

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**Área de Concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática**

**DETECÇÃO DE VAZAMENTOS POR COMPUTADOR “ON-LINE”  
EM TUBULAÇÕES TRANSPORTANDO MISTURAS GÁS-LÍQUIDO**

**Autora: Candice Ferreira Braga**

**Orientadora: Profa. Dra. Sandra Lúcia Cruz**

**Co-orientador: Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade  
de Engenharia Química, como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia Química.

Campinas, SP, Brasil

Abril, 2001

UNIDADE	B3
Nº CHAMADA	UNICAMP
	B 73 d
V	
EDM	48509
	16-83710 2
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	
Nº CPE	

CM00166491-1

BIB ID 237925

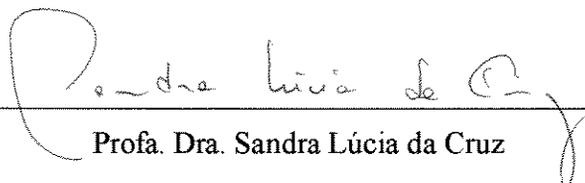
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B73d Braga, Candice Ferreira  
 Detecção de vazamentos por computador "on-line"  
 em tubulações transportando misturas gás-líquido /  
 Candice Ferreira Braga. --Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientadores: Sandra Lúcia Cruz, João Alexandre  
 Ferreira da Rocha Pereira.  
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
 Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Detectores de vazamento. 2. Controle automático.  
 3. Tubulação - Dinâmica dos fluidos. 4. escoamento  
 instável (Dinâmica dos fluidos). I. Cruz, Sandra Lúcia.  
 II. Pereira, João Alexandre Ferreira da Rocha. III.  
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
 Engenharia Química. IV. Título.

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 27 de Abril de 2001 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:



Profa. Dra. Sandra Lúcia da Cruz

Orientadora



Dra. Eliana Luci Ligeró

Titular

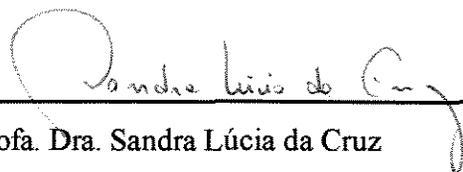


Prof. Dr. João Sinezio de Carvalho Campos

Titular

20.2.17642

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida por Candice Ferreira Braga e aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de Abril de 2001.

A handwritten signature in black ink, reading "Sandra Lúcia da Cruz", is written above a solid horizontal line. The signature is cursive and includes a large initial 'S'.

Profª. Dra. Sandra Lúcia da Cruz

Orientadora

**Muitos são os obstinados que se empenham no caminho  
que escolheram, poucos os que se empenham no objetivo.**

**Friedrich Nietzsche**

## AGRADECIMENTOS

À Deus

À minha mãe pelo incentivo e pelo exemplo de força e coragem.

Ào Rogério que esteve sempre ao meu lado nos momentos de grandes incertezas.

À Prof<sup>a</sup>. Sandra pela orientação nos trabalhos, e ainda pela calma e tranquilidade que sempre me transmitiu.

Aos amigos de Uberlândia que me acompanharam nesta trajetória: André, Amarildo, Vinícius, Juliana, Jean, Júlio, Virgínia e Márcio.

Aos mais novos amigos: Luciana, Tatiana, Elaine, Juliana, Joseane, Lurdinha, Jones, Rafael, Arnaldo, Rodrigo. Nunca os esquecerei.

Ao Arlan por todo seu conhecimento e disposição em ajudar nas horas de dúvidas.

Aos Professores do Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos.

À CAPES pelo apoio financeiro.

E a todos que indiretamente me apoiaram e incentivaram na conclusão deste trabalho.

Obrigada.

## RESUMO

Redes de tubulações são sistemas complexos utilizados para transportar produtos por longas distâncias para atender tanto o abastecimento das refinarias como suprir a necessidade dos grandes centros de consumo de derivados. São sistemas flexíveis quanto à capacidade operacional e bastante eficiente.

Transportar cada vez mais produtos com segurança, com baixo risco econômico e ambiental é um dos pontos mais importantes da operação de dutos. Para aumentar ainda mais a eficiência do transporte é fundamental desenvolver técnicas de monitoramento de dutos. A detecção de vazamentos é um dos principais aspectos do sistema de supervisão e controle de tubulações que transportam produtos químicos.

Neste trabalho, transientes pressão causados por vazamento, foram detectados em uma tubulação de 1250 metros de comprimento operando com um sistema ar-água. O sistema de detecção consiste de quatro transdutores de pressão conectados a um computador PC equipado com uma placa conversora ADA. Vazamentos foram provocados através de uma válvula solenóide que também está conectada ao computador PC através de um conversor D/A. Um programa computacional on-line é usado para provocar o vazamento, ler os sinais dos transdutores e gerar os perfis de pressão. Experimentos foram realizados sobre diferentes condições de operação: Número de Reynolds (baseado na vazão do líquido) variando de 4.000 a 10.000; porcentagem de vazamento de 10% a 50% da vazão nominal do líquido; vazão do ar variando de 2,5 l/min a 61,4 l/min; posição do vazamento a 250 m e a 750 m.

Os resultados deste trabalho mostram a possibilidade da detecção de vazamentos para sistemas de misturas ar-água, onde a quantidade de ar é o principal parâmetro para identificação de transientes e detecção de vazamentos.

## ABSTRACT

Pipeline networks are systems used to transport products through long distances in order to supply manufacturing and consumer centres. Pipelines are used due their flexibility and capacity, being very efficient systems.

An important point in pipeline operation is the challenge involved in the transportation of a great amount and variety of chemical and non-chemical products with reasonable economy and low risk for the environment. In order to increase the efficiency when transporting chemical products it is fundamental the development of pipeline control systems. Leak detection and location is one of the main aspects in the pipeline supervision and control system.

In this work pressure transients caused by leaks were detected and analysed in a 1250 m long pipeline operating with air-water system. The detection system consisted of four pressure transducers connected to a PC computer equipped with ADA converters. Leakage was provoked through a solenoid valve, which is also connected to the PC computer through the D/A converter. A computer program to be run on-line is used to provoke the leak, to read the transducers signals and to display the pressure profiles. Experiments were performed under different operation conditions: Reynolds number (based on the liquid flow) ranging from 4.000 to 10.000; leak magnitude from 10 % to 50 % of the nominal liquid flow; air flow rate ranging from 2,5 l/min to 61,4 l/min; leak location at 250 m and 750 m.

The results show the possibility of leak detection in air-water mixture systems, the amount of air in the pipe being the main parameter for transient identification and leak detection.

## INDICE

<b>Agradecimentos</b>	vi
<b>Resumo</b>	vii
<b>Abstract</b>	viii
<b>Índice</b>	ix
<b>Lista de Figuras</b>	xi
<b>Lista de Tabelas</b>	xiii
<b>Nomenclatura</b>	xiv
<b>1. Introdução</b>	1
1.1. Objetivos do Trabalho	2
<b>2. Detecção e Localização de Vazamentos em Tubulações. Revisão Bibliográfica</b>	4
2.1. Detecção e Localização de Vazamentos através da Análise de Transientes de Pressão	8
<b>3. Equipamentos e Métodos</b>	19
3.1. Montagem Experimental	19
3.2. Condições de Operação	20
3.3. Sistema de Aquisição de Dados	21
3.4. Procedimento Experimental	28
<b>4. Resultados e Discussão</b>	30
4.1 Transientes de Pressão em Tubulações Transportando Misturas Gás-Líquido	30
4.2. Detecção de Vazamentos na Presença de Misturas Gás-Líquido	34
<b>5. Conclusões e Sugestões</b>	46

5.1. Conclusões	46
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	47
<b>Referências Bibliográficas</b>	48
<b>Apêndice A. Escoamento Gás-Líquido</b>	50
<b>Apêndice B. Curva de Calibração da Placa de Orifício e Correção da Vazão de Ar</b>	54
<b>Apêndice C. Listagem dos Programas de Aquisição de Dados</b>	57
<b>Apêndice D. Injeção de Bolhas Isoladas de Ar</b>	76
<b>Apêndice E. Transientes de Pressão Causados por Vazamento na Presença de uma Única Bolha</b>	83
<b>Apêndice F. Transientes de Pressão Causados por Vazamento em Tubulação Transportando Líquido</b>	94
<b>Apêndice G. Transientes de Pressão Causados por Vazamento na Presença de Escoamento Contínuo Ar-Água</b>	101

## LISTA DE FIGURAS

2.1. Transientes de pressão (Naves, 1991).	10
2.2. Transientes de pressão em medidor de orifício (Cruz, Buiatti e Pereira, 1996)	11
2.3. Transientes de pressão ao longo de uma tubulação de 433 m (Buiatti, 1995)	11
2.4. Esquema de uma tubulação com vazamento entre os transdutores T2 e T3	12
2.5. Velocidade de propagação da onda de pressão (Buiatti, 1995)	13
2.6. Velocidade de propagação da onda de pressão (Silva, 1996)	13
2.7. Influência do número de Reynolds sobre a velocidade da onda de pressão	15
2.8. Influência da magnitude do vazamento sobre a velocidade da onda de pressão	15
2.9. Perfis de transientes de pressão obtidos por Cariati (1999)	17
3.1. Esquema da montagem experimental	19
4.1. Transientes de pressão. Injeção de bolhas isoladas de ar. (Re = 10000; tempo de injeção = 10 s).	31
4.2. Transientes de pressão. Injeção de bolhas isoladas de ar. (Re = 4000; tempo de injeção = 10 s).	32
4.3. Transientes de pressão. Injeção de bolhas isoladas de ar. (Re = 10000; tempo de injeção = 20 s).	33
4.4. Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolhas isoladas (posição do vazamento = 250 m).	36
4.5. Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolhas isoladas (posição do vazamento = 750m).	37
4.6. Comparação entre os transientes de pressão para líquido e para mistura ar-água (posição do vazamento = 750 m).	39

4.7. Transientes de pressão gerados por vazamento, durante escoamento contínuo ar- água (vazamento a 250 m).	42
4.8. Transientes de pressão gerados por vazamento, durante escoamento contínuo ar- água (vazamento a 750 m).	43
4.9. Transientes de pressão gerados por vazamento, durante escoamento contínuo ar- água (vazamento a 750 m; $Re = 10.000$ ).	44

## LISTA DE TABELAS

2.1. Precisão na localização do vazamento (tubulação: 433 m) (Buiatti, 1995).	14
2.2. Precisão na localização do vazamento (tubulação: 1.248 m) (Silva, Buiatti, Cruz e Pereira, 1996)	14
3.1. Posição dos transdutores relativa a posição do vazamento	20
3.2. Condições de operação	21
3.3. Valores de pressão na linha de ar para cada vazão de operação	22
3.4. Pressão máxima especificada para cada transdutor	23
4.1. Determinação do regime de escoamento para injeção de uma única bolha de ar.	34
4.2. Determinação do regime de escoamento para escoamento contínuo ar-água.	41
4.3. Velocidade de propagação da onda de pressão ( $v$ ) (vazamento a 250 m).	45

## NOMENCLATURA

$G_G$  = velocidade mássica do gás

$G_L$  = velocidade mássica do líquido

$L_2$  = distância entre transdutores (equação 2.2)

$Q_{ar}$  = vazão volumétrica de ar (l/min)

$Q_{água}$  = vazão volumétrica da água (l/min)

$P$  = pressão na tubulação (psig)

$Re$  = número de Reynolds em relação a fase líquida

$SA$  = sinal analógico (equação 3.1)

$SD$  = sinal digital (equação 3.1)

$t_1$  = tempo de detecção no transdutor 1

$t_2$  = tempo de detecção no transdutor 2

$t_3$  = tempo de detecção no transdutor 3

$v$  = velocidade de propagação da onda de pressão (m/s)

$vz$  = porcentagem de vazamento

$x_k$  = sequência de tempo (equação 2.1)

$Y$  = distância entre o vazamento e o transdutor mais próximo (m)

# 1. INTRODUÇÃO

Oleodutos, gasodutos e polidutos são sistemas complexos de tubulações construídos para realizar o transporte de diferentes tipos de produtos entre refinarias, campos de petróleo e bases de distribuição. Os oleodutos tornaram-se o meio de transporte preferencial tanto para atender ao abastecimento das refinarias como para suprir a necessidade dos grandes centros de consumo de derivados.

A primeira linha que se tem registro no Brasil foi construída na Bahia, com diâmetro de 2" e 1 km de extensão, ligando a "Refinaria Experimental de Aratu" ao Porto de Santa Luzia.

No Brasil, a década de 80 caracterizou-se pela construção de um grande número de gasodutos, devido ao aumento da utilização do gás natural nas indústrias. Nos anos 90, o avanço tecnológico viabilizou uma melhor qualidade no projeto, construção e supervisão de oleodutos e gasodutos, terrestres e marítimos. No projeto de dutos mais modernos foram utilizados, ainda com o uso da informática, outros equipamentos e sistemas avançados, permitindo levantamentos e mapeamentos com a ajuda de satélites, como o GPS (Global Positioning System) e o GIS (Geographic Information System), além do emprego do CAD (Computer Aided Design) na elaboração dos desenhos.

Nesta década foram construídos, e já se encontram em operação, modernos polidutos a partir das Refinarias da Bahia, do Paraná e de São Paulo, em direção aos grandes centros consumidores. Atualmente encontram-se em operação três gasodutos de grande importância:

- Gasoduto Brasil/Bolívia, trecho Santa Cruz de la Sierra/São Paulo, com diâmetro de 32" e 3.150 km.
- Gasoduto Guamaré (RN)/Pecém (CE), com diâmetros de 12" e 10" e 377 km.
- Gasoduto Pilar (AL)/Cabo (PE) com diâmetro de 10" e uma extensão de 194 km.

Dentre as vantagens de se transportar gases e líquidos por meio de tubulações estão:

- a flexibilidade em termos de capacidade e de produtos que podem ser transportados;
- o baixo custo, quando comparado com o custo do transporte rodoviário, ferroviário e marítimo;
- a eficiência em termos de energia das tubulações.

Por essas razões, muitas e grandes empresas adotam o transporte de produtos através de tubulações, que atualmente já ultrapassam 11.700 km de extensão por todo o país (ref. [www.petrobras.com.br](http://www.petrobras.com.br)).

Se por um lado muito já se avançou em termos de projeto e construção de dutos, muito ainda falta na área de sistema de detecção, localização e controle de vazamentos.

Por negligenciar estes aspectos, muitos acidentes graves com seríssimos danos à população e ao meio ambiente têm ocorrido. Somente no ano de 2.000, foram dois grandes acidentes com vazamento de óleo combustível (um na Refinaria de Duque de Caxias que espalhou cerca de 1 milhão de litros de óleo na Baía de Gunabara (RJ) e outro na Refinaria Getúlio Vargas (PR) espalhando 4 milhões de litros de óleo).

Esses acidentes tiveram tamanha extensão devido a falhas nos sistemas de supervisão e controle da tubulação.

## **1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO**

Neste trabalho uma técnica de detecção de vazamento baseada na análise de transientes de pressão por computador "on-line" é aplicada a uma tubulação transportando misturas gás-líquido. Testes experimentais foram realizados numa tubulação de 1.248 m de comprimento onde medidas de pressão e a simulação experimental de vazamentos são feitas através de microcomputador contendo placa conversora ADA.

O objetivo do trabalho foi o de realizar um estudo detalhado quanto às características dos transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de ar, e quanto à sensibilidade do

sistema de detecção de vazamentos em tubulações.

O presente estudo foi realizado para diferentes condições de operação da tubulação:- número de Reynolds do líquido entre 4.000 e 10.000; porcentagem de vazamento de 10 a 50%; posição do vazamento a 250 m e 750 m da entrada da tubulação.

Os perfis de transientes de pressão obtidos para misturas gás-líquido são comparados com os perfis de pressão obtidos apenas com líquido.

## 2. DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS EM TUBULAÇÕES. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Redes de tubulações são sistemas complexos de dutos utilizados no transporte de produtos químicos por longas distâncias. São sistemas flexíveis quanto a capacidade operacional e bastante eficientes.

Problemas de corrosão, fadiga, falhas de solda ou mesmo mudanças repentinas na pressão podem afetar a integridade da tubulação e provocar vazamentos. Qualquer que seja o tamanho da ruptura, o vazamento de um produto químico representa não só perda de produto como pode também ocasionar graves prejuízos ambientais.

São vários os tipos de vazamentos que podem ocorrer em sistemas de tubulações. Vazamentos devido a rupturas são menos comuns mas muito perigosos. São fáceis de detectar desde que acompanhados por variações na perda de carga ou volume. Técnicas de detecção de vazamentos tem sido estudadas por diversos autores com enfoques diferentes. Método acústico, autoregressivo, por redes neurais artificiais ou por transientes de pressão são alguns exemplos de técnicas estudadas para detecção e localização de vazamentos.

Black (1992) apresenta uma revisão das diversas técnicas de detecção de vazamentos em tubulações. Estas foram agrupadas em seis grandes grupos:

-- Método de observação: a forma mais simples de detectar vazamentos é a checagem visual da linha.

-- Balanço de massa: as taxas de fluxo na entrada e na saída da tubulação são comparadas continuamente em tempo real e qualquer diferença significa um vazamento. Porém, podem ocorrer falsas deduções devido a variações nos parâmetros do fluido (temperatura, densidade, viscosidade) ou pelo arranjo da tubulação.

-- Pigging: são equipamentos de inspeção impulsionados pelo próprio fluido para dentro da tubulação e que medem a dimensão do vazamento. São empregados também na inspeção e

limpeza de dutos também para mapeamento de corrosão.

-- Métodos por sensores: incluem os métodos que detectam vazamentos através do sinal acústico detectado por terminais dispostos ao longo da tubulação.

-- Modelagem matemática: utiliza a simulação digital da operação da tubulação juntamente com dados medidos na própria tubulação. Os resultados da simulação são comparados com valores reais de operação.

-- Análise de medidas de pressão: são analisadas e comparadas com valores de pressão na tubulação medidos em tempo real.

Jönsson e Larson (1992) propuseram uma técnica de detecção de vazamentos baseada na análise espectral de medidas de pressão. Para tanto, estudaram as características de propagação de ondas de pressão em uma tubulação de 5.040 m, quando ocorre parada da bomba, com e sem ocorrência de vazamento. A tubulação experimental contava com um reservatório na extremidade a montante e uma válvula na extremidade a jusante na tubulação. Foram simulados vazamentos de até 7 % da vazão nominal de líquido, a 1450 m de distância do reservatório. Medidas de pressão foram feitas após a parada de bomba, de modo a quantificar o efeito do vazamento sobre as variações de pressão.

Aplicando-se análise espectral ao perfil de pressão em função do tempo, isto é mudando-se o sinal de domínio de tempo para domínio de frequência, foi possível detectar a ocorrência de vazamentos através da identificação de ondas refletidas do vazamento. A existência de um ponto de reflexão total (válvula) garantiu a formação de ondas estacionárias entre a válvula e o vazamento, e conseqüentemente, o aparecimento de espectros de frequência associados a tubulação.

Wang et al (1993) propuseram um método de detecção baseado em modelo autoregressivo. Por este modelo são necessários quatro medidores de pressão  $p(0)$ ,  $p(\Delta Z)$ ,  $p(L-\Delta Z)$  e  $p(L)$  nas posições  $0$ ,  $\Delta Z$ ,  $L-\Delta Z$  e  $L$ . Uma perturbação no fluxo produzirá uma sequência  $X_k$  aleatória. A sequência de tempo é definida por:

$$x_k = \frac{p_k(0) - p_k(\Delta Z)}{p_k(\Delta Z) - p_k(L)} - \frac{p_k(L - \Delta Z) - p_k(L)}{p_k(0) - p_k(L - \Delta Z)} \quad (2.1)$$

O valor  $x_k$  independe da vazão do líquido. Para vazão constante e nenhum vazamento,  $x_k$  é igual a zero. Uma perturbação no fluxo produzirá uma sequência de tempo  $x_k$  aleatória. Essa sequência de tempo sob fluxo normal e vazamento é inserida nos modelos autoregressivos e o vazamento é detectado pela análise dos parâmetros e das variáveis residuais. A detecção é feita com base no índice de desempenho ( $Pf$ ), gerado pelo modelo. A ocorrência do vazamento resulta em valores de  $Pf > 0$ ; quando não há vazamento  $Pf = 0$ .

Uma outra proposta matemática é feita por Rougier e Goldstein (2001). O trabalho consiste na análise determinística do comportamento transiente do fluido em tubulações. São introduzidos parâmetros de incerteza no modelo determinístico físico e então o modelo é transformado em um modelo linear dinâmico. O modelo é analisado segundo o modelo matemático de Bayes em tempo real. O resultado é um vetor que descreve a tubulação em um dado instante. Este vetor consiste de pressões e vazões medidas ao longo da tubulação. A análise determinística sobre o vetor no intervalo de tempo  $t - 1$  pode ser utilizada para determinar o vetor no instante de tempo  $t$  (sob condições de contorno apropriadas). Esta propagação da incerteza é feita de acordo com o modelo físico de escoamento do fluido na tubulação. A aplicação do modelo de tubulações em detecção de vazamentos usa dados de contorno para o modelo determinístico e dados de referência. Uma diferença entre os dados preditos e os dados de referência indica a ocorrência de vazamento. Um dos problemas do modelo é determinar até quando a discrepância de valores é tolerável, o que sugere inúmeras variações.

As técnicas mais recentes também utilizam redes neurais artificiais para a detecção de vazamentos. Belsito et al (1998) apresentam um trabalho onde os dados para treinamento das redes são gerados através de simulação do escoamento em tubulações com e sem vazamento. O sistema de detecção de vazamentos baseado em redes neurais se mostra capaz de detectar e localizar vazamentos menores que 1% do valor nominal da vazão de fluxo a um custo aceitável.

O primeiro passo para desenvolver o sistema de detecção é estabelecer o modelo que descreve o escoamento. O modelo numérico desenvolvido por Belsito foi baseado em equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia, as quais foram resolvidas utilizando diferenças finitas. A rede foi treinada por simulação variando as condições de operação e gerando dados que constituiriam padrões de operação.

Falk (1998) propõe um modelo computacional chamado MutiPress que permite prever rápidos transientes de pressão em tubulações. O modelo baseia-se em métodos numéricos avançados e no conhecimento sobre propagação do pulso de pressão em escoamento gás-líquido. As principais equações do modelo são a lei de conservação da massa e da quantidade de movimento, resolvidas utilizando método numérico implícito para resolver o sistema de equações não-lineares. São considerados que o fluido se comporta como uma mistura homogênea, desprezando a interação entre as fases, e que o processo de propagação da onda de pressão é isotérmico, para o caso de baixas frequências de onda com pequenas amplitudes. O modelo mostra que os pulsos de pressão para escoamento horizontal multifásico comporta-se similarmente a um escoamento com um única fase.

Os resultados obtidos pelo programa são valores de pressão, velocidade de escoamento, fração de vazios e velocidade do som como função do tempo e da posição na tubulação.

Um dos casos abordados por Falk foi uma tubulação horizontal transportando um fluido multifásico de uma estação submarina para uma plataforma. Uma válvula é rapidamente fechada na plataforma. Inicialmente, a pressão aumenta rapidamente pelo lado a montante da válvula devido a uma mudança no momentum quando a válvula é fechada. A pressão continua a crescer até que seja refletida pela extremidade oposta depois de 25 segundos. Este comportamento do pulso de pressão em uma tubulação horizontal é muito similar ao que acontece com escoamento de um líquido puro. Isto ocorre porque a densidade, fração de vazios e velocidade de propagação são relativamente constantes ao longo da tubulação.

O modelo computacional foi comparado a resultados experimentais realizados em trabalho subsequente e concluiu-se que o modelo obteve uma boa descrição do fenômeno da propagação.

Falk, Hervieu e Gudmundsson (1999) utilizaram uma tubulação de 30 metros de comprimento e 60 mm de diâmetro, transportando uma mistura ar-água. A partir da injeção de ar comprimido na mistura ar-água, estudou-se as características das ondas de pressão e de fração de gás retido propagando-se ao longo da tubulação. Uma das características analisadas foi a velocidade de propagação dessas ondas. Foram realizados experimentos para diferentes regimes de escoamento (*'bubbly'*, *'plug'*, *'slug'*, estratificado, anular, em forma de ondas) sob diferentes pressões. Para escoamentos *'bubbly'*, *'slug'* e *'plug'* haviam pulsos de pressão que se propagavam como escoamento homogêneo. A rápida perturbação provocada pelo gás criava *'plugs'* nos quais a onda de pressão poderia propagar. Os experimentos mostraram que a velocidade do pulso de pressão aumenta logarithmicamente com a frequência. No escoamento *'bubbly'* poderiam ocorrer componentes de pressão acima de 100 Hz, enquanto para o escoamento *'plug'* e *'slug'* esse limite era menor devido a uma elevada não homogeneidade do escoamento.

## **2.1. DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE TRANSIENTES DE PRESSÃO**

Quando ocorre um vazamento, uma onda de pressão se propaga ao longo da tubulação, a montante e a jusante da posição do vazamento (*transiente hidráulico*). A pressão ao longo da tubulação passa por uma brusca redução, seguida de uma recuperação parcial, cuja intensidade (da redução e da recuperação) depende da magnitude do vazamento.

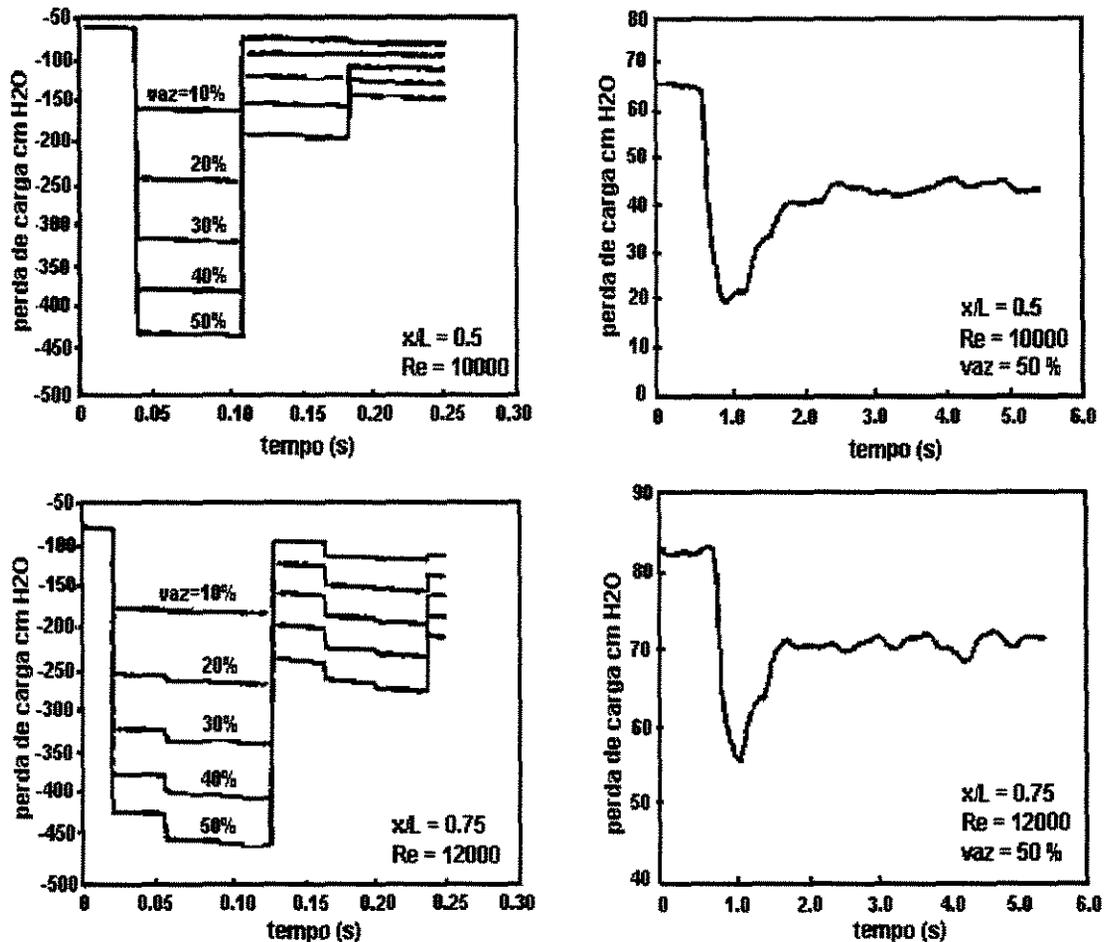
O conhecimento sobre as características de propagação da onda de pressão é muito útil para a indústria. A detecção e análise da onda de pressão gerada por um vazamento tem sido usada para detectar e localizar vazamentos. Se formos capazes de prever a amplitude de tais ondas, isto pode ajudar a detectar vazamentos. Transientes de pressão também podem indicar mudanças na taxa de fluxo ou na pressão na entrada e na saída da tubulação.

