma bolha flui na esteira da outra a mesma tende a acelerar-se mais do que a sua predecessora e coalescer com a mesma.

Gradientes de velocidades e aumento de turbulência tendem a aumentar a taxa com que as pequenas bolhas colidem, promovendo aglomerações, também tendem a fragmentar as bolhas em bolhas menores, produzindo um espectro muito grande de frequência, onde a maioria das bolhas entram em ressonância.

#### **5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Biesheuvel , Wijngaarden L. van ,1984, “Two Flow Equations for a Dilute Dispersion of Gas Bubble in Liquid “, J. Fluid Mech., Vol.148 , pp. 301-318.

D’ágostino L., Brennen C.E. , 1989, “ Linearized Dynamics of Spherical Bubble Clouds”, J. Fluid Mech. Vol. 1. 199, pp.155-176.

Ferreira V.C.S. ,1997, “Differential Pressure Spectral Analysis for Two-Phase Floe trough an Orifice Plate”, Int. J.Press.& Piping, Vol.73, pp.19-23.

Hsieh D.Y., Plesset M.S. ,1961, “ On Propagation of Sound in a Liquid Containing Gas Bubble”, Phys. Fluid, Vol.4, N. 8-pp. 970-975.



Nakoryakov V., Dontsov V.E. , Pouasaev B.G.,1994, “ Propagation of Pressure Waves in Liquid with Gas Bubbles and Solid Particles”, Russian Journal of Engineering Thermophysics, Vol. 4, pp 173.

Scott J.F. ,1981,” Singular Perturbation Theory Applied to the Collective Oscillation of Gas Bubbles in a Liquid”, J. Fluid Mech, Vol.113, pp. 487 –511.

Takahira H, Akamatsua T, Fujikawa S . ,1994,”Dynamics of a Cluster of Bubble in a Liquid”, JSME, International Journal, serie B, V.37, N. 2 pp.

Wijngaarden , L. van ,1976 a, “Hydrodynamics Interaction between Gas Bubbles in Liquid”, J. Fluid Mech, Vol.77, pp. 27- 44.

Wijngaarden , L. van ,1966, “Linear na Non Lineart Dispersion of Pressure Pulses in Liquid“, Technische Hogeschool Twente Afdelnig der Werktuigbounddunde, Postbus 217, Enschede, Netherlands, pp. 115-135.

Wijngaarden , L. van.,1968, “ On the Equations for motion of Mixtures of Liquid and Gas Bubbles”, J. Fluid Mech, Vol.33, part3, pp. 465-474.