A técnica de detecção de vazamentos desenvolvida no Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos (DESQ/FEQ/UNICAMP) está baseada na detecção e análise de transientes hidráulicos causados por vazamentos. Perfis de transientes de pressão são medidos e analisados através de técnicas computacionais “on-line”, para diferentes condições de operação da tubulação.

Naves (1991) desenvolveu uma técnica para a detecção de vazamentos baseada na análise de transientes de perda de carga numa tubulação de PVC, de 19 mm de diâmetro e 20 m de comprimento. A técnica foi testada teoricamente por simulação e experimentalmente para diversas condições de operação da tubulação (vazão de líquido, vazão e posição do vazamento) utilizando um sistema de aquisição de dados em tempo real.

O sistema de detecção de vazamentos utilizou um transdutor de pressão diferencial (tipo célula capacitiva) para a determinação de transientes de perda de carga, entre a entrada e a saída da tubulação, gerados por vazamentos. Na montagem experimental o transdutor de pressão e uma válvula solenóide, que simula o vazamento, foram conectados a um microcomputador PC equipado com uma placa conversora analógico-digital-analógico. Os resultados mostraram o aumento da variação da perda de carga com o aumento da vazão do líquido e do vazamento. Vazamentos da ordem de 0,5 % da vazão nominal do escoamento foram detectados. Os perfis de perda de carga na tubulação obtidos por simulação e através da aquisição de dados são mostrados na Figura 2.1, para diferentes condições de operação: número de Reynolds,  $Re = 10.000$  e  $12.000$ ; magnitude de vazamento,  $vaz = 10$  a  $50\%$ , e posição de vazamento,  $(x/L) = 0,5$  e  $0,75$ , onde  $(x/L)$  é razão entre a distância da posição do vazamento até a entrada da tubulação ( $x$ ) e o comprimento da tubulação ( $L$ ).

Posteriormente (Cruz, Buiatti e Pereira, 1996) basearam a técnica de detecção de vazamentos na análise de transientes de perda de carga em um medidor de orifício. Do mesmo modo que Naves (1991), a variação da perda de carga permitiu detectar vazamentos de magnitudes diferentes, porém, não foi possível determinar sua localização. A Figura 2.2 apresenta os transientes de perda de carga em um medidor de orifício.



(a) simulação teórica

(b) aquisição de dados

Figura 2.1: Transientes de pressão (Naves, 1991).

Em 1995, Buiatti desenvolveu e testou uma técnica para localização de vazamentos em uma tubulação de PVC de 19 mm de diâmetro e 433 m de comprimento. Foram utilizados quatro transdutores de pressão (do tipo piezoelétrico) instalados em posições diferentes em relação a entrada da tubulação (7 m, 167 m, 266 m e 427 m). Vazamentos foram provocados através de válvulas solenóides localizadas a 84 m, 173 m e 260 m da entrada da tubulação.

Os transdutores e as válvulas foram conectados a um microcomputador equipado com

placa conversora ADA. Foram realizados experimentos para escoamento de líquido em regime turbulento e diferentes porcentagens de vazamento (de 5 a 80 % da vazão nominal do líquido). A Figura 2.3 apresenta o perfil de pressão na tubulação com quatro transdutores de pressão.

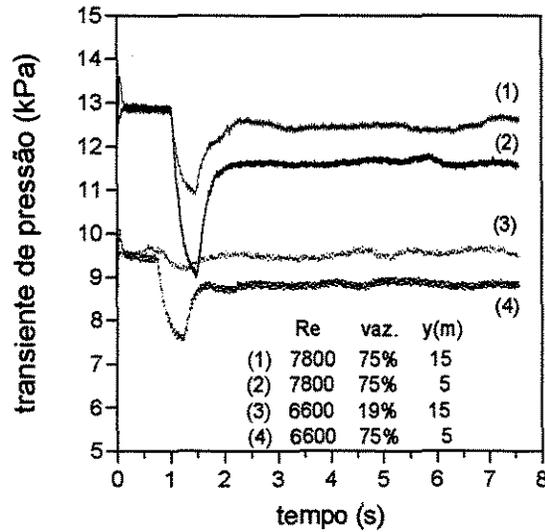


Figura 2.2: Transientes de pressão em medidor de orifício (Cruz, Buiatti e Pereira, 1996).

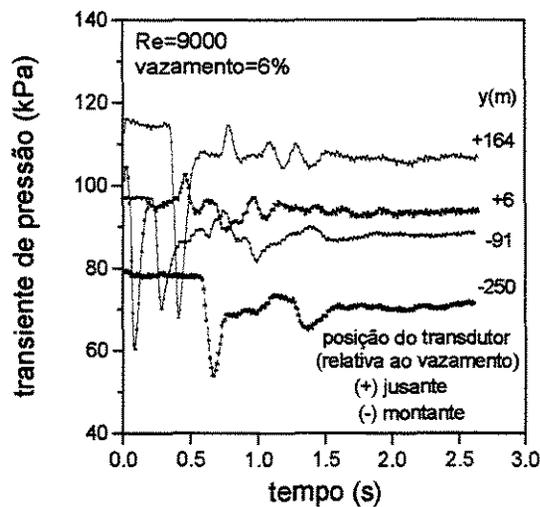


Figura 2.3: Tansientes de pressão ao longo de uma tubulação de 433 m (Buiatti, 1995).

A partir dos tempos de detecção em cada transdutor e de medidas da velocidade de propagação da onda de pressão desenvolveu-se um programa para a localização da posição do vazamento com base na equação (2.2). Para o caso de uma tubulação contendo pelo menos 3 transdutores (Figura 2.4), a localização do vazamento pode ser expressa em termos da distância entre o vazamento e o transdutor mais próximo ( $Y$ ).

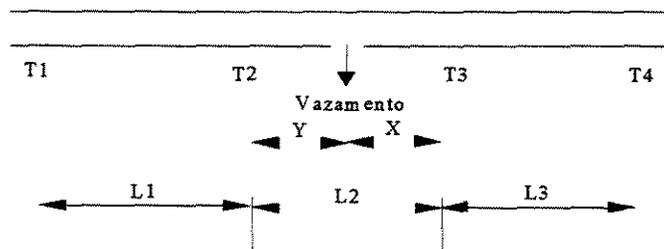


Figura 2.4: Esquema de uma tubulação com vazamento entre os transdutores T2 e T3.

$$Y = \frac{[L_2 + v \cdot (t_2 - t_3)]}{2} \quad (2.2)$$

onde  $L_2$  é a distância entre os transdutores 2 e 3;  $t_2$  e  $t_3$  são os tempos de detecção nos transdutores T2 e T3, respectivamente e  $v$  é a velocidade de propagação da onda de pressão. Valores medidos da velocidade da onda de pressão estiveram entre 490 e 530 m/s (Figura 2.5).

Silva, Buiatti, Cruz e Pereira (1996) estenderam o estudo de detecção e localização para escoamento em regime laminar ( $Re < 3000$ ) numa tubulação de PVC, de 19 mm de diâmetro e 1248 m de comprimento. Os transdutores de pressão foram instalados a 494 m, 744 m, 994 m e 1244 m da entrada da tubulação e as válvulas solenóides para a simulação de vazamentos foram instaladas a 250 m e 750 m da entrada da tubulação.

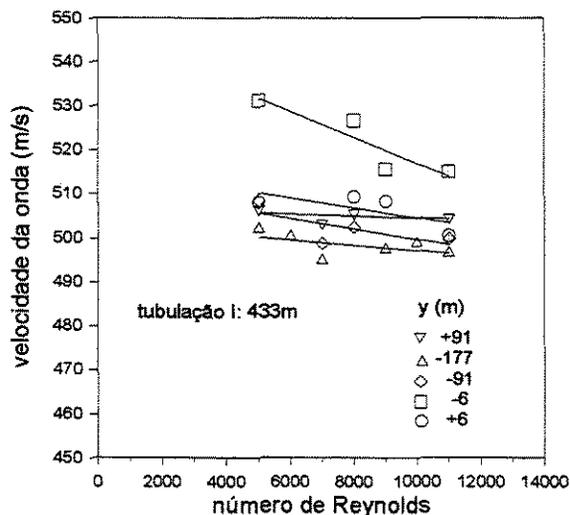


Figura 2.5 : Velocidade de propagação da onda de pressão (Buiatti, 1995).

Os valores medidos da velocidade da onda ficaram na faixa entre 470 e 485 m/s e a localização do vazamento foi determinada com erro inferior a 5 m da posição real.

A Figura 2.6 apresenta os valores de velocidade de propagação obtidos na tubulação de 1248 m. As Tabelas 2.1 e 2.2 mostram os erros na localização dos vazamentos.

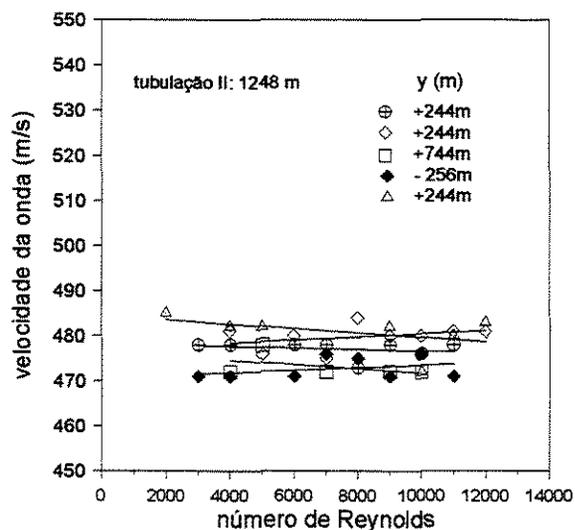


Figura 2.6: Velocidade de propagação da onda de pressão (Silva, 1996).

Tabela 2.1. Precisão na localização do vazamento (tubulação: 433 m) (Buiatti, 1995).

Re	y ± erro (m)
5000	176 ± 8,57
7000	176 ± 8,36
8000	176 ± 7,74
9000	176 ± 6,38
11000	176 ± 9,08
5000	5 ± 2,13
7000	5 ± 2,11
8000	5 ± 2,96
9000	5 ± 2,80
11000	5 ± 3,03
5000	91 ± 8,74
7000	91 ± 8,98
8000	91 ± 5,91
9000	91 ± 7,51
11000	91 ± 9,96

Tabela 2.2: Precisão na localização do vazamento (tubulação: 1.248 m) (Silva, Buiatti, Cruz e Pereira, 1996).

Re	y ± erro (m)
1000	243 ± 2,21
2000	243 ± 4,75
5000	243 ± 7,97
7000	243 ± 2,63
8000	243 ± 5,50
12000	243 ± 4,80
1000	243 ± 4,46
2000	243 ± 4,97
5000	243 ± 7,94
7000	243 ± 3,79
8000	243 ± 3,01
12000	243 ± 0,92

Cariati (1999) testou a técnica de detecção de vazamentos na tubulação de 1248 m operando com líquido e com misturas gás-líquido. Na operação da tubulação com líquido foi possível detectar vazamentos da ordem de 10 % para escoamento em regime laminar e 2 % em regime turbulento.

A velocidade de propagação da onda, verificada para as diversas condições de operação apresentou valores próximos do valor predito teoricamente de 552 m/s, segundo Wylie e

Streeter (1993). Verificou-se também que a velocidade de propagação independe do número de Reynolds, da magnitude e da posição do vazamento.

As Figura 2.7 e Figura 2.8 mostram a influência do número de Reynolds e da magnitude do vazamento, respectivamente sobre velocidade de propagação da onda segundo Cariatí (1999).

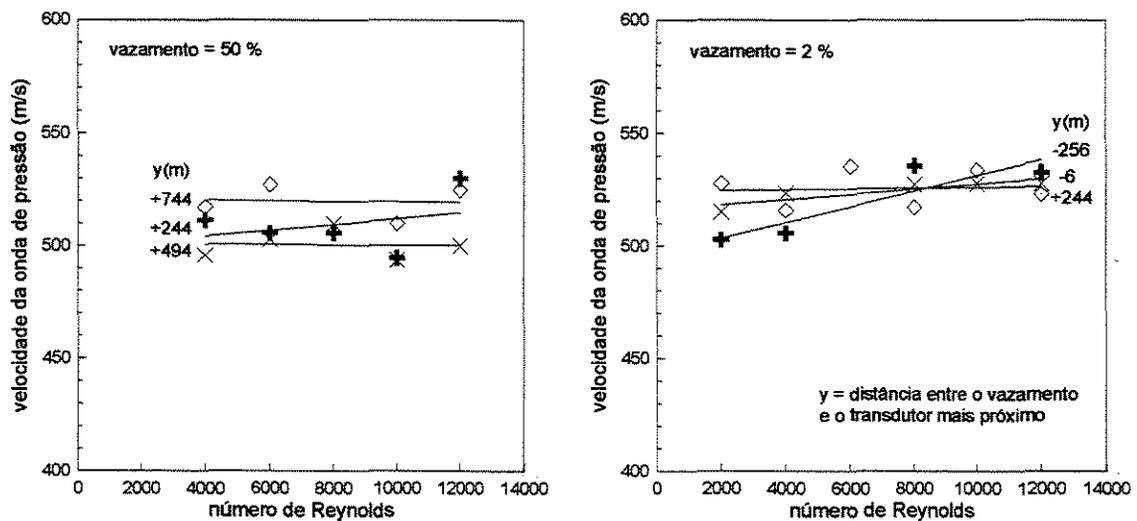


Figura 2.7 : Influência do número de Reynolds sobre a velocidade da onda de pressão

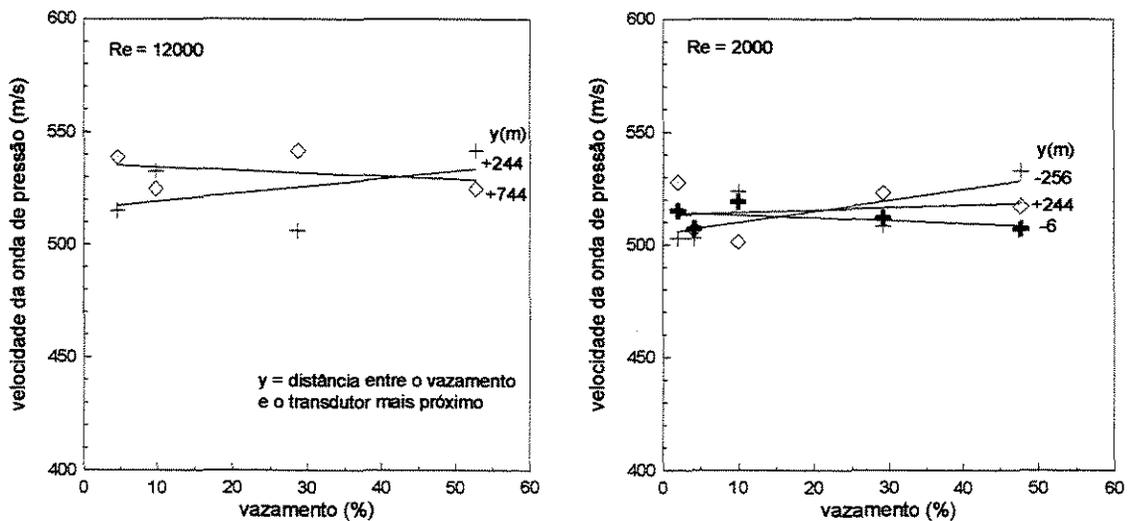


Figura 2.8: Influência da magnitude do vazamento sobre a velocidade da onda de pressão

Para o caso da tubulação transportando misturas gás-líquido, Cariati (1999) determinou as características dos pulsos de pressão gerados pela:

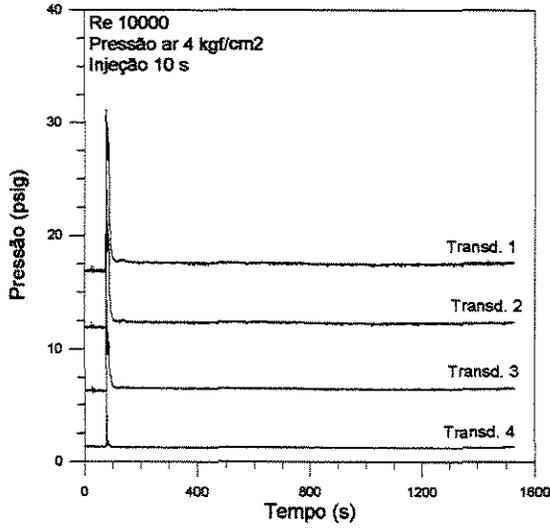
- (a) injeção de uma bolha de ar na tubulação (Figura 2.9(a));
- (b) injeção de múltiplas bolhas na tubulação (Figura 2.9(b));
- (c) ocorrência de vazamento, na presença de uma bolha de ar fluindo na tubulação (Figura 2.9(c));
- (d) ocorrência de vazamento durante escoamento contínuo de uma mistura ar-água (Figura 2.9(d)).

O estudo de Cariati (1999) sobre a ocorrência do vazamento na presença de uma bolha de ar (Figura 2.9(c)) foi realizado somente para altas vazões de ar. Em casos de grandes quantidades de ar na tubulação não se observou a recuperação da pressão após o vazamento.

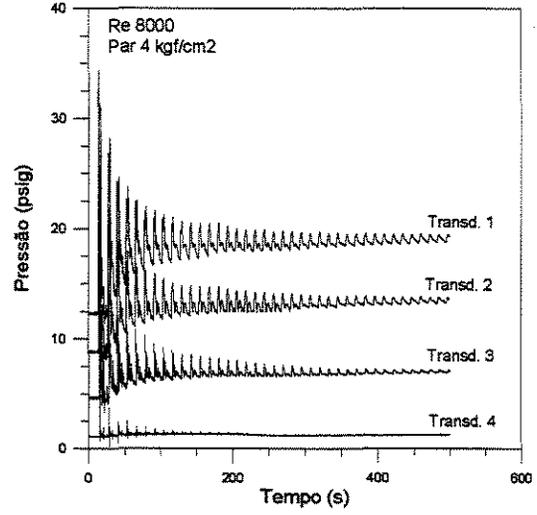
Os cálculos da velocidade de propagação da onda apresentou valores entre 280 e 470 m/s, para o caso da Figura 2.9(c), e 40 e 75 m/s para o caso da Figura 2.9(d). Esta redução na velocidade de propagação encontrado por Cariati (1999) que chega a ser até 9 vezes menor que o valor teórico, isto está associado a presença do ar na tubulação que absorve parte do impacto da onda de choque causada pelo vazamento.

Uma das áreas que vem crescendo constantemente e requer uma considerável atenção, é a aplicação de técnicas de detecção para escoamento multifásico.

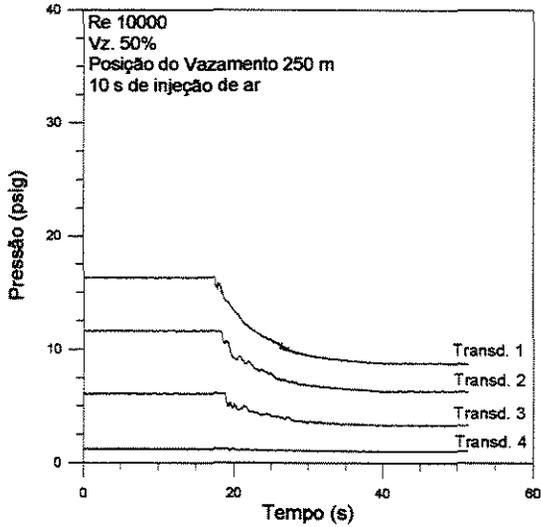
Para escoamento de uma única fase existem muitas teorias a respeito dos transientes de pressão, mas para escoamento multifásico o problema é mais complexo. Os escoamentos bifásicos estão propensos a vários tipos de instabilidades, como por exemplo quando uma pequena mudança na taxa de fluxo pode fazer uma grande diferença na vazão e, conseqüentemente, na queda de pressão ou na fração de vazios.



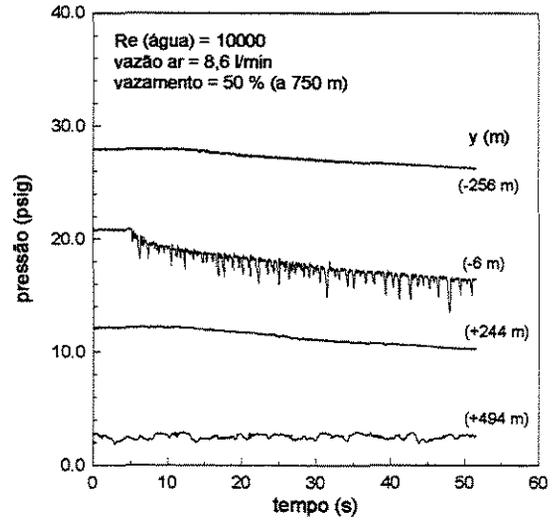
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.9 : Perfis de transientes de pressão obtidos por Cariati (1999).

No processo multifásico ocorre a interação entre as fases. Uma aproximação homogênea considera que o gás e o líquido movem-se com a mesma velocidade. O modelo homogêneo prevê ondas de pressão que se propagam no gás e na mistura líquida como um único fluido.

Neste trabalho o estudo da técnica de detecção de vazamento em tubulações operando com misturas gás-líquido foi realizado em detalhe, na medida em que alguns resultados obtidos por Cariati (1999) não foram conclusivos quanto à sensibilidade da técnica em detectar vazamentos de pequena magnitude na tubulação.

### 3. EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

#### 3.1. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A montagem experimental utilizada no presente trabalho se constitui de uma tubulação de 1.248 m de comprimento, construída a partir de tubos de PVC de 19 mm de diâmetro e 18 m de comprimento, conectados por cotovelos de 90°. A Figura 3.1 mostra um esquema da montagem.

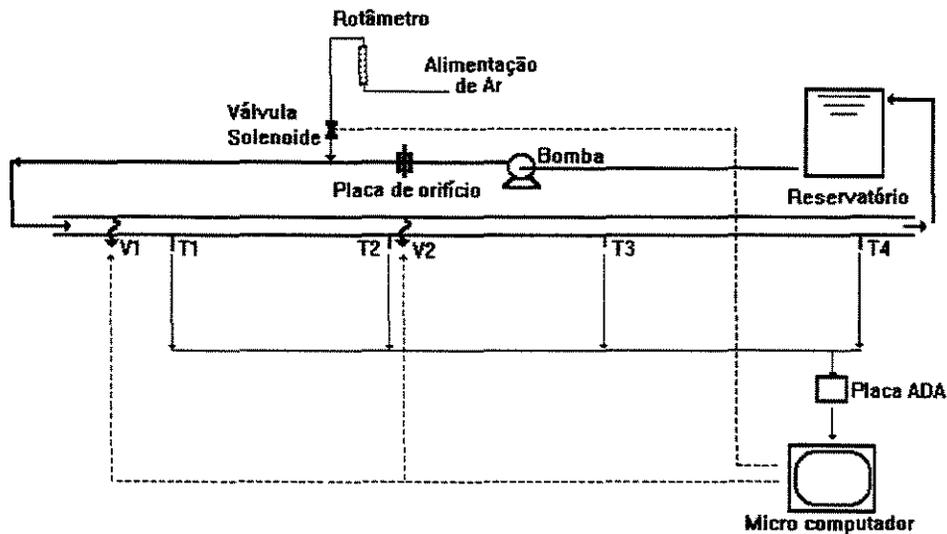


Figura 3.1: Esquema da montagem experimental.

(T1, T2, T3, T4 = transdutores de pressão; V1, V2 = posições dos vazamentos).

Ao longo da tubulação estão instalados quatro transdutores de pressão: a 494 m, 744 m, 994 m e 1244 m da entrada da tubulação. Os transdutores estão acoplados a um microcomputador PC através de uma placa conversora ADA (Analogico/ Digital/ Analógico).

A simulação de vazamentos é feita através de dois conjuntos de válvulas solenóide / gaveta, localizados a 250 m e 750 m da entrada da tubulação. A abertura e fechamento da válvula solenóide é realizada através da placa ADA, enquanto que a abertura da válvula gaveta controla a magnitude do vazamento. A Tabela 3.1 indica as posições dos diversos transdutores em relação a posição do vazamento.

Tabela 3.1 :Posição dos transdutores relativa a posição do vazamento.

<i>Transdutor (posição relativa a entrada da tubulação)</i>	<i>Posição do transdutor relativa ao vazamento*</i>	
	<i>vazamento a 250 m</i>	<i>vazamento a 750 m</i>
T1 (494 m)	(+) 244 m	(-) 256 m
T2 (744 m)	(+) 494 m	(-) 6 m
T3 (994 m)	(+) 744 m	(+) 244 m
T4 (1244 m)	(+) 994 m	(+) 494 m
* (+) a jusante; (-) a montante, do vazamento		

### 3.2. CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Na montagem experimental água circula em circuito fechado a partir de um reservatório de 75 litros, sendo introduzida na tubulação através de uma bomba centrífuga de 3 Cv. A vazão de água é medida através de uma placa de orifício instalada na entrada da tubulação. A curva de calibração da placa de orifício encontra-se no Apêndice B.

A vazão de vazamento, cuja magnitude é controlada pela abertura da válvula gaveta, é determinada no início de cada experimento, utilizado-se um cronômetro e uma proveta. A magnitude do vazamento é expressa em termos de porcentagem da vazão nominal de líquido na tubulação (vazão de líquido antes da ocorrência de vazamento).

O ar injetado na tubulação provem de uma linha de ar comprimido, sendo que sua vazão e pressão são controladas por um rotâmetro e um manômetro de mercúrio. A vazão de ar foi

corrigida em relação à pressão e temperatura de operação, conforme descrito no Apêndice B. A alimentação de ar para a tubulação é controlada pela abertura/ fechamento de uma válvula solenóide, também conectada ao microcomputador através da placa ADA.

O trabalho experimental constituiu-se na detecção e análise de transientes de pressão gerados pela injeção de uma única bolha de ar, com e sem a ocorrência de vazamento na tubulação. E na detecção e análise de transientes gerados no escoamento contínuo gás-líquido (ar-água). Os experimentos foram realizados sob diversas condições de operação da tubulação conforme descrito na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 : Condições de operação.

<i>Número de Reynolds do líquido</i>	10.000, 6.000 e 4.000
<i>Porcentagem de vazamento</i>	10, 30 e 50 %
<i>Vazão de ar</i>	de 1,6 a 61,4 l/min
<i>Posição do vazamento</i>	a 250 m e a 750 m da entrada da tubulação

A vazão de ar injetada na tubulação é determinada pela quantidade de ar introduzida na tubulação a um dado valor de Re para uma determinada pressão da linha de ar. Assim, a Tabela 3.3 descreve as diferentes combinações de número de Reynolds, pressão na linha de ar e vazão de ar na tubulação.

### 3.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados para obtenção e armazenagem dos dados via computador on-line é constituído de equipamentos e programas de aquisição de dados. Dentre os equipamentos estão: transdutores, multiplexador, conversor ADA e o microcomputador. Os programas gerenciam o funcionamento desses equipamentos de forma a fornecer os dados organizados de forma gráfica e de fácil entendimento.

Tabela 3.3: Valores de pressão na linha de ar para cada vazão de operação.

$Re$	$Q_{ar}$ (l/min)	$P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Re$	$Q_{ar}$ (l/min)	$P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
12.000	7,7	3,0	6.000	6,4	1,5
12.000	18,8	3,5	6.000	14,0	2,0
12.000	32,7	4,0	6.000	17,5	2,0
12.000	50,3	4,5	6.000	26,9	2,5
10.000	2,5	2,0	4.000	5,8	2,0
10.000	9,8	2,5	4.000	14,0	2,0
10.000	14,0	3,0	4.000	15,2	2,5
10.000	17,7	3,0	4.000	21,3	2,5
10.000	40,0	4,0	4.000	45,5	3,0
10.000	42,5	4,0	4.000	52,4	3,0
10.000	57,7	4,5	-	-	-
10.000	61,4	4,5	-	-	-

### Transdutores de pressão

Os transdutores de pressão utilizados na montagem experimental são do tipo piezoelétrico. O material sólido que constitui o transdutor se deforma e gera uma carga elétrica produzindo uma diferença de potencial entre os eletrodos, sendo esta carga proporcional a deformação do material. A diferença de potencial gerada é amplificada, gerando o sinal de saída do transdutor. Os transdutores utilizados são da marca Cole-Parmer. Cada transdutor permite uma carga máxima de pressão para a qual foi projetado, conforme mostra a Tabela 4. O sinal elétrico emitido pelos transdutores é um sinal de tensão, na faixa de 1 a 5 V. Todos os transdutores enviam contínua e simultaneamente as leituras de pressão na forma analógica. Um microcomputador só reconhece dados de natureza digital, portanto antes dos sinais chegarem ao computador é necessário discretizar e convertê-los.

Tabela 3.4 : Pressão máxima especificada para cada transdutor.

<i>Transdutor (posição em relação a entrada da tubulação)</i>	<i>Pressão máxima especificada (psig)</i>
T1 (494 m)	60
T2 (744 m)	30
T3 (994 m)	30
T4 (1244 m)	15

#### **Placa conversora Analógica – Digital - Analógica (ADA)**

A placa ADA utilizada é composta pelo multiplexador e por dois circuitos: um circuito de conversão analógico-digital e outro circuito digital-digital.

O multiplexador possibilita ao computador receber os sinais alternadamente; permitindo a utilização de um único conversor analógico/digital (CAD) com acesso a várias linhas de sinais analógicos. O multiplexador utilizado é provido de 8 portas para receber os sinais, e é parte integrante da placa ADA, onde é encaixado o CAD.

O conversor analógico - digital é composto por um sampler e por uma placa que converte sinais analógicos em digitais. O sampler discretiza os sinais enviados continuamente pelos transdutores, funcionando como uma espécie de interruptor, que em intervalos de tempo regulares permite a passagem da corrente elétrica.

O sinal discretizado não pode ser utilizado diretamente pelo computador, pois é um sinal elétrico de natureza analógica, enquanto que o computador trabalha somente com sinais de natureza digital. O conversor analógico - digital (CAD) converte o sinal analógico em palavras de 12 bits, ou seja números inteiros na forma binária que podem ser utilizados pelo computador.

**Conversão do sinal analógico em digital**

Os transdutores de pressão utilizados transmitem um sinal analógico na faixa de voltagem de 1 a 5 V. Este sinal chega até a placa ADA e é convertido em sinal digital, um número decimal na faixa de 1012 a 4095, de acordo com a seguinte relação:

$$\frac{(SD - 1012)}{(4095 - 1012)} = \frac{(SA - 1)}{5 - 1} \quad (3.1)$$

onde  $SD$  é o sinal digital e  $SA$  é o sinal analógico.

Em seguida, o sinal digital é convertido em unidades de pressão, nas subrotinas *leitura* do programa de aquisição de dados.

Cada transdutor utilizado permite um valor máximo, de forma que o sinal digital é proporcional a pressão máxima permitida pelo transdutor. Assim, para o transdutor de pressão máxima 15 psig, tem-se:

$$P = 15 \cdot \frac{(SD - 1012)}{(4095 - 1012)} \quad (3.2)$$

Para os demais transdutores a relação segue de forma semelhante para converter o sinal digital em unidades de pressão:

$$P = 30 \cdot \frac{(SD - 1012)}{(4095 - 1012)} \quad (3.3)$$

$$P = 60 \cdot \frac{(SD - 1012)}{(4095 - 1012)} \quad (3.4)$$

### **Placa digital / digital (D/D)**

A placa digital é utilizada para atuar sobre as válvulas solenóide, de modo a provocar um vazamento, bem como para injetar ar na tubulação. Isto é feito através do programa de aquisição de dados (subrotina *write\_dig()*) que atua sobre um relé, permitindo a abertura/fechamento da válvula solenóide.

### **Microcomputador**

O microcomputador utilizado na aquisição de dados em tempo real é um micro 486 DX, 50 MHz, Winchester 250 MB, 8 MB RAM.

No sistema de aquisição de dados o micro computador tem:- 1) a função de receber os sinais transmitidos pelos transdutores e arquivá-los em tempo real; 2) abrir e fechar as válvulas solenóide; 3) mostrar os dados experimentais ao usuário, na forma gráfica.

### **Temporização**

Utilizando o relógio interno do microcomputador através da subrotina *clock()* e da biblioteca *time.h*, possível determinar o intervalo de tempo gasto para a execução de cada laço de leitura nos programas de aquisição de dados. Esta temporização é necessária para que se possa garantir a correta correspondência entre o tempo e as leituras de pressão.

Dentro do laço de leitura subrotina *leitura ()* são feitas as aquisições de dados, conversões dos sinais análogos em digitais, conversões dos sinais digitais em unidades de pressão e filtragem dos dados através do cálculo do valor médio de 100 leituras.

O tempo gasto na realização das tarefas descritas acima deve ser incorporado ao tempo gasto pelo transdutor ao realizar uma leitura, pois geram um atraso na aquisição de dados por ocorrerem entre duas leituras sucessivas. Desta forma, é possível garantir a exata correspondência entre as variáveis de processo.

Uma maneira de fazer esta temporização é iniciar o relógio como tempo1 e para cada

final de uma leitura associar um tempo2. A diferença (tempo2-tempo1) corresponde ao tempo gasto entre pontos sucessivos. Outra forma de fazer a contagem do tempo é iniciar o relógio como tempo1 e no final da leitura dos n pontos de pressão associar um tempo2 e dividir a diferença (tempo2-tempo1) pelos n pontos lidos. Dividindo-se este valor pelo número de vezes que se realiza o laço de leitura, tem-se o intervalo de tempo consumido entre duas leituras seguidas de um transdutor, pois para cada ponto gerado são feitas 100 leituras para cada transdutor.

### **Filtragem dos dados**

Durante a aquisição de dados de um processo qualquer, ruídos podem ser gerados por várias fontes tais como um instrumento de medição, equipamentos elétricos, ou por uma variável do processo (Ex.: variações na vazão de escoamento). A presença de vazamento em na tubulação gera um transiente hidráulico, que pode ser confundido com estes ruídos, dependendo da magnitude do vazamento. De modo a se identificar corretamente um vazamento, torna-se necessário reduzir ao máximo estes ruídos.

A redução de ruídos em um processo qualquer é possível através da filtragem dos dados. No presente trabalho utilizou-se um filtro média aritmética.

### **Média Aritmética**

Uma forma de reduzir o nível de ruídos em um processo qualquer é calcular a média de um determinado número de medidas sucessivas e considerá-la como sendo o valor filtrado de uma determinada variável, para o intervalo de tempo consumido durante as medidas.

Para o programa CCON.C, considerou-se como a leitura de um transdutor em um dado instante, a média de 100 medidas de pressão sucessivas.

Entretanto, a redução de ruídos obtidas através deste filtro não é considerada satisfatória para sistemas com ruídos de alta frequência, sendo necessária a utilização de outro filtro. Assim

sendo, a média aritmética geralmente é utilizada como um pré-filtro em um sistema de aquisição de dados.

### **Programas de Aquisição de Dados**

Para obter a aquisição contínua dos dados a partir dos leituras dos transdutores de pressão foram utilizados programas computacionais em linguagem C.

Os experimentos de detecção de vazamento na tubulação transportando mistura gás-líquido foram executados em duas partes distintas. Uma etapa é a introdução da bolha de ar e a outra é a ocorrência do vazamento.

Para a etapa de injeção da bolha de ar, o programa CCON.c foi executado realizando tarefas de abertura e fechamento da válvula solenóide de injeção de ar dentre outras. Para o vazamento o programa executado é CBLHVAZ.c.

Abaixo são enumeradas as tarefas executadas pelos programas.

#### *Tarefas executadas pelo programa CCON.c:*

1. fechamento da válvula solenóide, para garantir o estado estacionário;
2. leitura dos dados em estado estacionário;
3. conversão dos dados lidos em sinais digitais e em unidades de pressão;
4. impressão na tela do perfil de pressão do estado estacionário;
5. abertura da válvula solenóide de injeção de ar;
6. fechamento da válvula solenóide de injeção de ar;
7. leitura dos dados ;
8. conversão dos dados lidos, de sinal analógico para sinal digital e para unidades de pressão;

9. impressão do perfil de pressão;
10. arquivo dos dados de perfil de pressão com o tempo.

*Tarefas executadas pelo programa CBLHVAZ.c:*

1. fechamento da válvula solenóide, para garantir o estado estacionário;
2. leitura dos dados em estado estacionário;
3. conversão dos dados lidos em sinais digitais e em unidades de pressão;
4. impressão na tela do perfil de pressão do estado estacionário;
5. abertura da válvula solenóide para provocar o vazamento;
6. leitura dos dados em estado transiente;
7. conversão dos dados lidos, de sinal analógico para sinal digital e para unidades de pressão;
8. impressão do perfil de pressão;
9. fechamento da válvula solenóide que provoca o vazamento;
10. arquivo dos dados de perfil de pressão com o tempo.

### **3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

A seguir são apresentadas as etapas de procedimento de operação da montagem.

1) Determinação da vazão de líquido. A partir da curva de calibração da placa de orifício determinou-se o número de Reynolds para cada experimento.

2) Estabelecimento do estado estacionário. A tubulação ficou operando até estabelecer o estado estacionário possível de ser visualizado pelos perfis de pressão apresentados na tela do computador.

3) Determinação da vazão de vazamento. A válvula solenóide de vazamento foi regulada para uma quantidade de vazamento de 10, 30 ou 50% da vazão nominal do líquido.

4) Determinação do volume de ar a ser injetado. O vazão de ar injetado foi determinada através de um rotâmetro. O rotâmetro apresenta uma tabela de correlação da vazão dependendo do fluido usado (ar), do material da esfera (vidro ou aço inoxidável).

5) Introdução da bolha de ar. Nesta etapa o programa CCON.c é executado para fazer a abertura da válvula solenóide de injeção de ar e assim provocar um perturbação no estado estacionário do sistema que é arquivado.

Para escoamento contínuo gás-líquido, nesta etapa ocorre a abertura da válvula de ar manualmente. A tubulação é monitorada até que se estabeleça o estado estacionário gás-líquido.

6) Simulação do vazamento. O programa CBLHVAZ.c é executado para abrir a válvula solenóide que provoca o vazamento e o regime transiente é arquivado.

7) Diversos experimentos foram realizados variando-se o número de Reynolds, a vazão de vazamento, a quantidade de ar a ser injetado e a posição do vazamento.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será apresentado um estudo da sensibilidade do sistema de detecção de vazamentos na presença de ar escoando na tubulação. Perfis de transientes de pressão foram obtidos para os seguintes casos:

- (a) injeção de bolhas isoladas de ar, sem vazamento;
- (b) detecção de vazamentos na presença de uma única bolha de ar;
- (c) detecção de vazamentos durante escoamento contínuo ar-água.

### 4.1. TRANSIENTES DE PRESSÃO EM TUBULAÇÕES TRANSPORTANDO MISTURAS GÁS-LÍQUIDO

Inicialmente, foram estudadas as características dos transientes de pressão gerados pela injeção de uma bolha de ar, sem a ocorrência de vazamento. O sistema foi monitorado durante tempo suficiente para que a bolha percorresse toda a tubulação. Assumindo que a bolha se desloca com a mesma velocidade do líquido, o tempo de cada experimento foi o suficiente para que todo o ar deixasse a tubulação. Normalmente, este intervalo de tempo foi superior a trinta minutos.

As Figuras 4.1 a 4.3 mostram perfis de transientes de pressão obtidos para números de Reynolds de 10.000 e 4.000, vazões de ar entre 2,5 e 58 litros/min e tempos de injeção das bolhas de 10 e 20 s. A injeção de ar na tubulação foi realizada por computador, através da abertura de uma válvula solenóide, interfaceada ao micro por meio da placa ADA. O tempo de injeção foi estabelecido no programa de aquisição de dados.

No apêndice D são apresentados os demais perfis dos transientes de pressão para número de Reynolds 10.000, 6.000 e 4.000, variando a vazão do ar e o tempo de injeção.

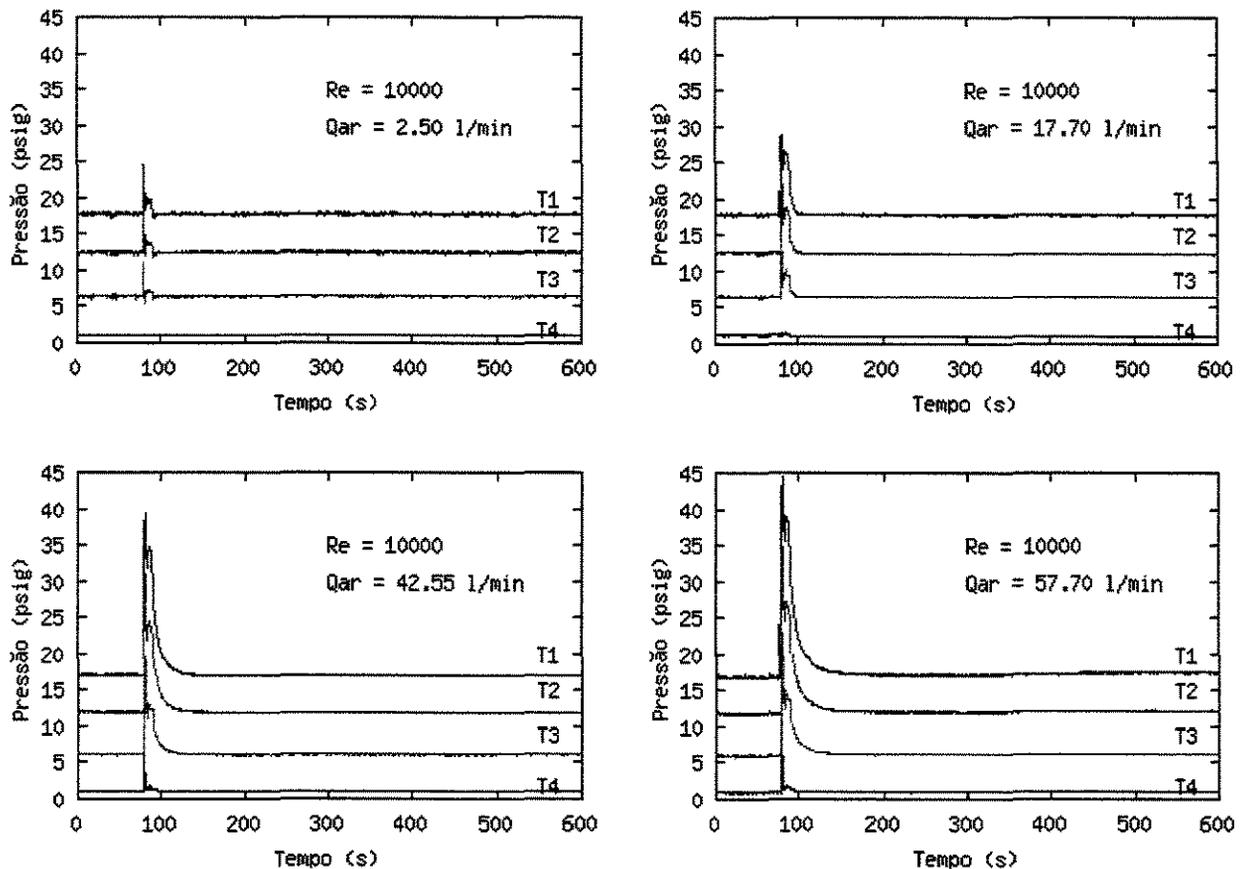


Figura 4.1. Transientes de pressão. Injeção de bolhas isoladas de ar

( $Re = 10000$ ; tempo de injeção = 10 s)

Os resultados nas Figuras 4.1 a 4.3 mostram que a entrada da bolha de ar provoca uma onda de choque que se propaga ao longo da tubulação. A onda de choque é detectada com intensidades diferentes pelos quatro transdutores ao longo da tubulação, dependendo da distância entre a entrada de ar e o transdutor, bem como da vazão de ar. Quanto mais longe está o transdutor do ponto de entrada de ar e quanto menor a vazão de ar, menor é a magnitude do pulso de pressão. Após a passagem da onda de choque pelos transdutores, a pressão ao longo da tubulação retorna ao valor inicial, mais rapidamente quanto menor a vazão de ar. Observou-se também que a passagem das bolhas pelos transdutores não causa alteração no perfil de pressão.

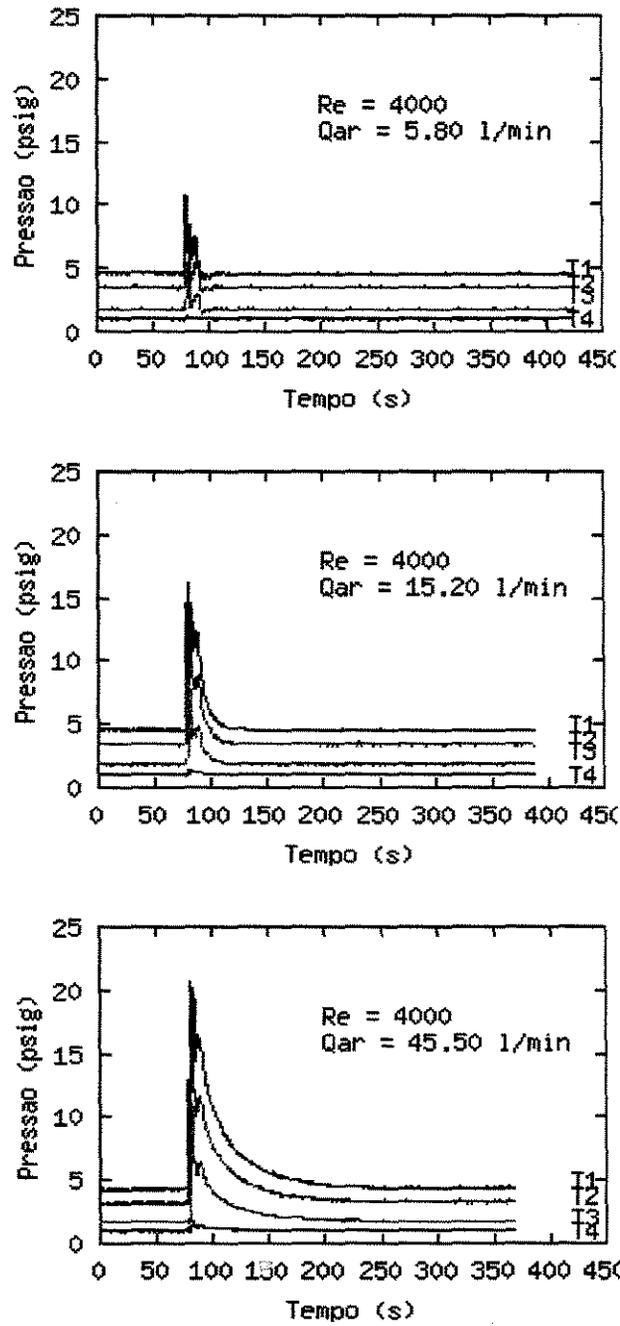


Figura 4.2. Transientes de pressão. Injeção de uma bolha de ar  
( $Re = 4000$ ; tempo de injeção = 10 s)

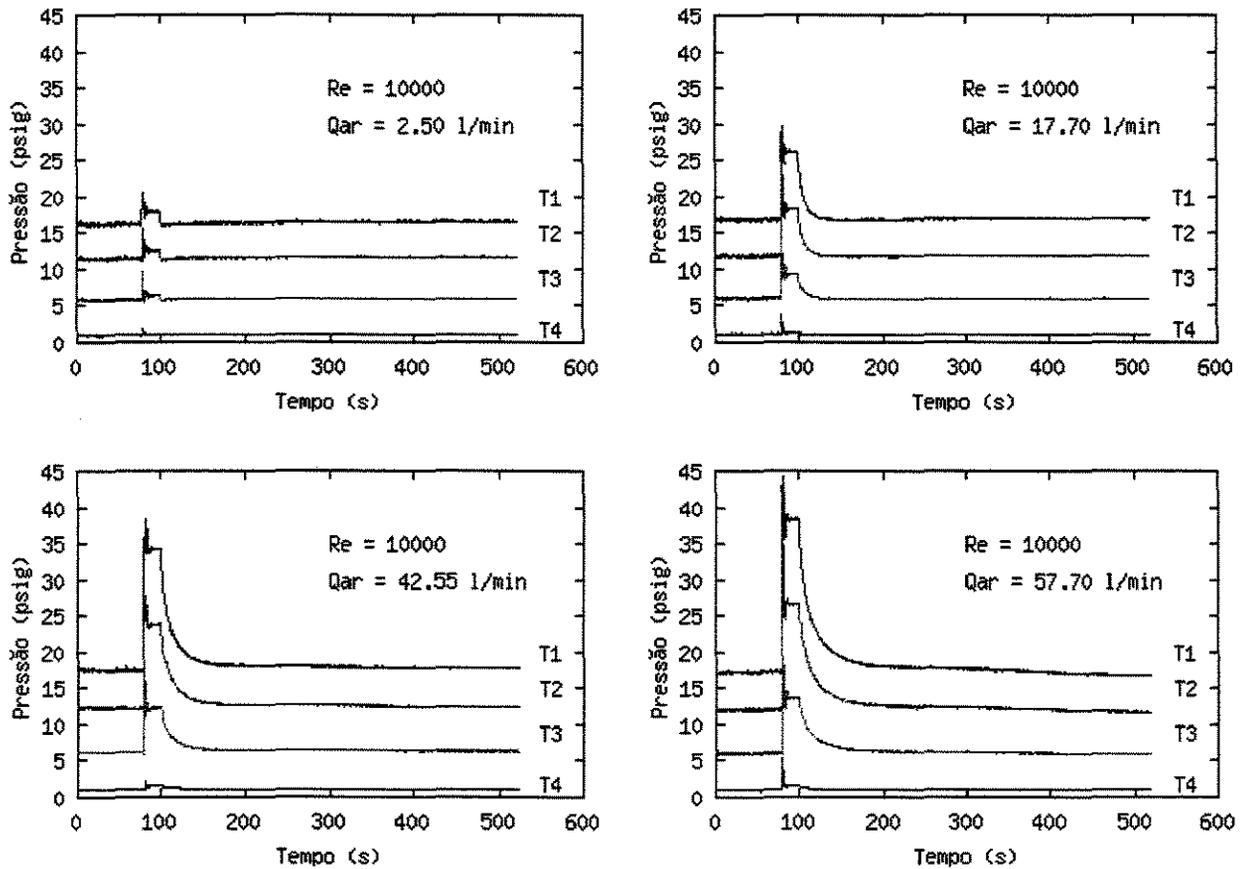


Figura 4.3. Transientes de pressão. Injeção de bolhas isoladas de ar

( $Re = 10000$ ; tempo de injeção = 20 s)

Com o aumento do tempo de injeção para 20 s os pulsos de pressão passam a apresentar um patamar correspondente ao tempo em que a válvula solenóide permanece aberta injetando a bolha (Figura 4.3).

Com a injeção de uma única bolha na corrente de líquido, a tubulação passa a operar sob o regime *slug*, como mostra a Tabela 4.1. A determinação do regime de escoamento é apresentada no Apêndice A.

Tabela 4.1 : Determinação do regime de escoamento para injeção de uma única bolha de ar.

<i>Condições operacionais</i>	$Q_{gás} (l/min)$	$G_G (kg/m^2s)$	$G_L/G_G$	<i>Escoamento</i>
$Re = 10000$ $Q_{água} = 149,0 l/min$ $G_L = 526,3 kg/m^2s$	2,5	0,20	2764	plug
	14,0	1,08	486	slug
	17,7	1,34	391	slug
	40,0	3,03	173	slug
	42,5	3,23	163	slug
	57,7	4,38	120	slug
	61,4	4,66	113	slug
$Re = 6000$ $Q_{água} = 89,5 l/min$ $G_L = 315,8 kg/m^2s$	6,4	0,48	650	plug
	14,0	1,06	296	slug
	17,5	1,33	237	slug
	26,9	2,04	154	slug
$Re = 4000$ $Q_{água} = 60,0 l/min$ $G_L = 211,5 kg/m^2s$	5,8	0,43	479	plug
	14,0	1,06	198	slug
	15,2	1,15	183	slug
	21,3	1,62	130	slug
	45,5	3,45	61	slug
	52,4	3,97	53	slug

## 4.2. DETECÇÃO DE VAZAMENTOS NA PRESENÇA DE MISTURAS

### GÁS-LÍQUIDO

Inicialmente a sensibilidade do sistema de detecção de vazamentos foi estudada na presença de uma bolha de ar escoando na tubulação.

Para um dado número de Reynolds do líquido, bolhas isoladas foram injetadas na

tubulação durante um dado intervalo de tempo e a seguir foi provocado um vazamento. Considerou-se que a bolha se desloca com a mesma velocidade do líquido, de modo a se ter uma noção da sua localização na tubulação durante cada experimento. O vazamento foi provocado somente quando a distância estimada da bolha era de 600 m da entrada da tubulação, ou seja, depois do primeiro ponto de vazamento (a 250 m) e entre os transdutores T1 e T2.

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram os resultados obtidos. O conjunto completo de resultados encontra-se no Apêndice E.

Os perfis de pressão nas Figuras 4.4 e 4.5 mostram a detecção da onda gerada pelo vazamento pelos quatro transdutores instalados ao longo da tubulação. Essa onda de pressão propaga-se a montante e a jusante do ponto de vazamento (250 ou 750 m da entrada) na presença de uma bolha de ar escoando na tubulação.

De um modo geral, os transientes de pressão apresentam uma queda seguida de recuperação parcial em relação ao valor original da pressão. Para número de Reynolds e vazão de ar constante, o aumento da magnitude do vazamento aumenta a queda no valor da pressão, bem como diminui a recuperação da pressão na tubulação. O mesmo comportamento ocorre quando se aumenta a vazão de ar, mantendo-se constantes o número de Reynolds bem como a  $Re$  e a magnitude do vazamento.

Para o caso em que o vazamento ocorreu a 750 m da entrada e para  $Re = 10.000$ , sob baixas vazões de ar ( $Q_{ar} = 2,5$  litros/min) a pressão se recupera parcialmente permanecendo constante, independente da magnitude do vazamento. À medida que a vazão de ar aumenta, os perfis de pressão apresentam uma recuperação parcial seguida de queda contínua, mais acentuada quanto maior for a vazão de ar.

Observa-se também que o perfil de pressão gerado pelo transdutor T1 instalado a 494 m da entrada (neste caso o transdutor que está mais distante, a montante do vazamento) diferencia-se dos demais uma vez que após a ocorrência e detecção do vazamento a pressão continua diminuindo, durante o experimento.

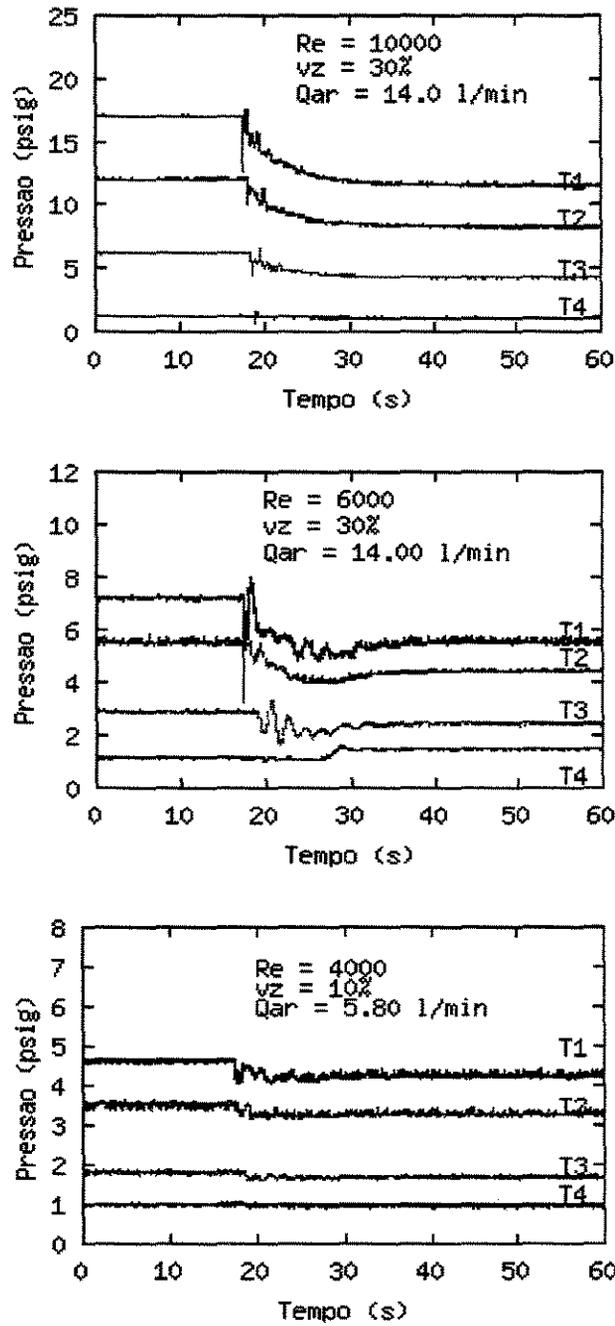


Figura 4.4: Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolhas isoladas (posição do vazamento = 250 m).

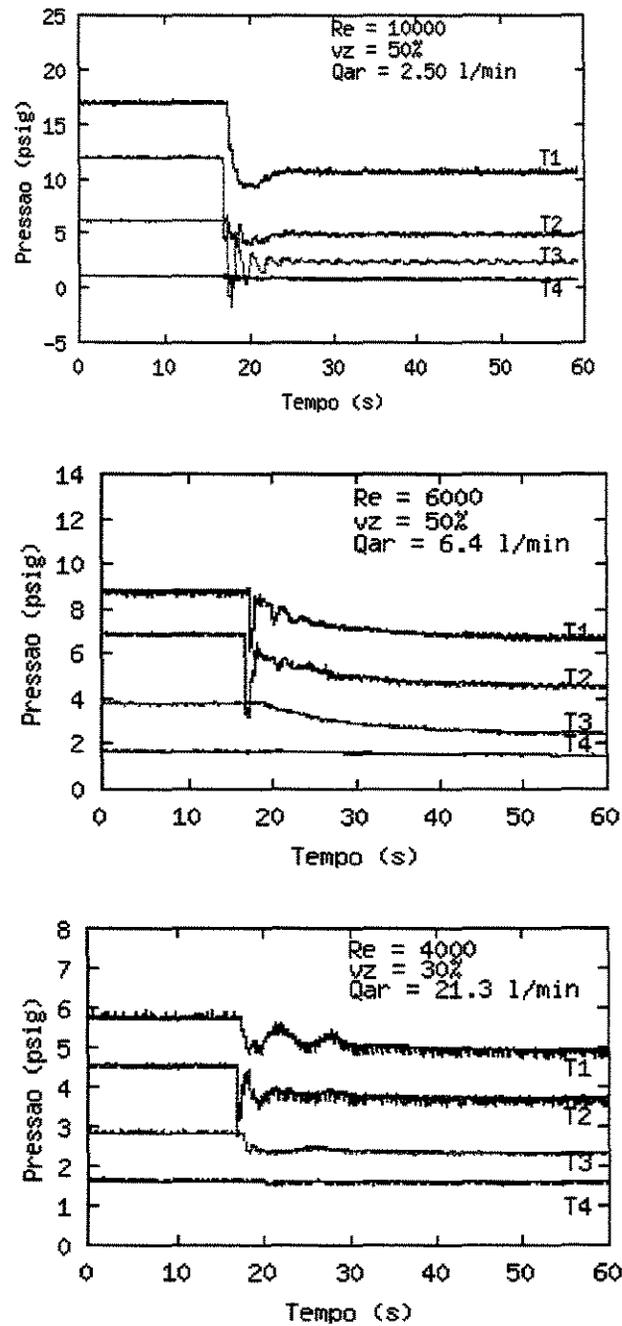


Figura 4.5: Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolhas isoladas.  
(posição do vazamento = 750m).

Com o amortecimento da onda de pressão, propagando-se a montante entre o vazamento e o transdutor T1, isto é contra o fluxo da mistura gás-líquido e sob  $Re = 10.000$ , o registro é apenas da detecção do vazamento e de mais nenhuma outra oscilação no valor da pressão. Os perfis obtidos sob  $Re = 6.000$  apresentam as mesmas características daqueles sob  $Re = 10.000$ .

Para baixo número de Reynolds (4.000) os perfis de pressão permanecem constantes após a recuperação parcial, exceto quando a vazão de ar e a magnitude do vazamento são altas, ( $Q_{ar} > 2,5$  litros/min e  $vz = 50\%$ ), caso em que os transdutores mais próximos do vazamento indicam que a recuperação da pressão é seguida de uma queda contínua durante o experimento. De um modo geral, as características dos perfis de pressão indicam que o amortecimento da onda de choque não é tão acentuado, propagando-se sob baixo número de Reynolds.

No caso em que o vazamento ocorre a 250 m da entrada, todos os transdutores estão localizados à jusante da posição de vazamento. O transdutor T1 é o que está mais próximo, a 244 m do vazamento.

Para  $Re = 10.000$ , os perfis de pressão apresentam uma queda no momento do vazamento. Não há recuperação da pressão que continua diminuindo até atingir um outro valor constante. A queda no valor da pressão aumenta com a magnitude do vazamento, mas diminui com o aumento da vazão de ar. Deste modo a sensibilidade quanto à detecção diminui com o aumento da vazão de ar.

Para números de Reynolds de 6.000 e 4.000 os perfis de pressão apresentam certa recuperação em relação ao valor inicial. As características dos transientes indicam uma redução no amortecimento da onda de choque, comparativamente com  $Re = 10.000$ .

De modo a verificar a influência do ar escoando na tubulação foram realizados experimentos de detecção de vazamento apenas com líquido, nas mesmas condições de operação ( $Re$ ; magnitude do vazamento) daquelas obtidas com ar, como mostrado na Figura 4.6. O conjunto completo de resultados, para vazamentos a 250 m e 750 m, encontra-se no Apêndice F.

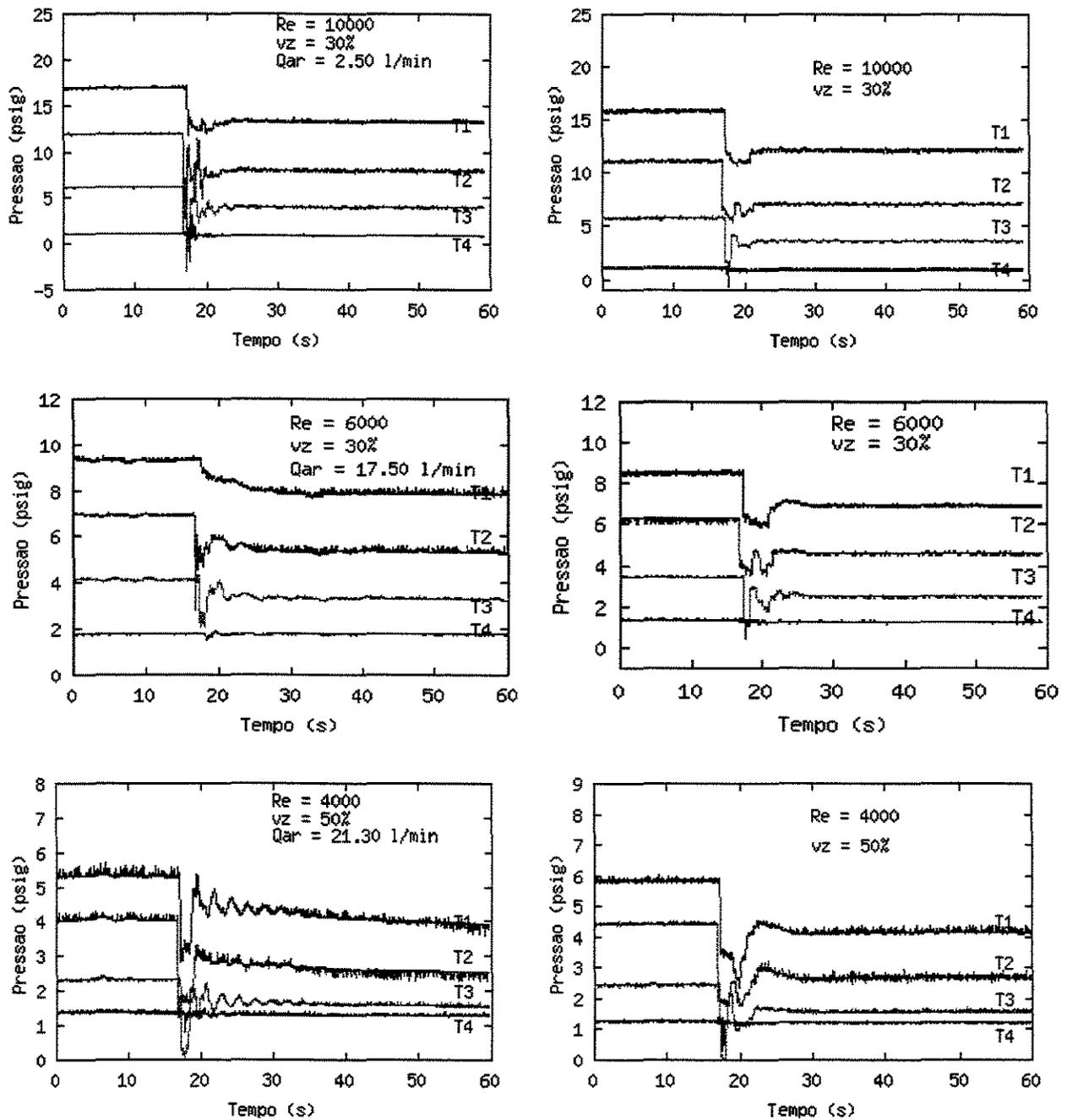


Figura 4.6: Comparação entre os transientes de pressão para líquido e para mistura ar-água (posição do vazamento = 750 m).

Nos transientes de pressão para tubulação transportando apenas líquido praticamente não se observam as oscilações de pressão presentes nos transientes com mistura gás-líquido. Conclui-se que as oscilações são geradas por reflexões da onda de choque propagando-se ao longo da tubulação. A presença de ar cria um “efeito elástico” sobre a onda de choque gerando as oscilações observadas nos transientes. É necessário considerar também a existência de pontos de reflexão intrínsecos da tubulação, uma vez que a montagem experimental consta de tubos de 18 m de comprimento e contém um total de 75 cotovelos de 90°.

No que diz respeito ao regime de escoamento, dependendo do tamanho do *slug* formado no interior da tubulação, este pode agir como um amortecedor da onda de choque reduzindo o impacto produzido pelo vazamento. Uma grande quantidade de ar na tubulação irá interferir na forma como o sistema se recupera após o vazamento. Pode-se dizer que para uma grande quantidade de ar na tubulação (sob forma de um único *slug*) ocorre uma diminuição da sensibilidade do sistema de detecção.

Para os regimes de escoamento desenvolvidos sob as condições operacionais utilizadas neste estudo (regimes *plug* e *slug*) a onda de choque propaga-se na mistura gás-líquido do mesmo modo que se propaga num meio homogêneo. Quando o regime é do tipo estratificado, por exemplo, observa-se duas ondas de pressão, uma *onda rápida* propagando-se no gás e uma segunda onda mais lenta que se propaga como em um meio homogêneo (Falk, 1999).

A sensibilidade do sistema de detecção de vazamentos também foi testada na presença de escoamento contínuo ar-água. O conjunto de resultados obtidos encontra-se no Apêndice G.

Com a injeção contínua de ar na tubulação, desenvolveu-se um regime de escoamento do tipo empistonado (*plug-flow*) com plugs alternados de líquido e gás. Em alguns casos, o regime era do tipo estratificado, onde o líquido e gás escoam em camadas. A Tabela 4.2 mostra os regimes de escoamento gás-líquido para várias condições de operação da tubulação.

Tabela 4.2: Determinação do regime de escoamento contínuo ar-água.

<i>Condições operacionais</i>	$Q_{gás} (l/min)$	$G_G (kg/m^2 s)$	$G_L/G_G$	<i>Escoamento</i>
$Re = 10000$ $Q_{água} = 149,0 l/min$ $G_L = 526,3 kg/m^2 s$	2,0	0,151	3477	plug
	10,5	0,795	660	plug
$Re = 6000$ $Q_{água} = 89,5 l/min$ $G_L = 315,8 kg/m^2 s$	1,8	0,136	2309	plug
	6,4	0,048	650	Plug
$Re = 4000$ $Q_{água} = 60,0 l/min$ $G_L = 211,5 kg/m^2 s$	1,6	406,874	0,078	bubbly
	5,0	130,116	0,025	bubbly
	10,3	838,161	0,160	plug

Como foi observado anteriormente que a ocorrência de vazamento na presença de bolhas isoladas leva a uma redução na pressão ao longo da tubulação, seguida de recuperação parcial em relação ao valor inicial de pressão. Porém, no caso de escoamento contínuo líquido-gás a magnitude da queda na pressão gerada pelo vazamento é bem menor. Em geral, os transientes apresentam apenas pequenas variações na pressão, que na maioria dos casos são percebidas somente para vazamentos maiores do que 30% da vazão nominal de líquido. Isto pode ser observado na Figura 4.7 onde o vazamento está a 250 m da entrada e o transdutor mais próximo (T1) está a 244 m do vazamento.

Uma detecção mais precisa foi observada somente para número de Reynolds maior do que 6.000 e para porcentagens de vazamento acima de 30% quando o vazamento estava a 750 m da entrada, com o transdutor mais próximo (T2) localizado a apenas 6 m do vazamento (Figura 4.8 e 4.9).

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 juntamente com a Tabela 4.2 mostram também que o tipo de regime de escoamento não influencia na sensibilidade de detecção do vazamento.

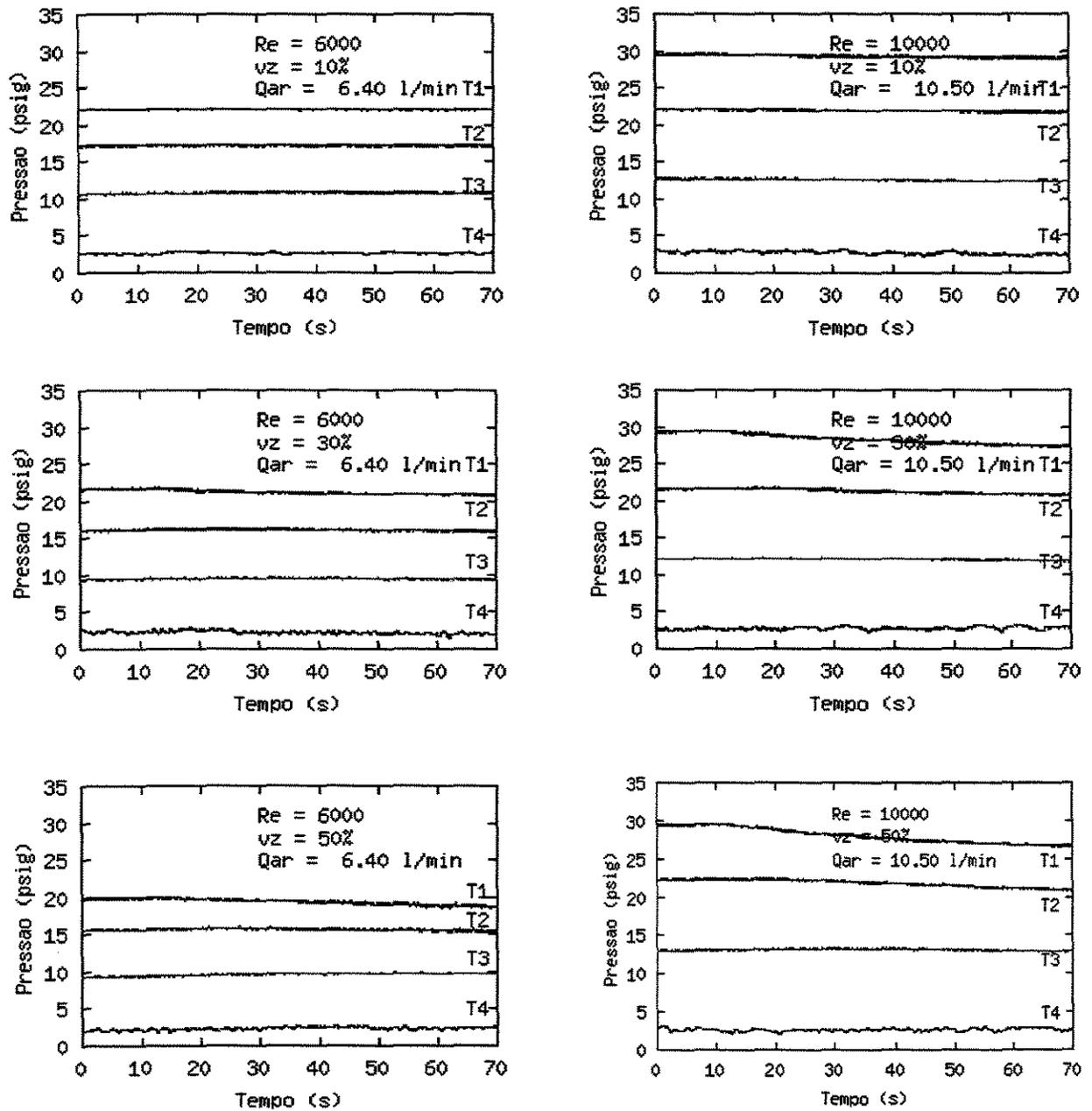


Figura 4.7: Transientes de pressão gerados por vazamento, durante escoamento contínuo ar-água (vazamento a 250 m).

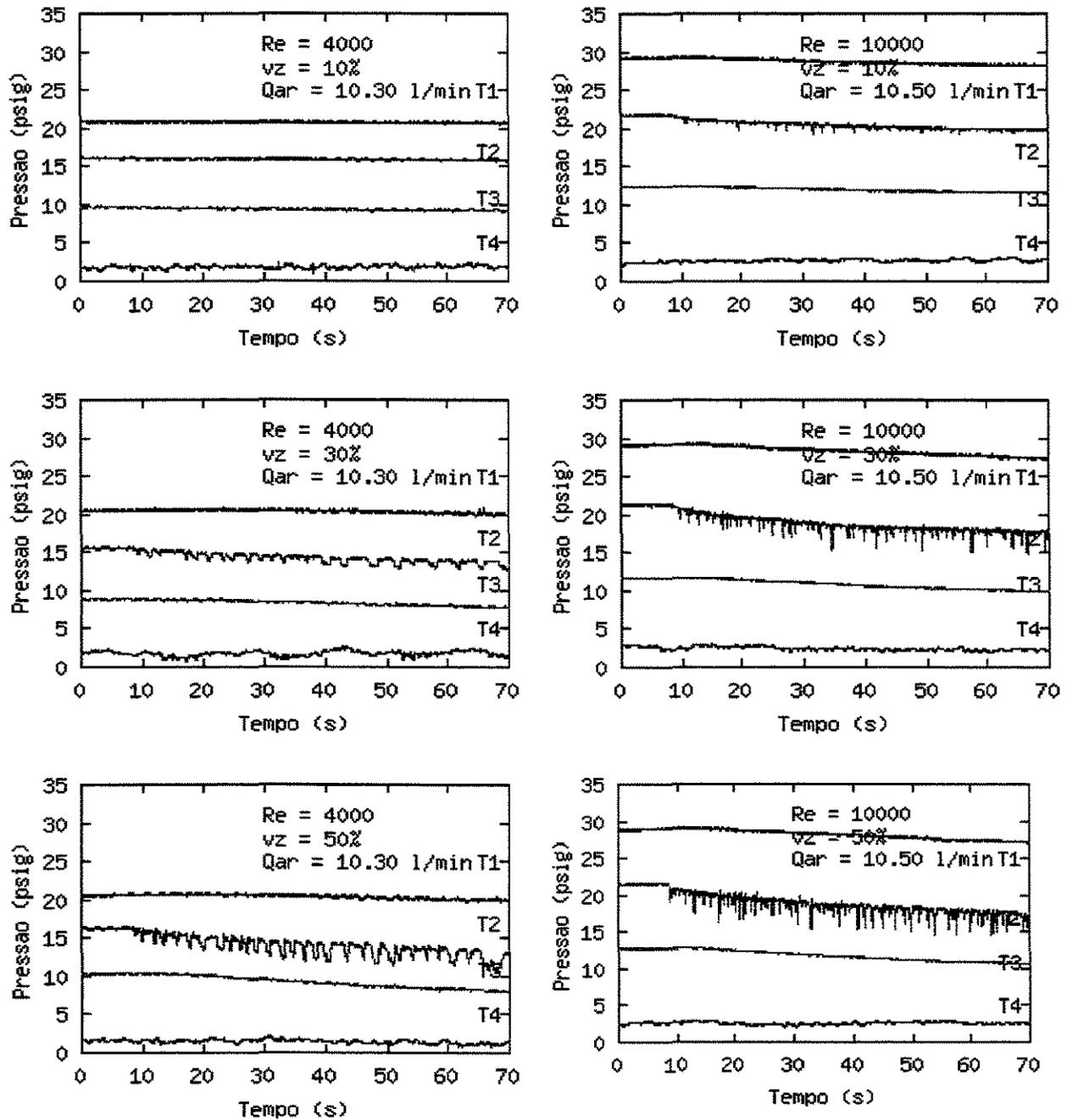


Figura 4.8: Transientes de pressão gerados por vazamento, durante escoamento contínuo ar-água (vazamento a 750 m;  $Re = 4000$ ).

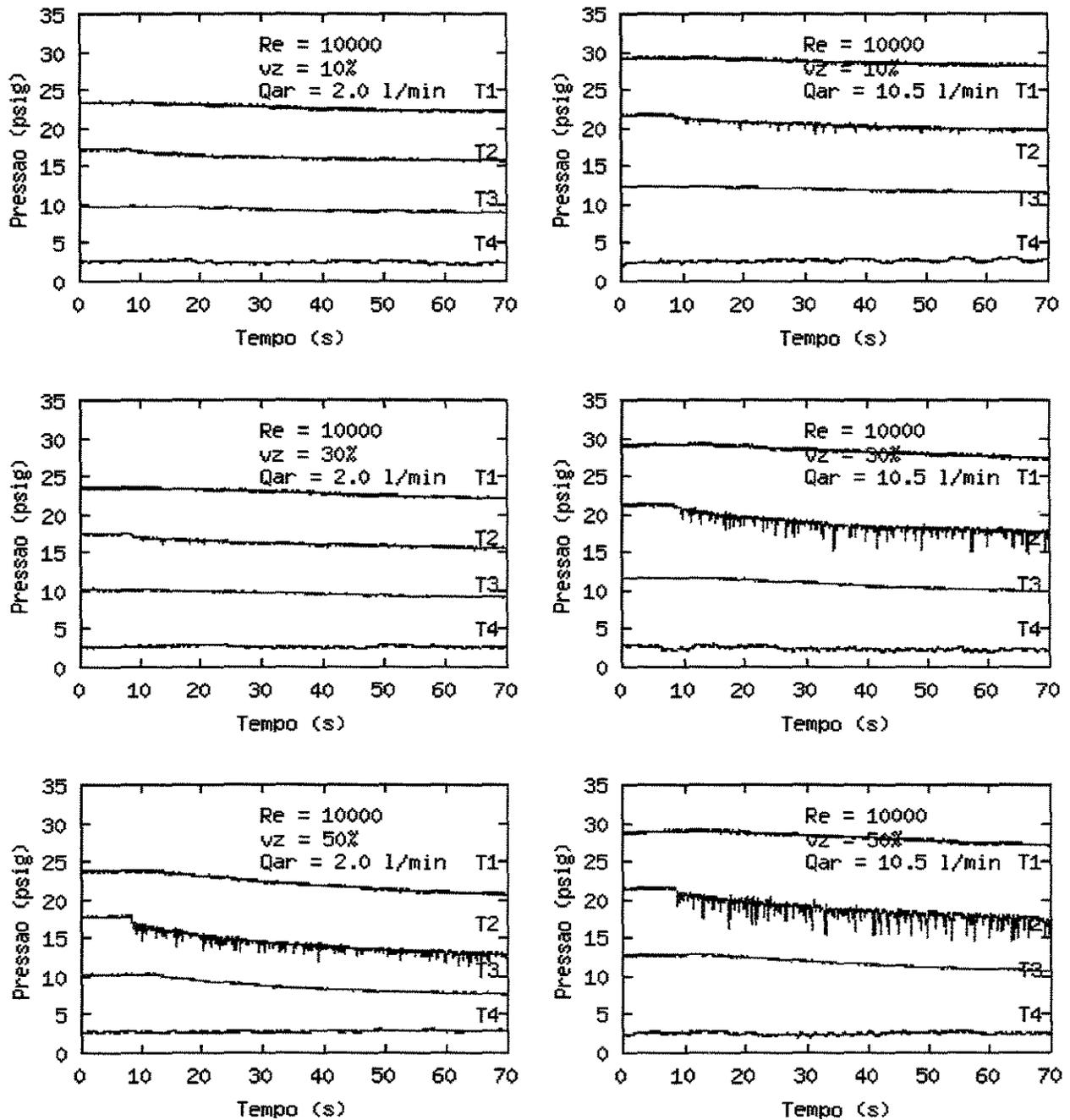


Figura 4.9: Transientes de pressão gerados por vazamento, durante escoamento contínuo ar-água (vazamento a 750 m;  $Re = 10000$ ).

Os resultados obtidos indicam que a presença de ar fluindo continuamente na tubulação causa grande amortecimento da onda de choque gerada pelo vazamento, à medida que esta se propaga na tubulação. A detecção do vazamento foi possível apenas para o transdutor localizado bem próximo do vazamento.

A Tabela 4.3 apresenta os valores da velocidade de propagação da onda de pressão determinados para diferentes condições de operação. Numa mistura gás-líquido a onda de pressão se propaga a velocidades na faixa entre 30 e 70 m/s. Esses valores são cerca de 9 vezes menores que aqueles encontrados para a propagação em líquido apenas, isto é, cerca de 500 m/s (Cariati, 1999), confirmando que a presença do gás na tubulação amortece o efeito da onda de pressão.

Tabela 4.3: Velocidade de propagação da onda de pressão ( $v$ ) (vazamento a 250 m)

Re	vz (%)	$Q_{ar}$ (l/min)	Transdutores			v (médio) (m/s)
			T1/T2	T2/T3	T1/T3	
10.000	50	P30	-	32	-	32
10.000	50	P25	90	56	-	73
6.000	50	P20	-	43	-	43
4.000	50	P10	38	-	82	60

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho consistiu em detectar e analisar transientes de pressão, causados por vazamento, em tubulação de PVC de 1250 m de comprimento operando com mistura gás-líquido (ar-água).

O equipamento de detecção era constituído de 04 transdutores de pressão instalados ao longo da tubulação e acoplado a um microcomputador. Os resultados experimentais foram obtidos para uma faixa de número de Reynolds de 4000 a 10000, porcentagens de vazamento de 10, 30 e 50% da vazão nominal do líquido, quantidades de ar (a) para escoamento com bolhas isoladas de 2,5 a 61,4 litros/min e (b) para escoamento contínuo de 1,6 a 10,5 litros/min e posicionamento do vazamento a 250 e 750 m da entrada da tubulação.

### 5.1. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudadas as características de transientes de pressão gerados pela injeção de bolhas de ar. O escoamento das bolhas não altera o perfil de pressão ao longo da tubulação. Esta injeção de ar na corrente de líquido provoca a formação de um regime de escoamento caracterizado como *slug* conforme definido no Apêndice A.

Os perfis obtidos para análise da detecção de vazamento em tubulação com um *slug* mostram uma queda na pressão seguida de uma recuperação parcial em relação ao valor original da pressão. Para número de Reynolds e vazão de ar constante, o aumento da magnitude do vazamento aumenta a queda no valor da pressão, bem como diminui a recuperação da pressão na tubulação.

A posição relativa entre o vazamento e o transdutor também interfere na intensidade de detecção do sinal do vazamento.

A presença do ar na tubulação gera reflexões da onda (efeito elástico) que também interferem na detecção do vazamento. Estas oscilações são apenas observadas nos perfis de pressão para tubulação com ar.

Dependendo da quantidade de ar na tubulação, este pode agir como um amortecedor da onda de choque reduzindo o impacto produzido pelo vazamento e assim, diminuindo na sensibilidade do sistema.

Para escoamento contínuo, a queda de pressão devido ao vazamento é menor comparada aos perfis para escoamento com uma única bolha. Isto ocorre devido ao forte amortecimento da onda de choque pela presença do ar. Nestes casos uma detecção mais precisa só foi possível para  $Re > 6.000$  e porcentagem de vazamento maior que 30% da vazão nominal do líquido, para vazamento posicionado a 750 m da entrada da tubulação.

Ainda nestes casos, os valores da velocidade de propagação da onda de pressão encontrados estavam na faixa entre 30 e 70 m/s. Esses valores são cerca de 9 vezes menores do que aqueles encontrados para a propagação em líquido apenas, isto é cerca de 500 m/s (Cariati, 1999).

## **5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para dar prosseguimento aos trabalhos de detecção de vazamentos pela técnica de transientes de pressão sugere-se;

- Aplicar da técnica de detecção para a ocorrência de dois ou mais vazamentos simultâneos.
- Testar a localização de vazamentos para sistemas de misturas gás-líquido.
- Estudar a aplicação da técnica para tubulação transportando gases.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Belsito, S., Lombardi, P., Andreussi, P. e Banerjee, S., "*Leak Detection in Liquefied Gas Pipelines by Artificial Neural Networks*", *AICHE Journal*, **44** (12), pp. 2675 -2688, (1998).
- Black, P., "*State-of-the-art pipeline leak detection*", in "Pipeline Systems", pp. 287 - 298, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, (1992).
- Buiatti, C. M., "*Monitoramento de Tubulações por Técnicas Computacionais On Line*", Dissertação de Mestrado, UNICAMP, (1995).
- Cariati, S. A., "*Detecção de Vazamentos por Computador On Line em Tubulações Transportando Líquido e Misturas Gás-Líquido*", Dissertação de Mestrado, UNICAMP, (1999).
- Cariati, S. A., Cruz, S. L., Pereira, J. A. F. R., "*Pressure Transients in Air-Water System: Application to Leak Detection in Pipelines*", *Two-Phase Flow Modelling and Experimentation*, vol.3, pp. 1393-1396, Pisa, Itália, (1999).
- Cruz, S. L., Buiatti, C. M. e Pereira, J. A. F. R., "*Pipeline Rupture Detection and Location and Transient Behavior of an Orifice Meter using on-line Computer Techniques*", *Proceedings: 5th World Congress of Chemical Engineering*, vol. 1, pp. 987-992, San Diego, Califórnia, EEUUA, (1996).
- Falk, K., "*Rapid Pressure Waves through Gas-Liquid Flow in Wells and Pipelines*", *SPE European Petroleum Conference*, Holanda, (1998).
- Falk, K.; Hervieu, E.; Gudmundsson, J., "*Pressure Pulse and Void Fraction Propagation in Two-phase Flow: Experiments for Different Flow Regimes*" *Two-phase Flow Modelling and Experimentation*, vol. 1, pp. 629-636, Pisa, Itália, (1999).
- Jonsson, L. e Larson, M., "*Leak Detection Thorough Hydraulic Transient Analysis*", in "Pipeline Systems", pp. 273-286, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, (1992).

## Referências Bibliográficas

Naves, G., "*Técnicas de Computação em Tempo Real em Controle e Supervisão de Tubulações*", Dissertação de Mestrado, UNICAMP, (1991).

Perry, R. e Green, D., "*Perry's Chemical Engineer's Handbook*", 6ª edição, Tokyo: McGraw-Hill Book Co., (1984).

Rougier, J. e Goldstein, M., "*Bayesian Modelling of Fluid Flow in Pipelines*", Journal of the Royal Statistical Society, Série C, (2001).

Silva, R.; Buiatti, C.; Cruz, S. e Pereira, J. A. F. R. "*Pressure Wave Behaviour and Leak Detection in Pipeline*", Comp. Chem. Engng., vol. 20, pp. S491-S496, (1996).

Wang, G.; Dong, D. e Fang, C., "*Leak Detection for Transport Pipelines Based on Autoregressives Modelling*", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, **42** (1), pp. 68-71, (1993).

Wylie, E. e Streeter, V., "*Fluid Transients*", FEB Press, Michigan, EEUUA, (1983).

## **APÊNDICE A**

### **Escoamento Gás-Líquido**

Uma mistura bifásica pode escoar por uma tubulação sobre diferentes formas de escoamento. O entendimento sobre os modelos de escoamento bifásico se faz necessário para prever os gradientes de pressão.

Os tipos de escoamentos obtidos em tubulações horizontais foram obtidos em termos de números adimensionais desenvolvidos por Govier e Omer. Os modelos de escoamentos tem sido relatados na literatura e correlacionados empiricamente como função das taxas de fluxo e propriedades do escoamento. Os seguintes tipos de escoamento podem ser identificados e os valores representativos para líquidos com viscosidade menores que 0,1 Pa.s (100 cP) e gases de densidades semelhantes a do ar.

1- Escoamento *bubbly* ou borbulhante: as bolhas de ar estão dispersas no líquido. Velocidade superficial do líquido de 1,5 a 4,5 m/s e velocidade superficial do gás de 0,3 a 3 m/s.

2- Escoamento *Plug* ou empistonado: ocorre a alternância de plugs de líquido e o gás se movendo ao longo da parte superior da tubulação. Velocidade superficial do líquido menor que 0,6 m/s e velocidade superficial do gás menor que 0,9 m/s.

3- Escoamento *Stratified* ou estratificado: o líquido escoar no fundo da tubulação e o gás escoar por cima sobre uma interface líquido-gás. Velocidade superficial do líquido menor que 0,15 m/s e velocidade superficial do gás de 0,6 a 3 m/s.

4- Escoamento *Wavy* em forma de ondas: similar ao estratificado exceto pela interface líquido-gás que apresenta ondas que viajam na direção do escoamento. Velocidade superficial do líquido menor que 0,3 m/s e velocidade superficial do gás igual a 4,5 m/s.

5- Escoamento *Slug*: uma onda é arrastada periodicamente pelo rápido movimento do gás para formar um slug que atravessa toda a tubulação a uma velocidade muito maior que a velocidade média do líquido. Este tipo de escoamento pode causar severas vibrações nos equipamentos devido ao impacto dos slugs de alta velocidade.

6- Escoamento *Annular* ou Anular: o líquido escoar como um filme ao longo da parede da tubulação e o gás escoar no centro. Velocidade superficial do gás maior que 6 m/s.

7- Escoamento *Spray* ou Disperso: o líquido escoar na forma de pequenas gotas arrastadas pelo gás. Velocidade superficial do gás maior que 60 m/s.

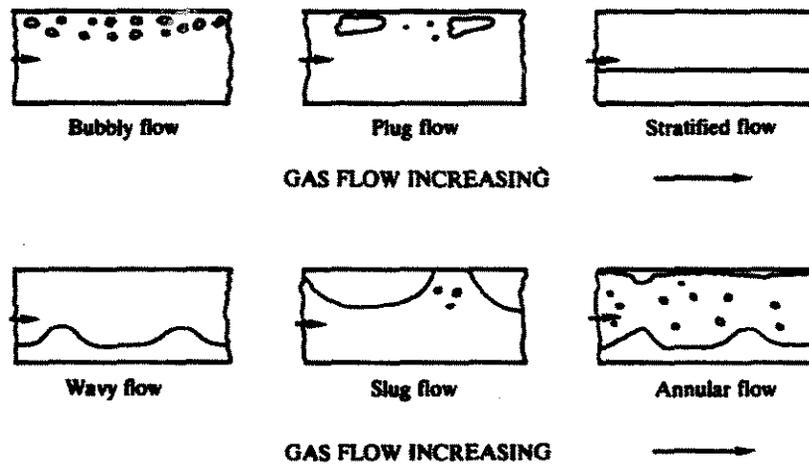


Fig. 2.2. Flow patterns in horizontal flow in a tube.

Figura-A.1 : Modelos de escoamento para fluxo em tubulação na horizontal.

As interfaces entre um regime de escoamento e outro pode ser descrito pela correlação proposta por Baker. Pela figura tem-se :

$$\lambda = (\rho''_G \cdot \rho''_L)^{1/2} \quad (\text{A.1})$$

$$\Psi = \frac{1}{\sigma''} \cdot \left[ \frac{\mu''_L}{\rho''_L} \right]^{1/3} \quad (\text{A.2})$$

onde

$\mu'_L$  - razão entre a viscosidade do líquido e da água (adimensional).

$\rho'_L$  - razão entre a densidade do líquido e da água (adimensional).

$\rho'_G$  - razão entre a densidade do gás e do ar (adimensional).

$\sigma'$  - razão da tensão superficial do líquido e da água (adimensional).

$G_G$  - velocidade mássica do gás.

$G_L$  - velocidade mássica do líquido.

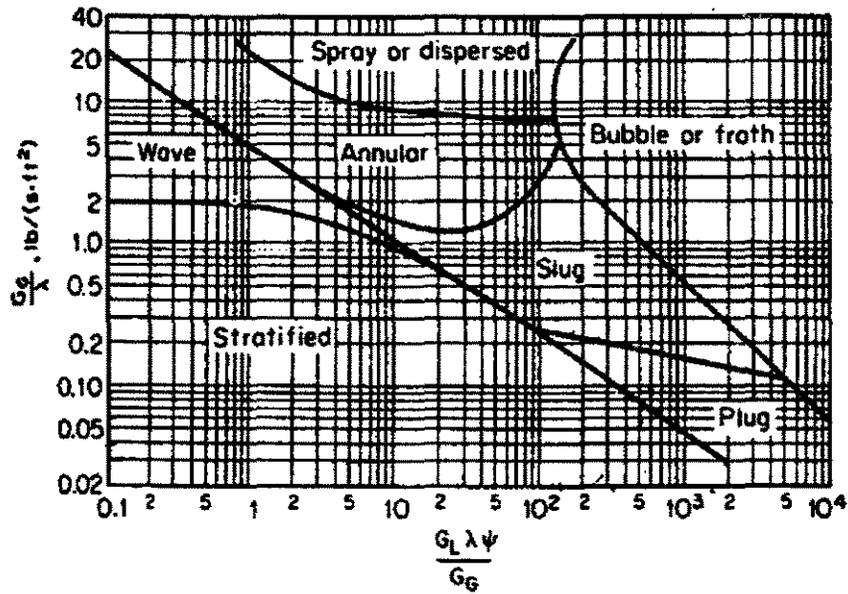


Figura A.2 : Gráfico de regimes de escoamento gás-líquido.

### Determinação dos regimes de escoamento

A determinação dos regimes de escoamento foi feita através do gráfico de Baker ("Perry's Chemical Engineer's Handbook" 6ª edição, página 5-41).

Como os experimentos foram feitos para sistema ar-água, os valores de  $\mu'_L$ ,  $\rho'_L$ ,  $\sigma'$  e  $\rho'_G$  (viscosidade, densidade e tensão superficial relativas) utilizados foram  $\mu'_L = \rho'_L = \rho'_G = \sigma' = 1$ .

Portanto, para a determinação do regime os termos  $\frac{G_G}{\lambda}$  e  $\frac{G_L \cdot \lambda \cdot \psi}{G_G}$  tornam-se  $G_G$  e

$$\frac{G_L}{G_G}$$

## **APÊNDICE B**

### **Curva de Calibração da Placa de Orifício e Correção da Vazão de ar.**

### B.1. CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO

A calibração da placa de orifício foi feita a partir de medidas de volume por tempo para cada valor de pressão medido através de um manômetro de tubo em U. A figura abaixo representa a curva de calibração para a placa de orifício utilizada no experimento.

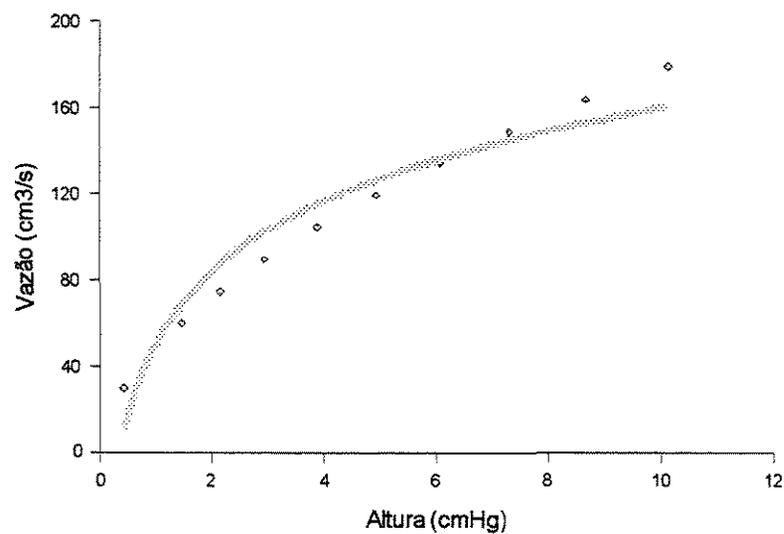


Figura B.1 : Calibração da placa de orifício.

### B.2. CORREÇÃO DA VAZÃO DE AR

A vazão de ar medida através do rotâmetro também foi corrigida em relação a temperatura e pressão de operação. A correção foi feita de acordo com a seguinte relação:

$$Q_{ar} = Q_{ar}^{\circ} \sqrt{\frac{P}{760} \cdot \frac{530}{T}} \quad (B.1)$$

onde

$P$  = pressão absoluta do ar, mmHg

$Q_{ar}^{\circ}$  = vazão de ar, nas condições padrão ( $P=1$  atm;  $T=70^{\circ}F$ )

$Q_{ar}$  = vazão de ar, corrigida (l/min)

$T$  = temperatura absoluta, em  $^{\circ}R = ^{\circ}F + 460$

Os valores de  $Q_{ar}^{\circ}$  são encontrados a partir dos valores lidos no rotâmetro e que estão correlacionados de acordo com a tabela de correção da vazão de ar fornecida pelo fabricante.

## **APÊNDICE C**

### **Listagem dos programas de Aquisição de Dados**

## # Programa CCON.c

```

/*----- */
/* PROGRAMA PARA AQUISICAO CONTINUA DE DADOS - VERSAO 1.0 */
/* ESTE PROGRAMA FAZ A AQUISICAO CONTINUA DE PONTOS */
/*----- */
/*AQUISICAO DE DADOS UTILIZANDO-SE DE QUATRO TRANSDUTORES */
/* DE PRESSAO LOCALIZADOS: */
/* CANAL 0 (T1) = 493,69 M, CANAL 1 (T2) = 743,73 M, */
/* CANAL 2 (T3) = 993,77 M, CANAL 3 (T4) = 1243,81 M */
/*----- */
#include "conio.h"
#include "dos.h"
#include "stdlib.h"
#include "stdio.h"
#include "graphics.h"
#include "ctype.h"
#include "math.h"
#include "bios.h"
/*#include "mcalc.h" */
#include "time.h"

#define ADLSB 0 /* Porta de leitura do lsb do conv ad */
#define ADMSB 1 /* Porta de leitura do msb do conv ad */
#define ADOFF 2 /* Porta para ajuste de offset */
#define ADSTS 4 /* Porta de controle do modo de operacao */
#define DAMSB 6 /* Porta de escrita do msb do conversor da */
#define DALSB 7 /* Porta de escrita do lsb do conversor da */
#define CTL 8 /* Porta de controle do mux de E/S e do sh */
#define base 0x220
#define IODIG 10 /* Entrada e saida digital */
#define TIMER0 12 /* Timer 0 do 8253 */
#define TIMER1 13 /* Timer 1 do 8253 */
#define TIMER2 14 /* Timer 2 do 8253 */
#define TIMCTL 15 /* Porta de controle do 8253 */
#define TRUE 1
#define FALSE 0

/*----- */
/* DEFINICAO DOS BITS DE IMPORTANCIA */
/*----- */
#define BSHEAN 0x10 /* Bit de controle do sample-hold entanl (1=sample) */
#define BSHSA 0x08 /* Bit de controle do sample-holds das saidas(1=sample)*/
#define MASC0_5 0x00 /* Mascara no modo de operacao 0-5V */
#define MASC1_5 0x29 /* Mascara no modo de operacao 1-5V */
#define MASC0_4 0x08 /* Mascara no modo de operacao 1-4V */
#define MASCBIP 0x23 /* Mascara no modo de operacao BIPOLAR */

```

```

#define TIME_OUT 25 /* Tempo de espera do fim da conversao A/D */

/*-----*/
/*      DECLARACAO DAS VARIAVEIS GLOBAIS E SUBROTINAS      */
/*-----*/

extern char erro;
unsigned char modoper;
unsigned int read_anl(),adj_offset();
unsigned char offset;
int get_key();
void leitura();
void grafico();
void eixos();
void arquivo();
void selchda();
void write_dig();

FILE *arq1;
int cont,count;
int tempo1,tempo2,tempo3;

/*-----*/
/*      PROGRAMA PRINCIPAL      */
/*-----*/

void main()
{
clock_t clock();
char arq[15];
char loop,inicio,input;
int i;
float volt_estac[1100],volt_trans[1100];
int graphdriver = DETECT,graphmode;
offset = adj_offset();

clrscr();
printf("\n  De o nome do arquivo de dados : ");
scanf("%s",&arq);
arq1 = fopen(arq,"wt");
tempo1=0;
tempo2=0;
tempo3=0;

inicio:
write_dig(0);          /* fechamento da valvula solenoide */
clrscr();
printf("\n\n  Aquisicao de dados experimentais  ");
printf("\n\n\n  Tecle <ENTER> para iniciar aquisicao de dados ");

```

```

getch();
clrscr();
initgraph(&graphdriver,&graphmode,"c:\\tc2"); /* inic.do mod.grafico */
cleardevice();
cont=0; /* conta o numero de pontos */
count=0; /* conta o numero de graficos */

/*-----*/
/*          INICIO DA AQUISICAO DE DADOS          */
/*-----*/
tempo1 = clock();
do
{
if (cont == 0)
{
cleardevice();
count=count+1;
eixos();
outtextxy(350,10," Para finalizar, aperte uma tecla");
}
cont = cont + 1;
leitura();
delay(2500);
if (cont == 500) cont = 0;
} while (kbhit() == 0);
getch();
tempo3 = clock();
printf("Tempo total = %.6f", (tempo3-tempo1)/CLK_TCK);
while(kbhit()==0);
getch();
write_dig(0);
closegraph();
fclose(arq1);
}

/*-----*/
/*          SUBROTINA DE LEITURA E FILTRAGEM DE DADOS          */
/*-----*/
void leitura()
{
int i,j,ix,iy,pnt,ponto;
char buf;
float tempo,soma0,soma1,soma2,soma3,soma4,P1,P2,P3,P4;

pnt=100;

/* LEITURA DOS DADOS */

```

```

soma0 = 0.0;
soma1 = 0.0;
soma2 = 0.0;
soma3 = 0.0;
soma4 = 0.0;

for(j=0;j<pnt;j++)
{
soma0 = read_anl(0,offset); /* transdutor - T1 */
soma0 = read_anl(0,offset);
soma1 = soma1 + read_anl(0,offset); /* transdutor - T1 */

soma0 = read_anl(1,offset); /* transdutor - T2 */
soma0 = read_anl(1,offset);
soma2 = soma2 + read_anl(1,offset); /* transdutor - T2 */

soma0 = read_anl(2,offset); /* transdutor - T1 */
soma0 = read_anl(2,offset);
soma3 = soma3 + read_anl(2,offset); /* transdutor - T1 */

soma0 = read_anl(3,offset); /* transdutor - T2 */
soma0 = read_anl(3,offset);
soma4 = soma4 + read_anl(3,offset); /* transdutor - T2 */
}

P1 = 60.0*((soma1/pnt)-1012.0)/(4095.0-1012.0);
P2 = 60.0*((soma2/pnt)-1012.0)/(4095.0-1012.0);
P3 = 30.0*((soma3/pnt)-1012.0)/(4095.0-1012.0);
P4 = 15.0*((soma4/pnt)-1012.0)/(4095.0-1012.0);

tempo2 = clock();
ponto=(count-1)*500+cont;
tempo=(tempo2-tempo1)/CLK_TCK;

/* codigo responsavel pela introudacao da bolha */

if(ponto==150) write_dig(1);
if(ponto==170) write_dig(0);

/* codigo responsaveis pelo arquivo continuo dos dados */

fprintf(arq1,"%int ",ponto);
fprintf(arq1,"%f ",tempo);
fprintf(arq1,"%f ",P1);
fprintf(arq1,"%f ",P2);
fprintf(arq1,"%f ",P3);
fprintf(arq1,"%f \n",P4);

```

```

/* imprime continuamente no grafico */

ix =cont + 80;          /* coordenada x */
iy = 340.0 -10.0*P1;   /* coordenada y */
putpixel(ix,iy,10);   /* introducao do ponto */

ix =cont + 80;          /* coordenada x */
iy = 340.0 - 10.0*P2;  /* coordenada y */
putpixel(ix,iy,14);   /* introducao do ponto */

ix = cont+ 80;          /* coordenada x */
iy=340.0 - 10.0*P3;   /* coordenada y */
putpixel(ix,iy,12);

ix = cont+ 80;          /* coordenada x */
iy = 340.0 - 10.0*P4;  /* coordenada y */
putpixel(ix,iy,11);   /* introducao do ponto */
}

/*-----*/
/*          CONSTRUCAO DOS EIXOS X E Y          */
/*-----*/
void eixos()
{
char buf;
double ticx,ticy;
int i,ix,iy;

setttextjustify(1,0);
setttextstyle(0,0,1);

line(80,40,80,340);
line(80,400,640,400);

for(i=0;i<=500;i=i+100)
{
ix = i + 80;
line(ix,400,ix,406);
ticx = 1.0*i+500*(count-1);
gcvt(ticx,3,&buf);
outtextxy(ix+2,420,&buf);
}
ticy = 31.0;
for(i=10;i<=310;i=i+10)
{
iy = i + 30;
line(75,iy,80,iy);
}
}

```

```

    ticy = ticy - 1.0;
    gcvt(ticy,3,&buf);
    outtextxy(50,iy+4,&buf);
}
settextjustify(1,0);
settextstyle(0,0,1);
outtextxy(540,450,"pontos");
settextjustify(1,1);
settextstyle(0,1,1);
outtextxy(15,150,"Pressao (psi)");
settextstyle(0,0,1);
}

/*-----*/
/*      SUBROTINA DE SELECAO DO ACIONAMENTO DE TECLAS      */
/*-----*/
int get_key(void)
{
    int key,lo,hi;
    key = bioskey(0);
    lo = key & 0X00FF;
    hi = (key & 0XFF00) >> 8;
    return((lo == 0) ? hi + 256 : lo);
}

/*-----*/
/*      INICIO DAS ROTINAS DE TRATAMENTO DA AD/DA      */
/*-----*/
/*SELECAO DO CANAL DO MUX DA ENTRADA E DA SAMPLE NA ENTRADA*/
/*-----*/
selchad(unsigned char canal)
{
    unsigned char chad;
    chad = canal << 5;          /* Posiciona o end do mux (badchan) */
    chad &= 0xe0;              /* Isola somente badchan0-2 */
    outportb(base + CTL,chad); /* Selecciona o canal */
    modoper |=BSHEAN;          /* Introduz bit de sample */
    outportb(base + ADSTS,modoper); /* Sample-hold da inani em sample */
    modoper &= ~BSHEAN;        /* Retira bit de sample */
    outportb(base + ADSTS,modoper); /* Sample-hold da inani em hold */
    return(canal);
}

/*-----*/
/*      SELECIONA O CANAL DO MUX DE SAIDA E DA SAMPLE NA SAIDA      */
/*-----*/
void selchda(unsigned char canal)

```

```

{
  unsigned char chda;
  canal &= 0x07;      /* Isola */
  chda = (canal << 5); /* Posiciona o end do mux (badchan0-2) */
  chda |= canal;     /* Soma c/ o mux do sample-hold (badchan0-2) */
                    /* Seleciona o canal+sample-hold corresp */
  chda |=BSHSA;     /* Introduz o bit de sample */
  outportb(base + CTL,chda); /* Coloca o sample-hold do canal em sample */
}

/*----- */
/*          ROTINA DE ESPERA DO FIM DA CONVERSAO          */
/*----- */
wait_eoc()
{
  unsigned register int ciclos,status;
  for (ciclos = TIME_OUT;ciclos;ciclos --)
  return;
}

/*----- */
/*          ROTINA DE LEITURA DO CONVERSOR          */
/*          Parametro de entrada: numero do canal          */
/*          Parametro de saida: retorna o valor da conversao          */
/*          se ocorrer erro retorna -1          */
/*----- */
unsigned int read_anl(unsigned char canal, unsigned char offset)
{
  unsigned int dadols,dadoms;
  unsigned int dado;
  selchad(canal);
  outportb(base+ADOFF,offset); /* Normalisa o valor do offset */
  dadols = inportb(base+ADLSB); /* Envia o start ao ad */
  wait_eoc(); /* Delay para conversao */
  dadoms = inportb(base+ADMSB); /* Le os 4 bits mais significativos*/
  dadols = inportb(base+ADLSB); /* Le os 8 bits menos significativos */
  dado = (dadoms << 8) + dadols;
  return(dado);
}

/*----- */
/*          ESCREVE O VALOR DE DADO NA SAIDA ANALOGICA DE 'canal'          */
/*----- */
void write_anl(unsigned int dado,unsigned char canal)
{
  unsigned char dadols,dadoms;
  dadols = dado; /* Inicia o deslocamento do dado */

```

```

dadoms = dado >> 8;          /* Desloca os 2 bits mais signific. */
outportb(base + DALSB,dadols); /* Escreve byte menos significativo */
outportb(base + DAMSB,dadoms); /* Escreve byte mais significativo */
selchda(canal);             /* Trans. para o canal de s. desejado */
return;
}

/*----- */
/*          ESCREVE NAS ENTRADAS DIGITAIS          */
/*----- */

void write_dig(char dado)
{
    outportb(base + IODIG,dado);
}

/*----- */
/*          ALGORITMO PARA AJUSTE AUTOMATICO DE OFFSET          */
/*          Retorna os seguintes valores:                      */
/*          100h -> Se nao existe o sinal de referencia de 3.500V na */
/*                   entrada analogica 7                        */
/*          200h -> Se em 4 tentativas de ajustar o offset isto nao */
/*                   for conseguido                             */
/*          Num -> De 0h a 0FFh que e o valor p/ zerar o offset          */
/*----- */

unsigned int adj_offset()
{
    unsigned int in1,in2,i,inatual,trigger = 0x800;
    unsigned char flag = 0,delay;
    if(modoper & 0x01) /* modo 1 a 5V? */
        trigger = 0xa00; /* sim, armazene a00h como valor de comparacao */
    else
        trigger = 0xb33;
    inatual = read_anl(7,140); /* le a entrada de refer centrando o offset */
    if(inatual < (trigger - 0x100)) /* existe a referencia de (3500mV)? */
        return(0x100); /* nao, retorne uma condicao de erro */
    for(i=0;flag==0;++i) /* inicio do integ. p/ busca do ponto otimo */
    {
        inatual = read_anl(7,(i&0xff)); /* tente com i valor de offset */
        for(delay=0;delay<50;++delay) /* rotina para atraso */
            if(inatual == trigger) /* erro de leitura =zero? */
                flag = 1; /* termine a execucao pto encontrado */
        if(i == 0x400) /* feita o scan 4 vezes sem sucesso? */
            return(0x200); /* termine e retorne condicao de erro */
    }
    return(i-1); /* termine e retorne o valor ajustado */
}

```

```

/*----- */
/* ROTINA PARA SELECAO AUTOMATICA DO MODO DE OPERACAO
   ACEITA OS SEGUINTEs PARAMETROS: */
/*   n = 0 -> 0-5V (modo default)
   n = 1 -> 1-5V
   n = 2 -> 0-4V
   n = 3 -> bipolar
   OBS: modo de leitura do conversor: pooling */
/*----- */
modo_oper(char n)
{
  unsigned char masc;
  masc=MASC0_5;          /* default operacao de 0-5V */
  switch(n)              /* scan do modo de operacao alternativo */
  {
    case 1:
      masc = MASC1_5;
      break;
    case 2:
      masc = MASC0_4;
      break;
    case 3:
      masc = MASCBIP;
      break;
  }
  modoper = masc;        /* armazena o modo de operacao setado */
  outportb(base+ADSTS,masc); /* envia a placa */
  return;
}
/*----- */

```

## # Programa CBLHVAZ.c

```

/*----- */
/* PROGRAMA PARA AQUISICAO CONTINUA DE DADOS - VERSAO 1.0 */
/* ESTE PROGRAMA FAZ A AQUISICAO CONTINUA DE PONTOS */
/*----- */
/*AQUISICAO DE DADOS UTILIZANDO-SE DE QUATRO TRANSDUTORES */
/* DE PRESSAO LOCALIZADOS: */
/* CANAL 0 (T1) = 493,69 M, CANAL 1 (T2) = 743,73 M, */
/* CANAL 2 (T3) = 993,77 M, CANAL 3 (T4) = 1243,81 M */
/*----- */
#include "conio.h"
#include "dos.h"
#include "stdlib.h"
#include "stdio.h"
#include "graphics.h"
#include "ctype.h"
#include "math.h"
#include "bios.h"
/*#include "mcalc.h" */
#include "time.h"

#define ADLSB 0 /* Porta de leitura do lsb do conv ad */
#define ADM5B 1 /* Porta de leitura do msb do conv ad */
#define ADOFF 2 /* Porta para ajuste de offset */
#define ADSTS 4 /* Porta de controle do modo de operacao */
#define DAMSB 6 /* Porta de escrita do msb do conversor da */
#define DALSB 7 /* Porta de escrita do lsb do conversor da */
#define CTL 8 /* Porta de controle do mux de E/S e do sh */
#define base 0x220
#define IODIG 10 /* Entrada e saida digital */
#define TIMER0 12 /* Timer 0 do 8253 */
#define TIMER1 13 /* Timer 1 do 8253 */
#define TIMER2 14 /* Timer 2 do 8253 */
#define TIMCTL 15 /* Porta de controle do 8253 */
#define TRUE 1
#define FALSE 0

/*----- */
/* DEFINICAO DOS BITS DE IMPORTANCIA */
/*----- */
#define BSHEAN 0x10 /* Bit de controle do sample-hold entanl (1=sample) */
#define BSHSA 0x08 /* Bit de controle do sample-holds das saidas(1=sample)*/
#define MASC0_5 0x00 /* Mascara no modo de operacao 0-5V */
#define MASC1_5 0x29 /* Mascara no modo de operacao 1-5V */
#define MASC0_4 0x08 /* Mascara no modo de operacao 1-4V */
#define MASCBIP 0x23 /* Mascara no modo de operacao BIPOLAR */

```

```

#define TIME_OUT 25 /* Tempo de espera do fim da conversao A/D */

/*-----*/
/*      DECLARACAO DAS VARIAVEIS GLOBAIS E SUBROTINAS      */
/*-----*/
extern char erro;
unsigned char modoper;
unsigned int read_anl(),adj_offset();
unsigned char offset;
int get_key();
void leitura();
void grafico();
void eixos();
void arquivo();
void selchda();
void write_dig();

FILE *arq1;
int cont,count;
int tempo1,tempo2,tempo3;

/*-----*/
PROGRAMA PRINCIPAL                                     */
/*-----*/
void main()
{
    clock_t clock();
    char arq[15];
    char loop,inicio,input;
    int i;
    float volt_estac[1100],volt_trans[1100];
    int graphdriver = DETECT,graphmode;
    offset = adj_offset();

    clrscr();
    printf("\n De o nome do arquivo de dados : ");
    scanf("%s",&arq);
    arq1 = fopen(arq,"wt");

    tempo1=0;
    tempo2=0;
    tempo3=0;

    inicio:
    write_dig(0);          /* fechamento da valvula solenoide */
    clrscr();
    printf("\n\n Aquisicao de dados experimentais ");

```

```

printf("\n\n Tecla <ENTER> para iniciar aquisicao de dados ");
getch();
clrscr();
initgraph(&graphdriver,&graphmode,"c:\\tc2"); /* inic.do mod.grafico */
cleardevice();
cont=0; /* conta o numero de pontos */
count=0; /* conta o numero de graficos */

/* ----- */
/*          INICIO DA AQUISICAO DE DADOS          */
/* ----- */
tempo1 = clock();
do
{
if (cont == 0)
{
cleardevice();
count=count+1;
eixos();
outtextxy(350,10," Para finalizar, aperte uma tecla");
}
cont = cont + 1;
leitura();
if (cont == 500) cont = 0;
} while (kbhit() == 0);
getch();
tempo3 = clock();
printf("Tempo total = %.6f", (tempo3-tempo1)/CLK_TCK);
write_dig(0);
while(kbhit()==0);
getch();
write_dig(0);
closegraph();
fclose(arq1);
}

/* ----- */
/*          SUBROTINA DE LEITURA E FILTRAGEM DE DADOS          */
/* ----- */
void leitura()
{
int i,j,ix,iy,pnt,ponto;
char buf;
float tempo,soma0,soma1,soma2,soma3,soma4,P1,P2,P3,P4;

pnt=100;

```

```

/* LEITURA DOS DADOS */

soma0 = 0.0;
soma1 = 0.0;
soma2 = 0.0;
soma3 = 0.0;
soma4 = 0.0;

for(j=0;j<pnt;j++)
{
soma0 = read_anl(0,offset); /* transdutor - T1 */
soma0 = read_anl(0,offset);
soma1 = soma1 + read_anl(0,offset); /* transdutor - T1 */

soma0 = read_anl(1,offset); /* transdutor - T2 */
soma0 = read_anl(1,offset);
soma2 = soma2 + read_anl(1,offset); /* transdutor - T2 */

soma0 = read_anl(2,offset); /* transdutor - T1 */
soma0 = read_anl(2,offset);
soma3 = soma3 + read_anl(2,offset); /* transdutor - T1 */

soma0 = read_anl(3,offset); /* transdutor - T2 */
soma0 = read_anl(3,offset);
soma4 = soma4 + read_anl(3,offset); /* transdutor - T2 */
}

P1 = 60.0*((soma1/pnt)-1012.0)/(4095.0-1012.0);
P2 = 60.0*((soma2/pnt)-1012.0)/(4095.0-1012.0);
P3 = 30.0*((soma3/pnt)-1012.0)/(4095.0-1012.0);
P4 = 15.0*((soma4/pnt)-1012.0)/(4095.0-1012.0);

tempo2 = clock();
ponto=(count-1)*500+cont;
/* tempo=(tempo2-tempo1)/CLK_TCK; */
tempo=ponto*0.01683564;

/* codigo responsavel pelo vazamento */

if(ponto==1000) write_dig(1);

/* codigo responsaveis pelo arquivo continuo dos dados */

fprintf(arq1,"%int ",ponto);
fprintf(arq1,"%f ",tempo);
fprintf(arq1,"%f ",P1);
fprintf(arq1,"%f ",P2);

```

```

fprintf(arq1,"%f ",P3);
fprintf(arq1,"%f \n",P4);

/* imprime continuamente no grafico */

ix =cont + 80;          /* coordenada x */
iy = 340.0 -10.0*P1;   /* coordenada y */
putpixel(ix,iy,10);    /* introducao do ponto */

ix =cont + 80;          /* coordenada x */
iy = 340.0 - 10.0*P2;  /* coordenada y */
putpixel(ix,iy,14);    /* introducao do ponto */

ix = cont+ 80;          /* coordenada x */
iy=340.0 - 10.0*P3;    /* coordenada y */
putpixel(ix,iy,12);

ix = cont+ 80;          /* coordenada x */
iy = 340.0 - 10.0*P4;  /* coordenada y */
putpixel(ix,iy,11);    /* introducao do ponto */

}

/* ----- */
/*          CONSTRUCAO DOS EIXOS X E Y          */
/* ----- */
void eixos()
{
char buf;
double ticx,ticy;
int i,ix,iy;

setttextjustify(1,0);
setttextstyle(0,0,1);

line(80,40,80,340);
line(80,400,640,400);

for(i=0;i<=500;i=i+100)
{
ix = i + 80;
line(ix,400,ix,406);
ticx = 1.0*i+500*(count-1);
gcvt(ticx,3,&buf);
outtextxy(ix+2,420,&buf);
}
ticy = 31.0;

```

```

for(i=10;i<=310;i=i+10)
{
  iy = i + 30;
  line(75,iy,80,iy);
  ticy = ticy - 1.0;
  gcvt(ticy,3,&buf);
  outtextxy(50,iy+4,&buf);
}
settextjustify(1,0);
settextstyle(0,0,1);
outtextxy(540,450,"pontos");
settextjustify(1,1);
settextstyle(0,1,1);
outtextxy(15,150,"Pressao (psi)");
settextstyle(0,0,1);
}

/*-----*/
/*          SUBROTINA DE SELECAO DO ACIONAMENTO DE TECLAS          */
/*-----*/
int get_key(void)
{
  int key,lo,hi;
  key = bioskey(0);
  lo = key & 0X00FF;
  hi = (key & 0XFF00) >> 8;
  return((lo == 0) ? hi + 256 : lo);
}

/*-----*/
/*          INICIO DAS ROTINAS DE TRATAMENTO DA AD/DA          */
/*-----*/
/*          SELECAO DO CANAL DO MUX DA ENTRADA E              */
/*          DA SAMPLE NA ENTRADA                              */
/*-----*/
selchad(unsigned char canal)
{
  unsigned char chad;
  chad = canal << 5;          /* Posiciona o end do mux (badchan) */
  chad &= 0xe0;             /* Isola somente badchan0-2 */
  outportb(base + CTL,chad); /* Selecciona o canal */
  modoper |=BSHEAN;        /* Introduz bit de sample */
  outportb(base + ADSTS,modoper); /* Sample-hold da inani em sample */
  modoper &= ~BSHEAN;      /* Retira bit de sample */
  outportb(base + ADSTS,modoper); /* Sample-hold da inani em hold */
  return(canal);
}

```

```

/*----- */
/*  SELECIONA O CANAL DO MUX DE SAIDA E DA SAMPLE NA SAIDA  */
/*----- */
void selchda(unsigned char canal)
{
    unsigned char chda;
    canal &= 0x07;      /* Isola */
    chda = (canal << 5); /* Posiciona o end do mux (badchan0-2) */
    chda |= canal;     /* Soma c/ o mux do sample-hold (badchan0-2) */
                        /* Seleciona o canal+sample-hold corresp */
    chda |=BSHSA;     /* Introduz o bit de sample */
    outportb(base + CTL,chda); /* Coloca o sample-hold do canal em sample */
}

/*----- */
/*          ROTINA DE ESPERA DO FIM DA CONVERSAO          */
/*----- */
wait_eoc()
{
    unsigned register int ciclos,status;
    for (ciclos = TIME_OUT;ciclos;ciclos --)
        return;
}

/*----- */
/*          ROTINA DE LEITURA DO CONVERSOR                */
/*          Parametro de entrada: numero do canal          */
/*          Parametro de saida: retorna o valor da conversao */
/*          se ocorrer erro retorna -1                      */
/*----- */
unsigned int read_anl(unsigned char canal, unsigned char offset)
{
    unsigned int dadols,dadoms;
    unsigned int dado;
    selchad(canal);
    outportb(base+ADOFF,offset); /* Normalisa o valor do offset */
    dadols = inportb(base+ADLSB); /* Envia o start ao ad */
    wait_eoc(); /* Delay para conversao */
    dadoms = inportb(base+ADMSB); /* Le os 4 bits mais significativos*/
    dadols = inportb(base+ADLSB); /* Le os 8 bits menos significativos */
    dado = (dadoms << 8) + dadols;
    return(dado);
}

/*----- */
/*          ESCREVE O VALOR DE DADO NA SAIDA ANALOGICA DE 'canal'  */
/*----- */

```

```

void write_anl(unsigned int dado,unsigned char canal)
{
    unsigned char dadols,dadoms;
    dadols = dado;          /* Inicia o deslocamento do dado */
    dadoms = dado >> 8;    /* Desloca os 2 bits mais signific. */
    outportb(base + DALSB,dadols); /* Escreve byte menos significativo */
    outportb(base + DAMSB,dadoms); /* Escreve byte mais significativo */
    selchda(canal);        /* Trans. para o canal de s. desejado */
    return;
}

/*----- */
/*          ESCREVE NAS ENTRADAS DIGITAIS          */
/*----- */
void write_dig(char dado)
{
    outportb(base + IODIG,dado);
}

/*----- */
/*          ALGORITMO PARA AJUSTE AUTOMATICO DE OFFSET          */
/*          Retorna os seguintes valores:          */
/*          100h -> Se nao existe o sinal de referencia de 3.500V na          */
/*                   entrada analogica 7          */
/*          200h -> Se em 4 tentativas de ajustar o offset isto nao          */
/*                   for conseguido          */
/*          Num -> De 0h a 0FFh que e o valor p/ zerar o offset          */
/*----- */
unsigned int adj_offset()
{
    unsigned int in1,in2,i,inatual,trigger = 0x800;
    unsigned char flag = 0,delay;
    if(modoper & 0x01) /* modo 1 a 5V? */
        trigger = 0xa00; /* sim, armazene a00h como valor de comparacao */
    else
        trigger = 0xb33;
    inatual = read_anl(7,140); /* le a entrada de refer centrando o offset */
    if(inatual < (trigger - 0x100)) /* existe a referencia de (3500mV)? */
        return(0x100); /* nao, retorne uma condicao de erro */
    for(i=0;flag==0;++i) /* inicio do integ. p/ busca do ponto otimo */
    {
        inatual = read_anl(7,(i&0xff)); /* tente com i valor de offset */
        for(delay=0;delay<50;++delay) /* rotina para atraso */
            if(inatual == trigger) /* erro de leitura =zero? */
                flag = 1; /* termine a execucao pto encontrado */
        if(i == 0x400) /* feita o scan 4 vezes sem sucesso? */
            return(0x200); /* termine e retorne condicao de erro */
    }
}

```

```

    }
    return(i-1);          /* termine e retorne o valor ajustado */
}

/*----- */
/*   ROTINA PARA SELECAO AUTOMATICA DO MODO DE OPERACAO
      ACEITA OS SEGUINTEs PARAMETROS:          */
/*   n = 0 -> 0-5V (modo default)
      n = 1 -> 1-5V
      n = 2 -> 0-4V
      n = 3 -> bipolar
      OBS: modo de leitura do conversor: pooling          */
/*----- */
modo_oper(char n)
{
    unsigned char masc;
    masc=MASC0_5;        /* default operacao de 0-5V */
    switch(n)           /* scan do modo de operacao alternativo */
    {
        case 1:
            masc = MASC1_5;
            break;
        case 2:
            masc = MASC0_4;
            break;
        case 3:
            masc = MASCBIP;
            break;
    }
    modoper = masc;     /* armazena o modo de operacao setado */
    outportb(base+ADSTS,masc); /* envia a placa */
    return;
}

/*----- */

```

**APÊNDICE D**  
**Injeção de Bolhas Isoladas de Ar**

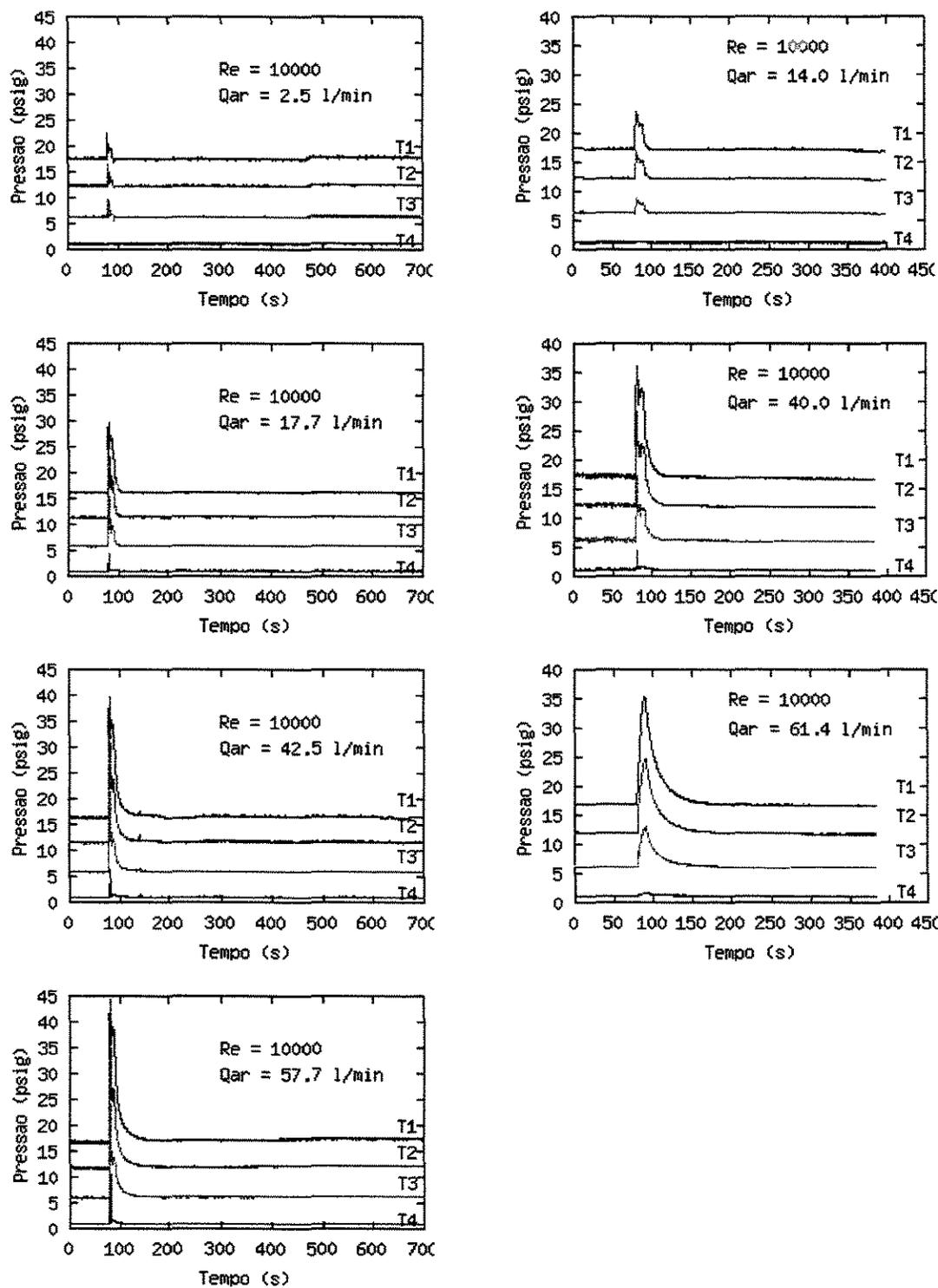


Figura D.1: Transientes de pressão. Injeção de bolhas isoladas de ar (Re=10.000, tempo de injeção =10 s).

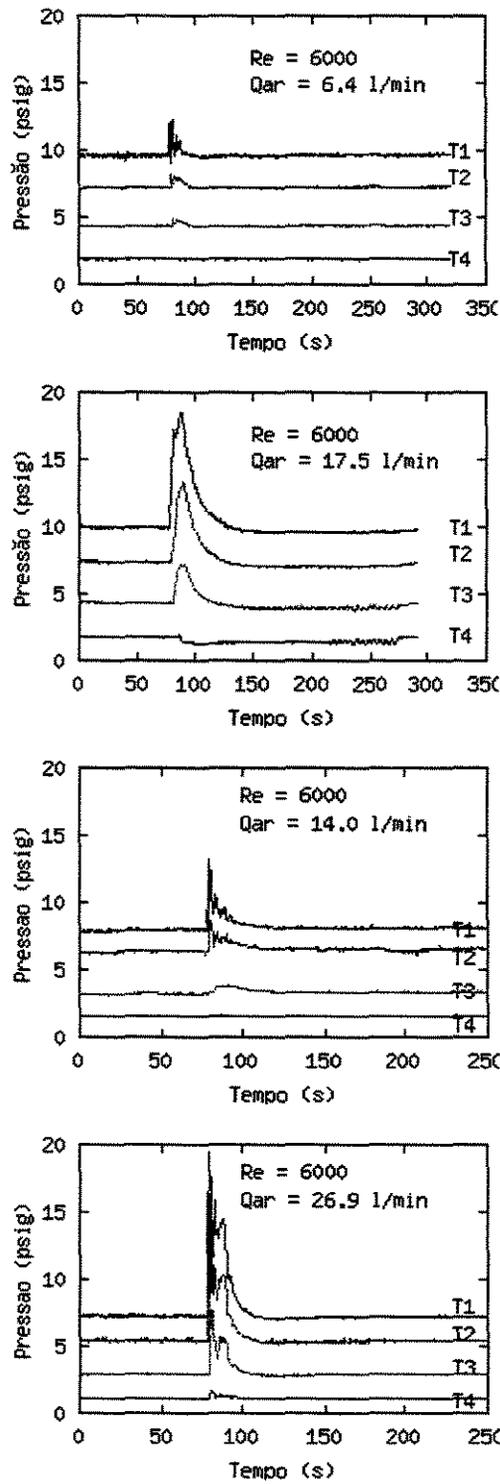


Figura D.2: Transientes de pressão. Injeção de bolhas isoladas de ar ( $Re=6.000$ , tempo de injeção = 10 s).

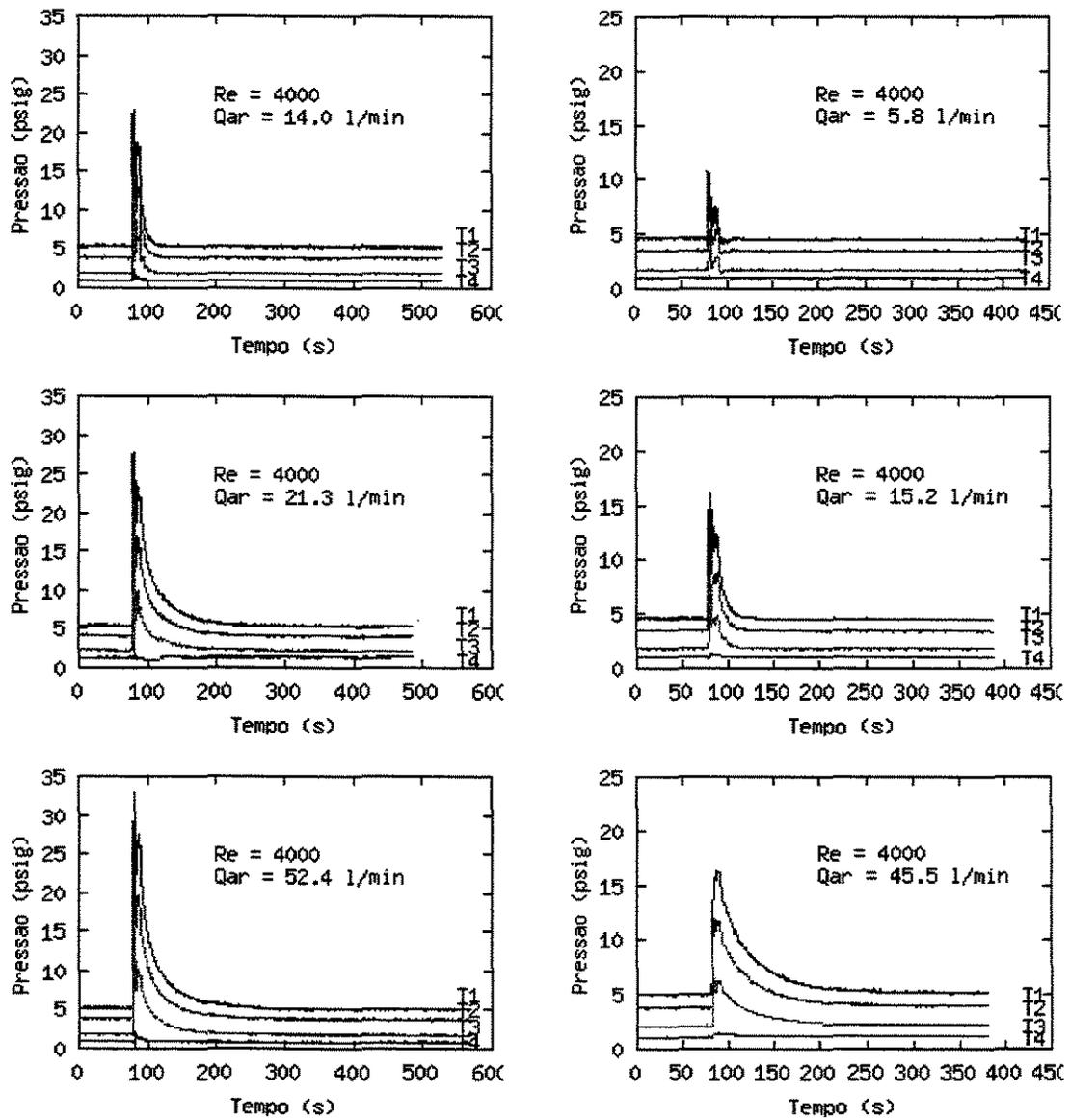


Figura D.3: Transientes de pressão. Injeção de bolhas isoladas de ar  
 ( $Re=4.000$ , tempo de injeção =10 s).

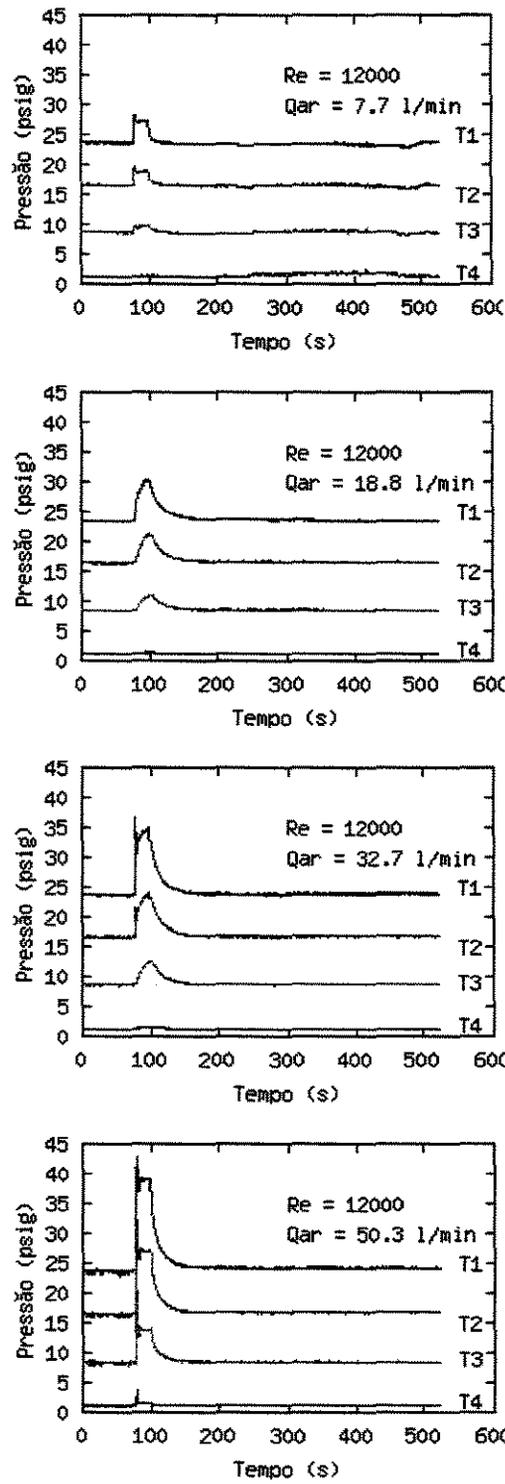


Figura D.4: Transientes de pressão. Injeção de bolhas isoladas de ar ( $Re=12.000$ , tempo de injeção =20 s).

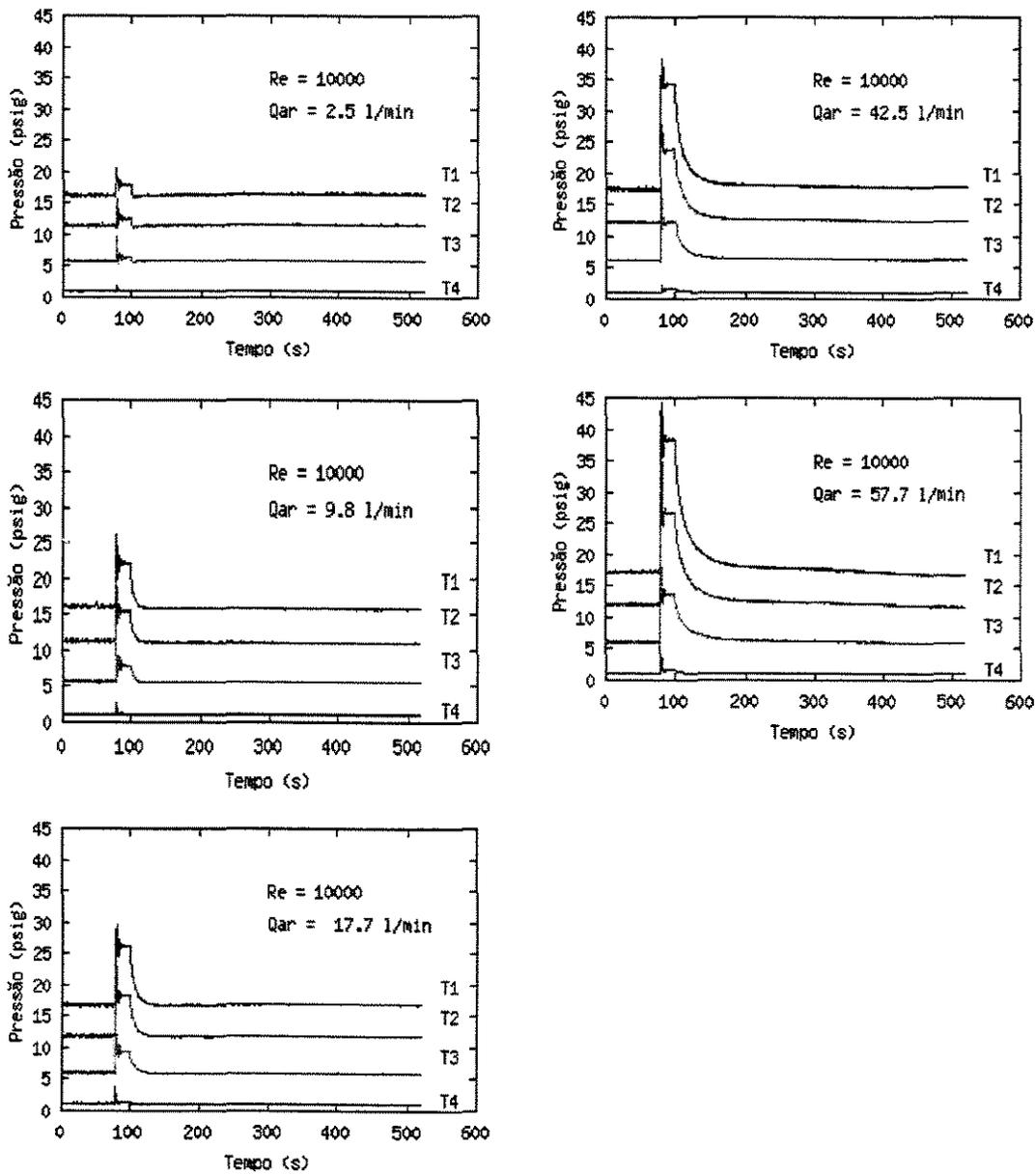


Figura D.5: Transientes de pressão. Injeção de bolhas isoladas de ar ( $Re=10.000$ , tempo de injeção =20 s).

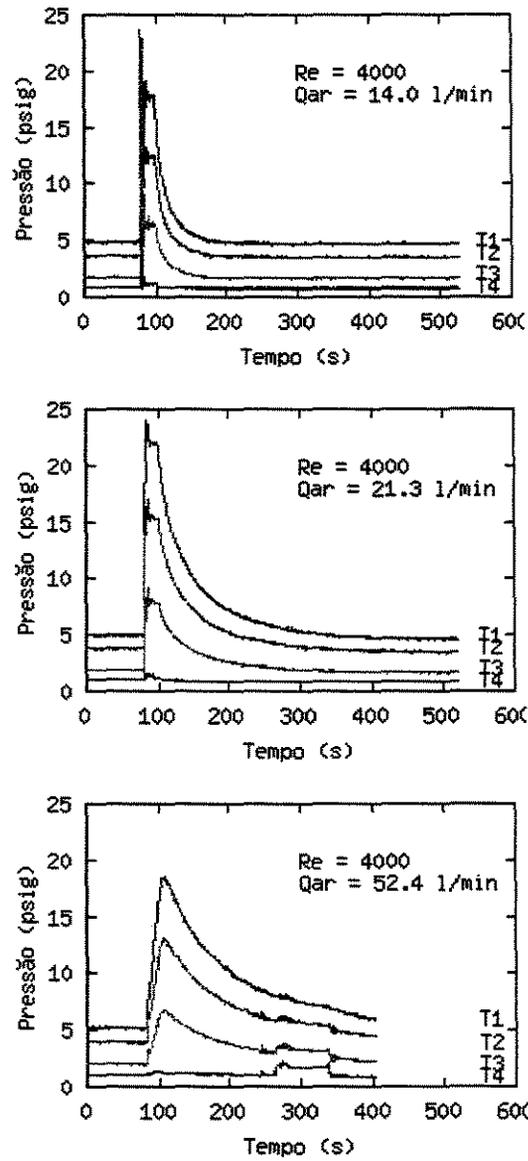


Figura D.6: Transientes de pressão. Injeção de bolhas isoladas de ar ( $Re=4.000$ , tempo de injeção =20s).

## **APÊNDICE E**

### **Transientes de pressão causados por vazamento na presença de uma única bolha**

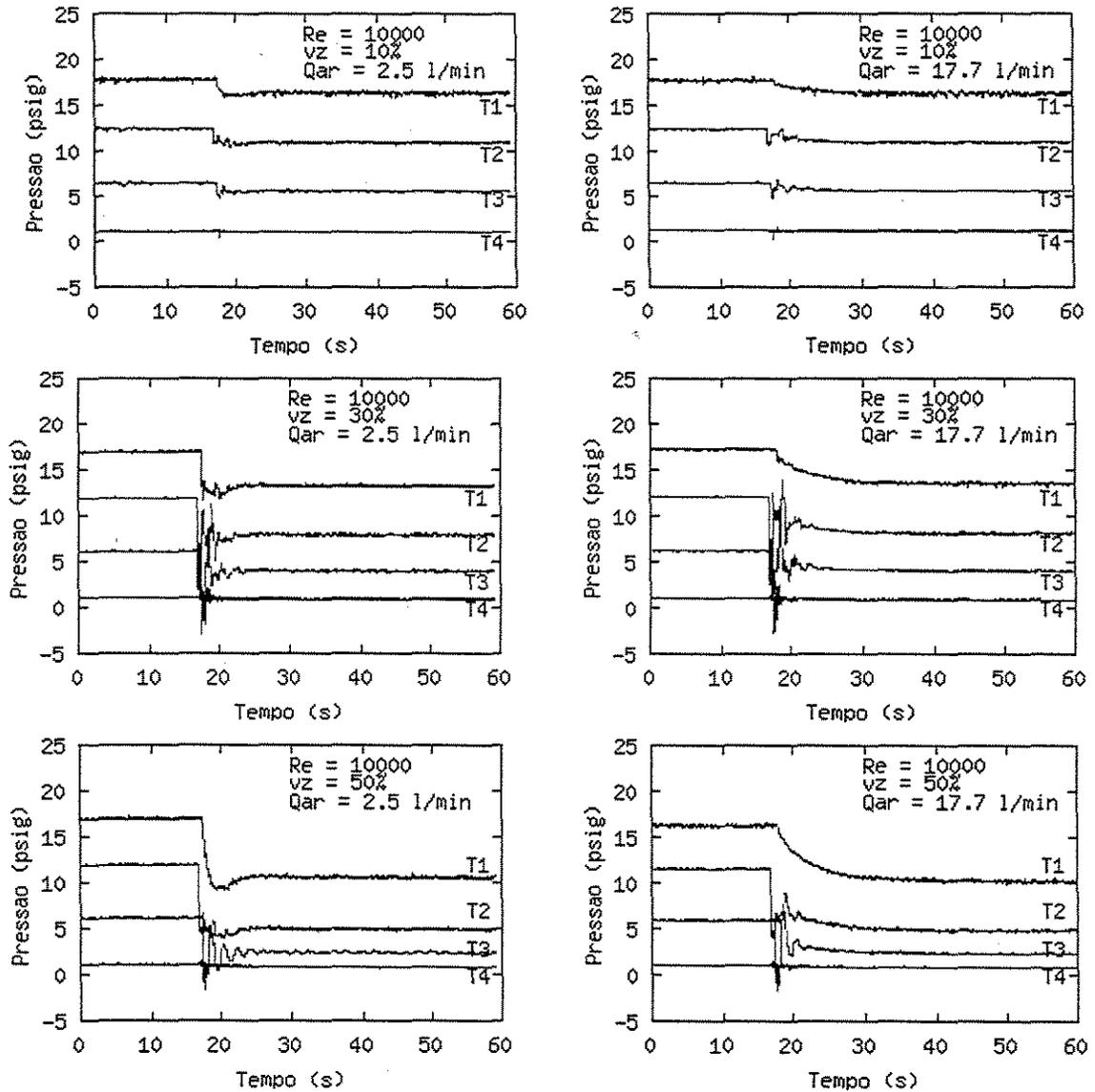


Figura E.1: Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolhas isoladas ( $Re = 10.000$ , posição do vazamento = 750 m).

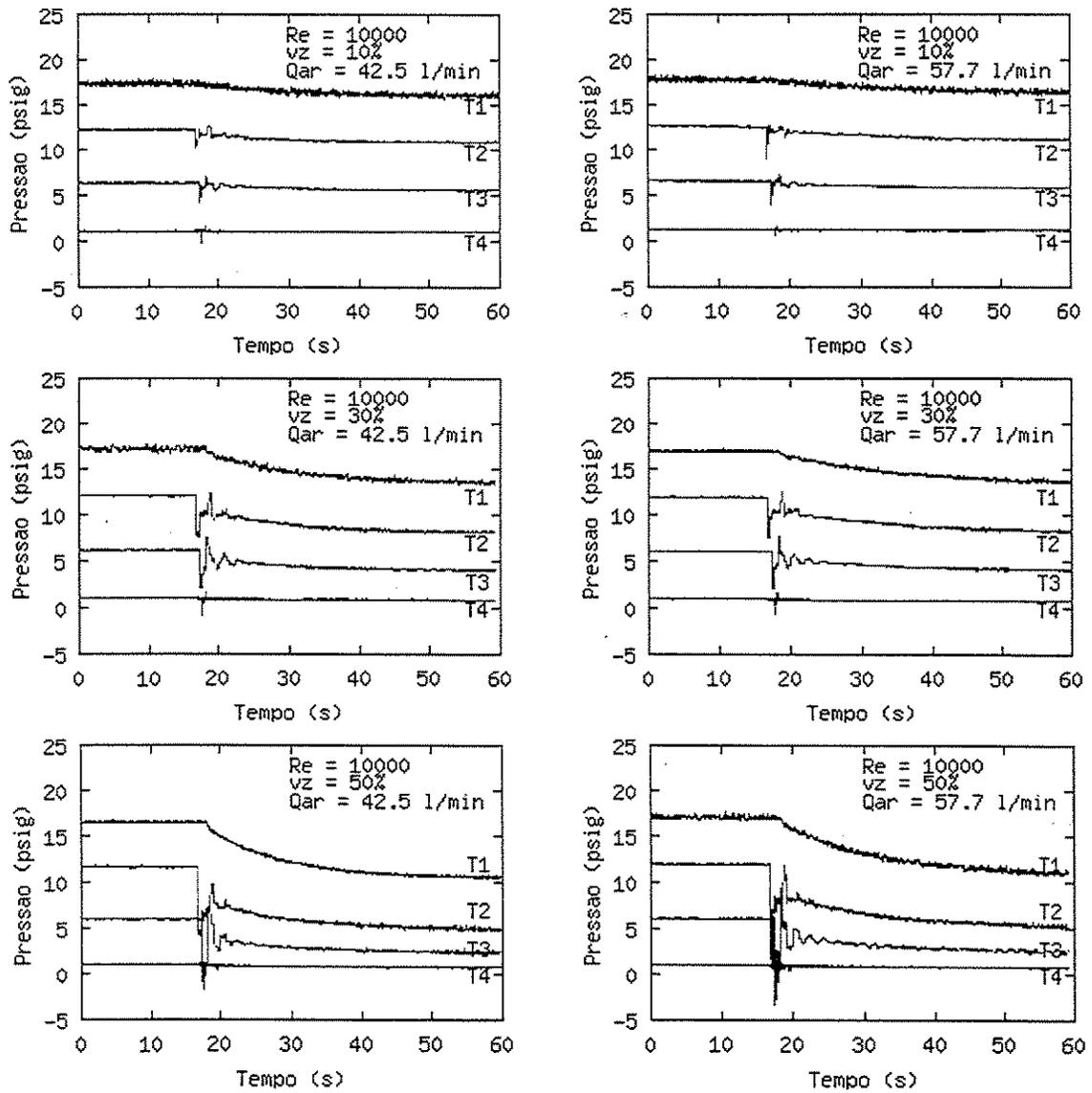


Figura E.2: Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolhas isoladas ( $Re = 10.000$ , posição do vazamento = 750 m).

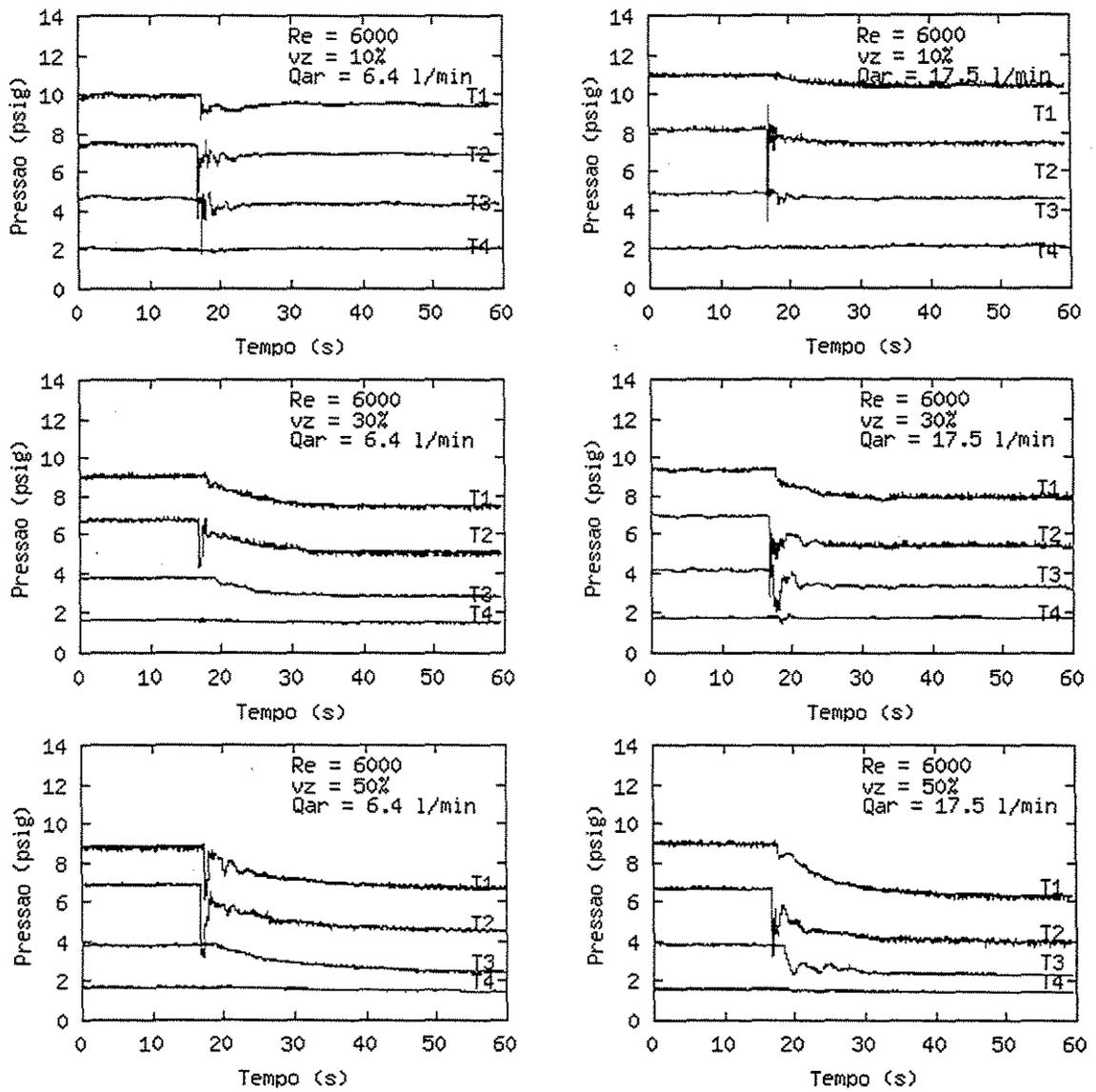


Figura E.3: Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolhas isoladas ( $Re = 6.000$ , posição do vazamento = 750 m).

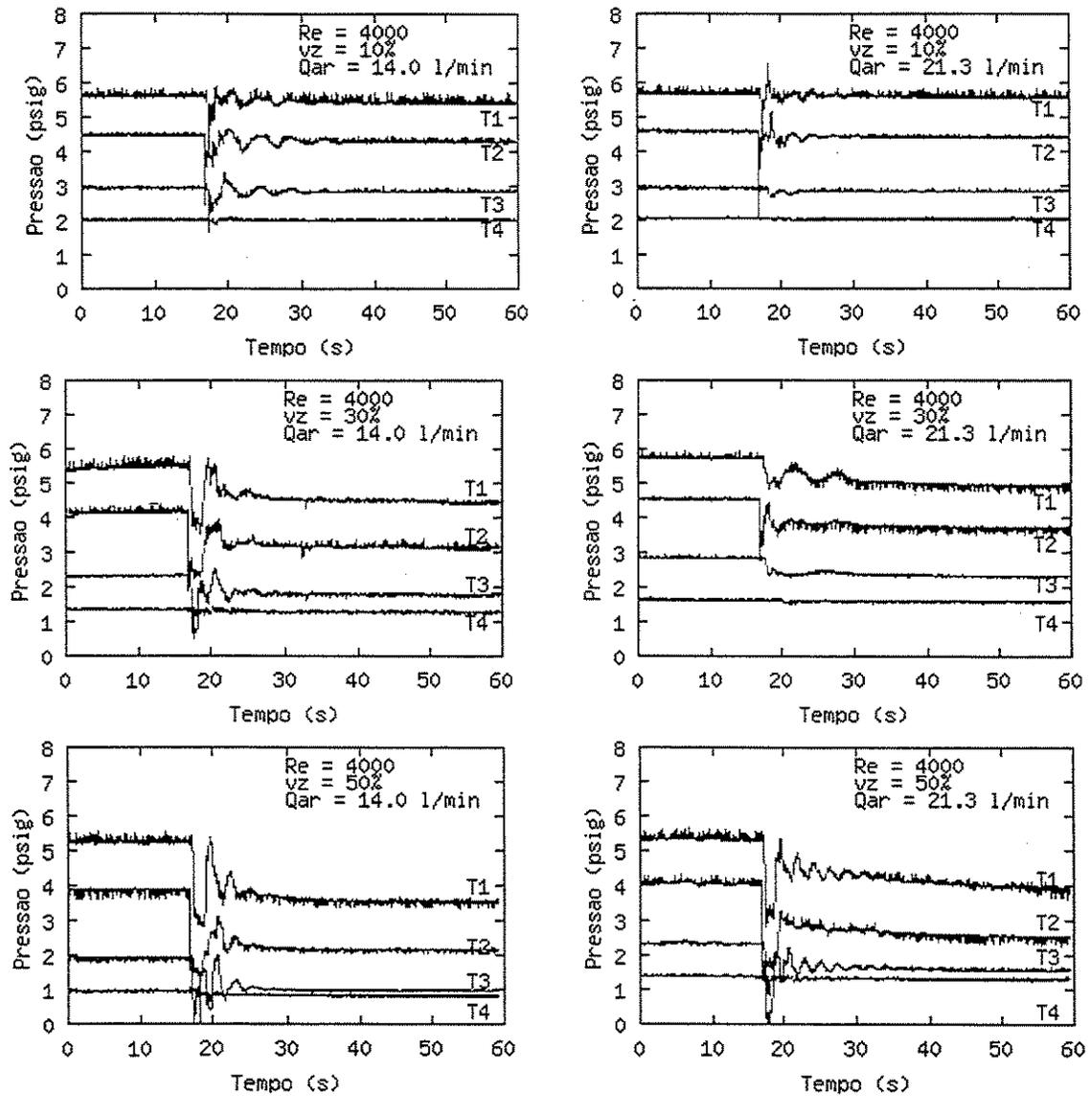


Figura E.4: Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolhas isoladas ( $Re = 4.000$ , posição do vazamento = 750 m).

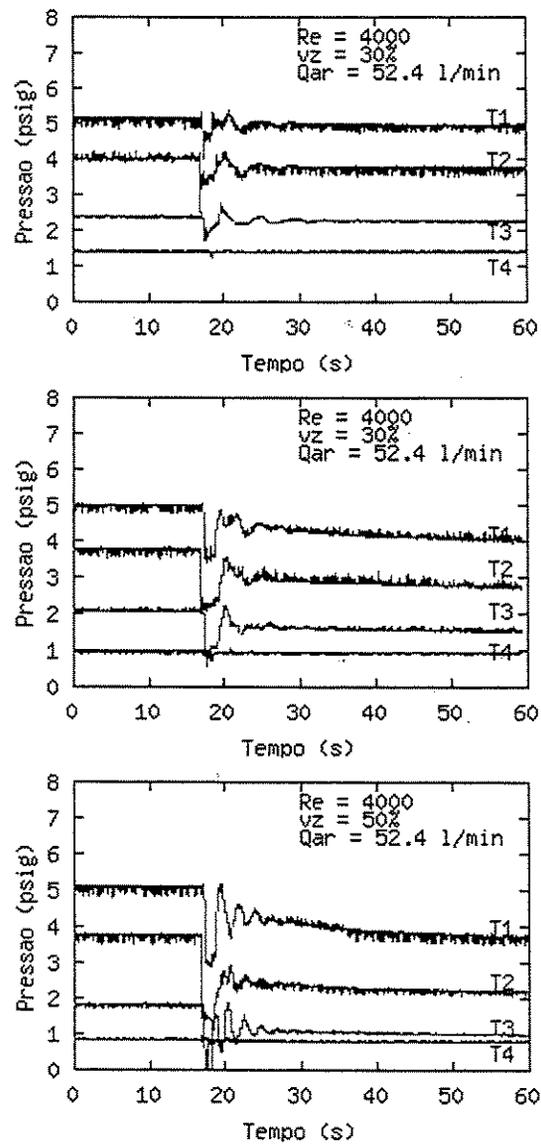


Figura E.5: Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolha isolada ( $Re = 4.000$ , posição do vazamento = 750 m).

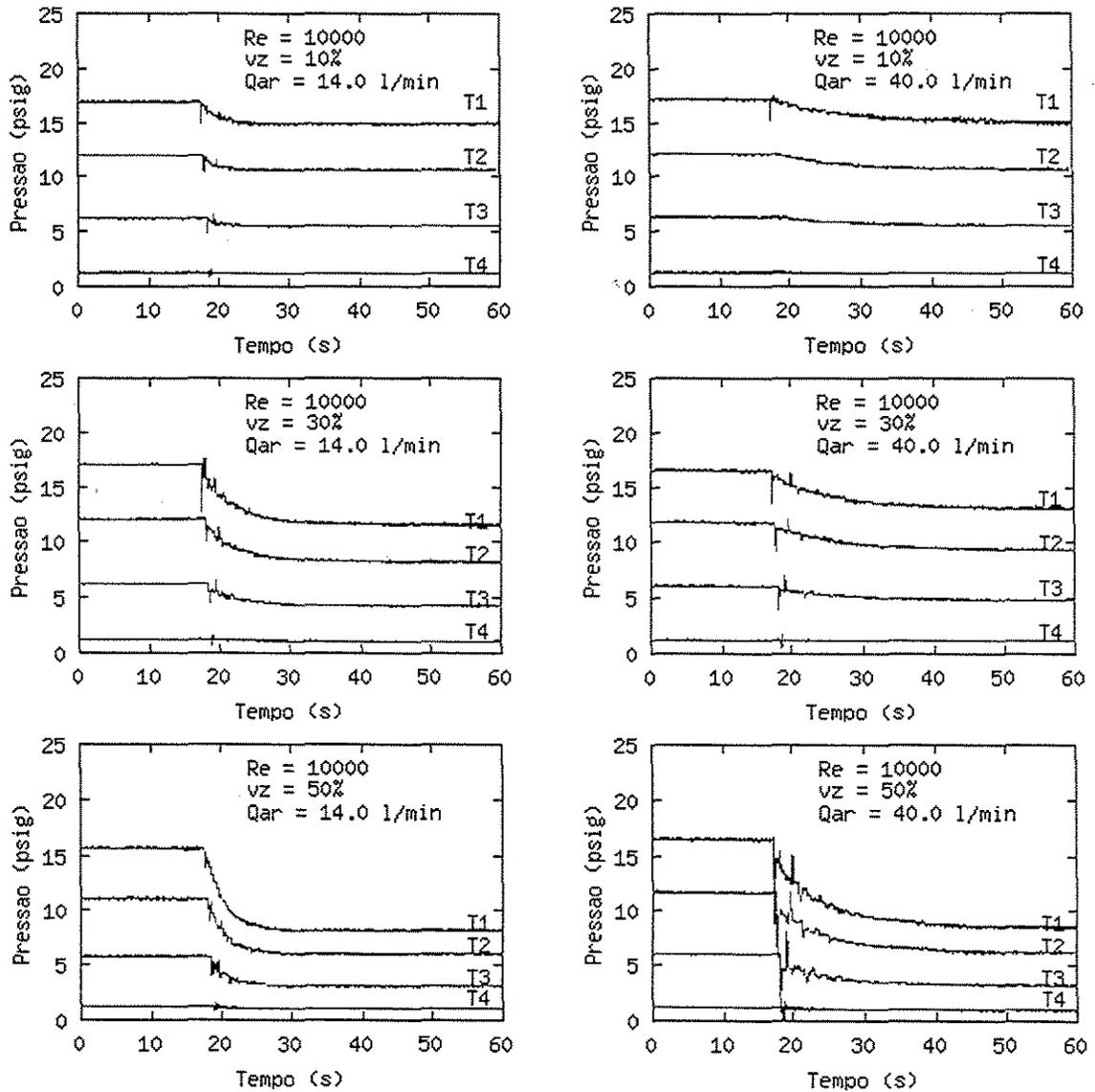


Figura E.6: Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolha isolada ( $Re = 10.000$ , posição do vazamento = 250 m).

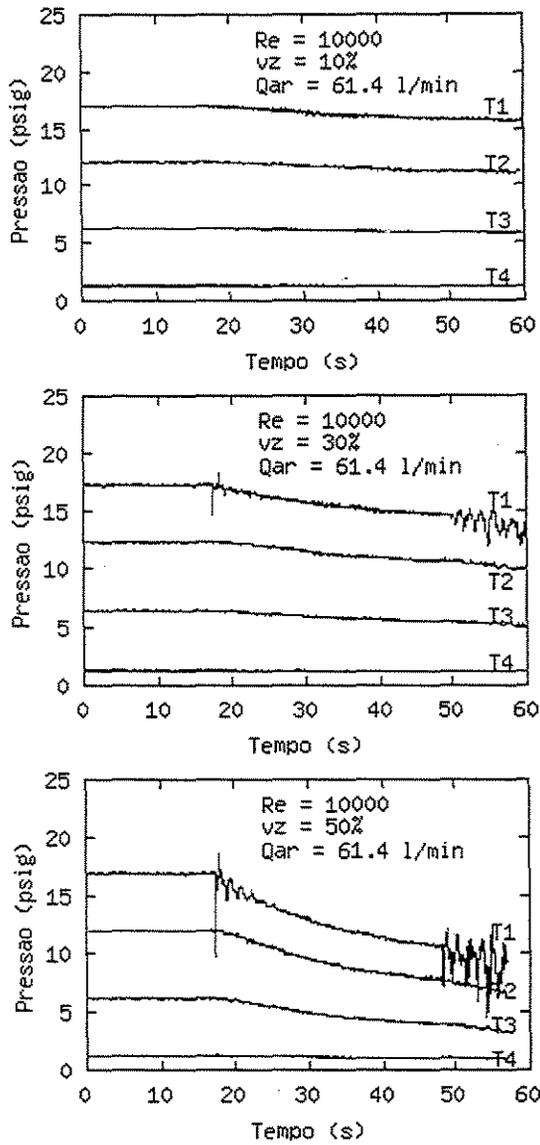


Figura E.7: Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolha isolada ( $Re = 10.000$ , posição do vazamento = 250 m).

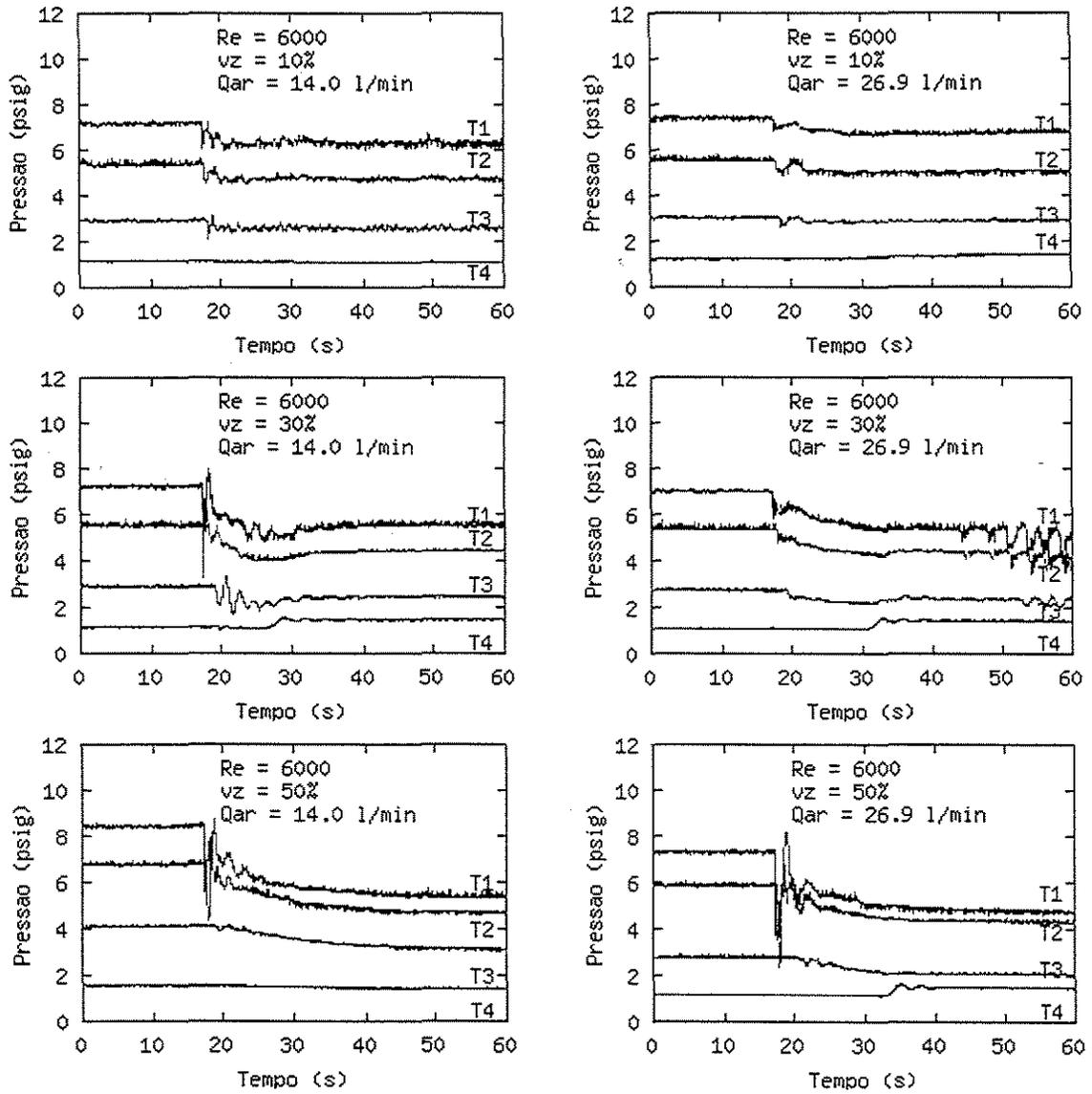


Figura E.8: Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolha isolada ( $Re = 6.000$ , posição do vazamento = 250 m).

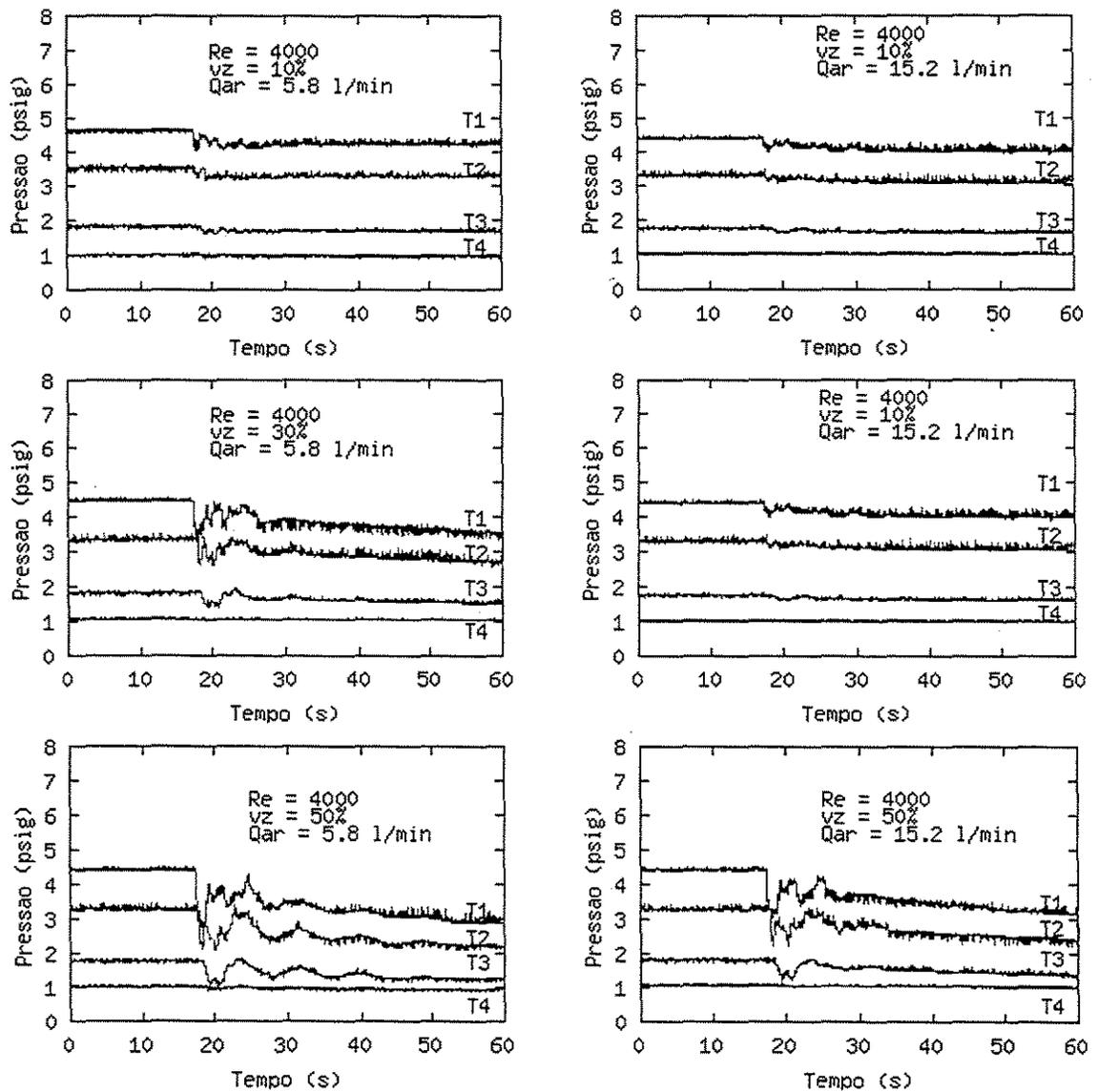


Figura E.9: Tansientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolha isolada ( $Re = 4.000$ , posição do vazamento = 250 m).

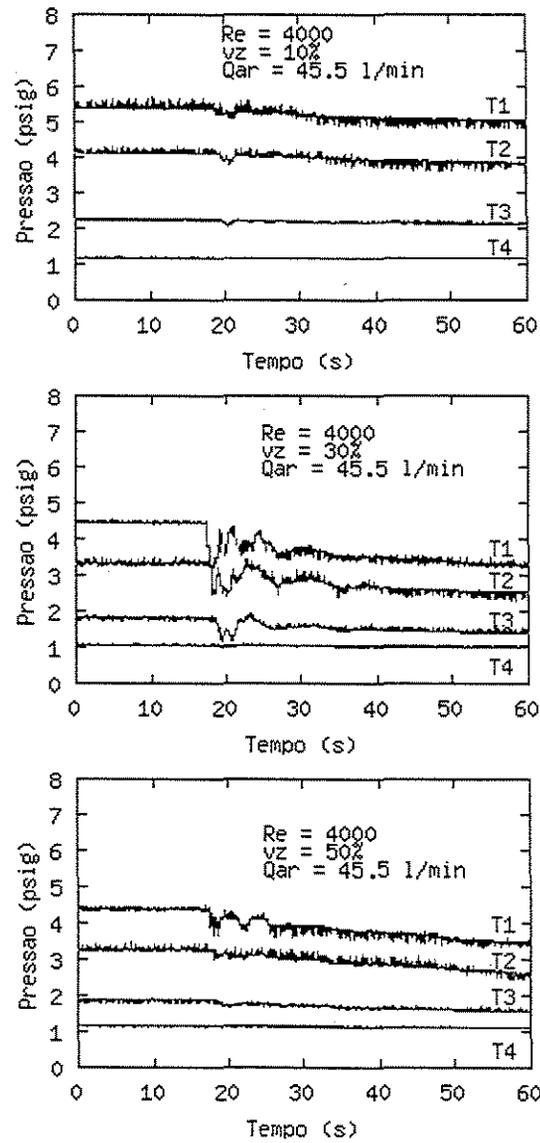


Figura E.10: Transientes de pressão gerados por vazamento, na presença de bolha isolada ( $Re = 4.000$ , posição do vazamento = 250 m).

## **APÊNDICE F**

### **Transientes de pressão causados por vazamento em tubulação transportando líquido**

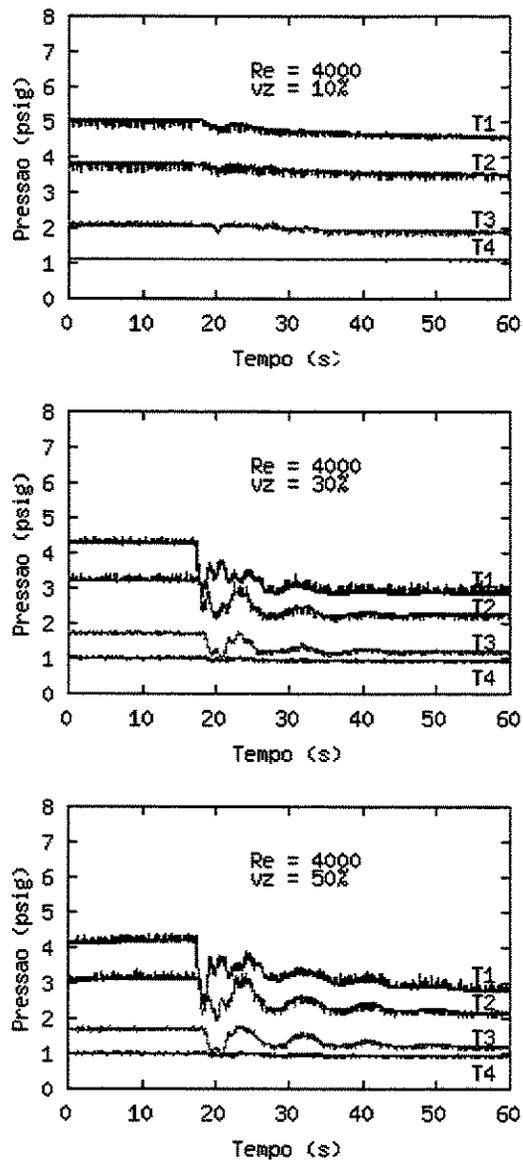


Figura F.1: Perfis de pressão para vazamento em tubulação transportando líquido (Re=4.000, posição do vazamento = 250 m).

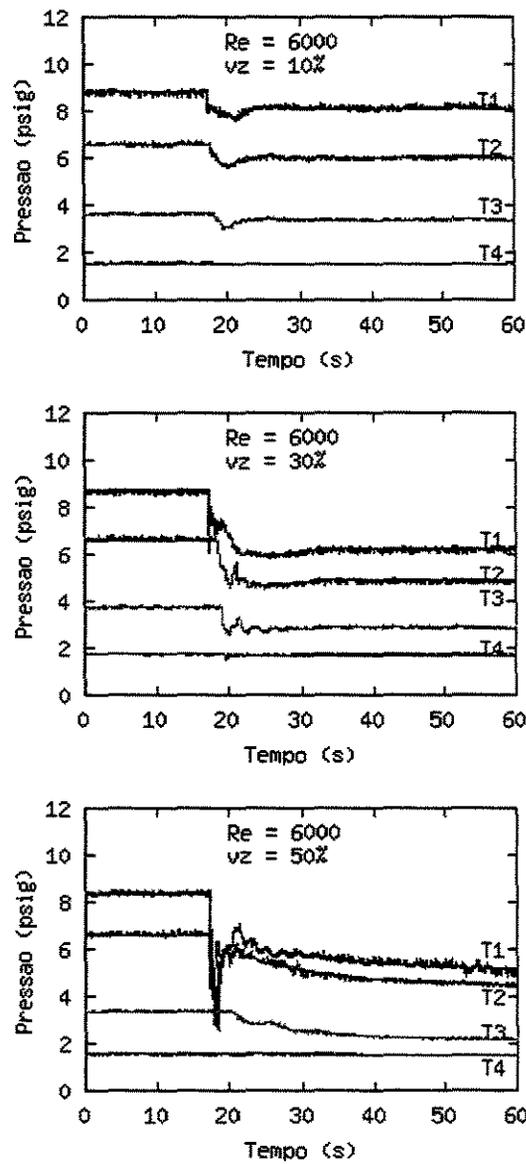


Figura F.2: Perfis de pressão para vazamento em tubulação transportando líquido (Re=6.000, posição do vazamento = 250 m).

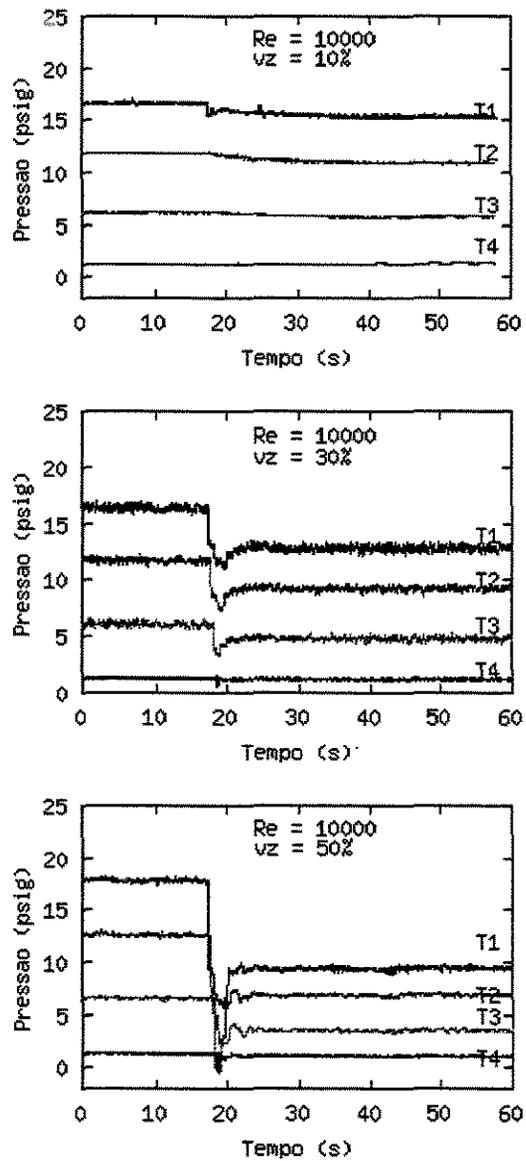


Figura F.3: Perfis de pressão para vazamento em tubulação transportando líquido (Re=10.000, posição do vazamento = 250 m).

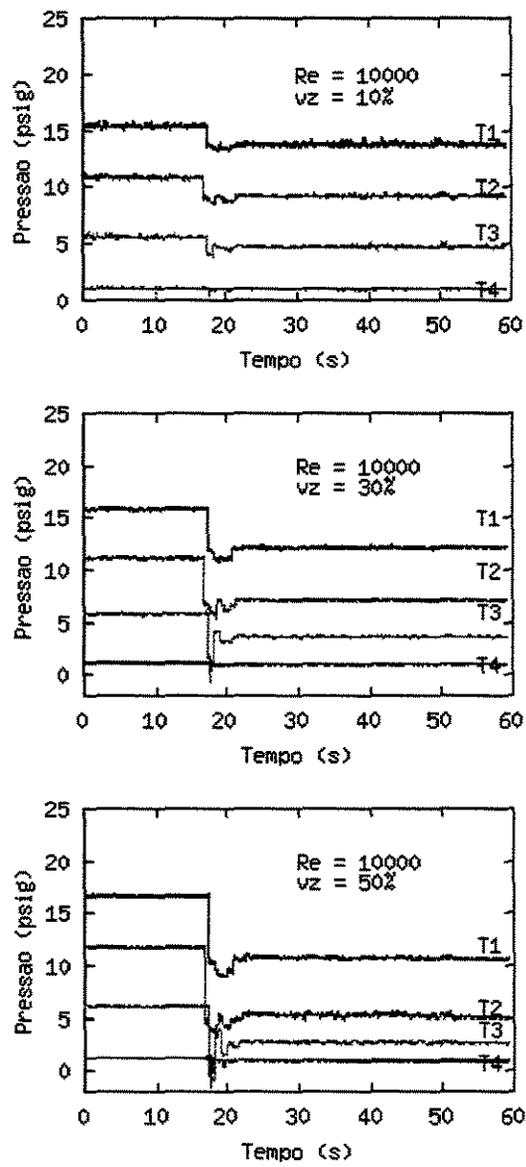


Figura F.4: Perfis de pressão para vazamento em tubulação transportando líquido ( $Re=10.000$ , posição do vazamento = 750 m).

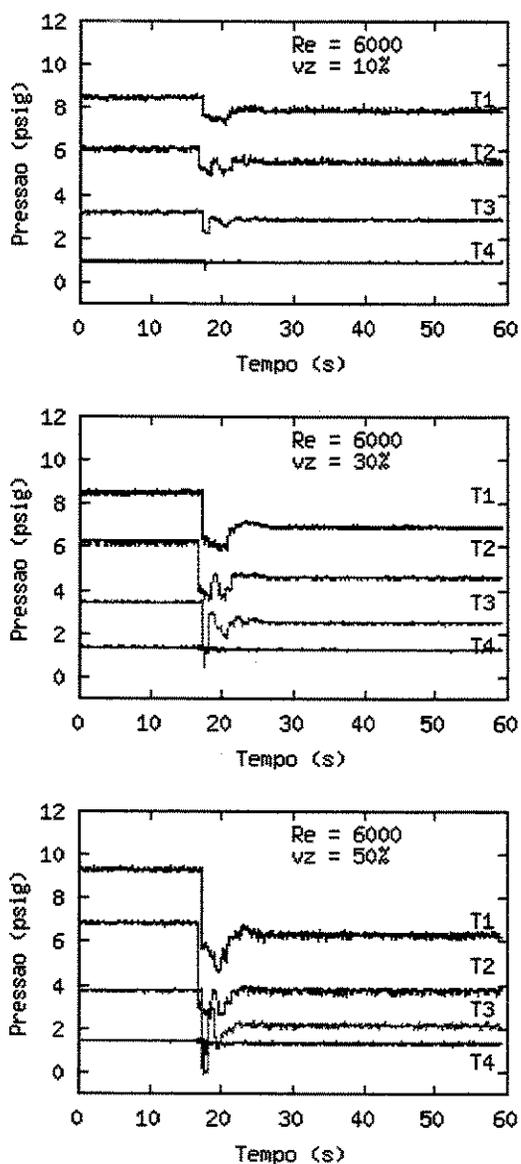


Figura F.5: Perfis de pressão para vazamento em tubulação transportando líquido (Re=6.000, posição do vazamento = 750 m).

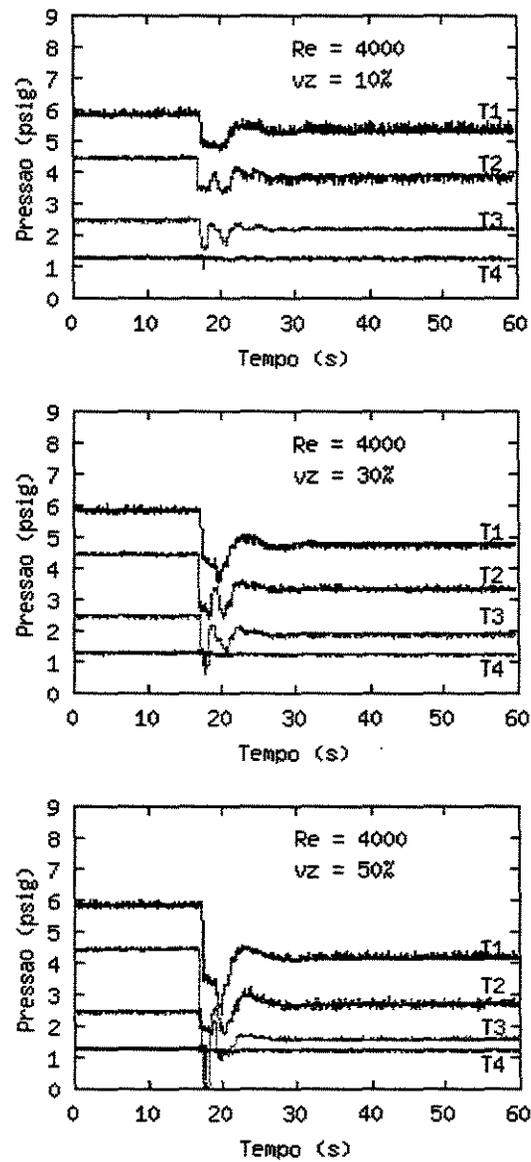


Figura F.6: Perfis de pressão para vazamento em tubulação transportando líquido (Re=4.000, posição do vazamento = 750 m).

## **APÊNDICE G**

### **Transientes de pressão causados por vazamento na presença de escoamento contínuo ar-agua**

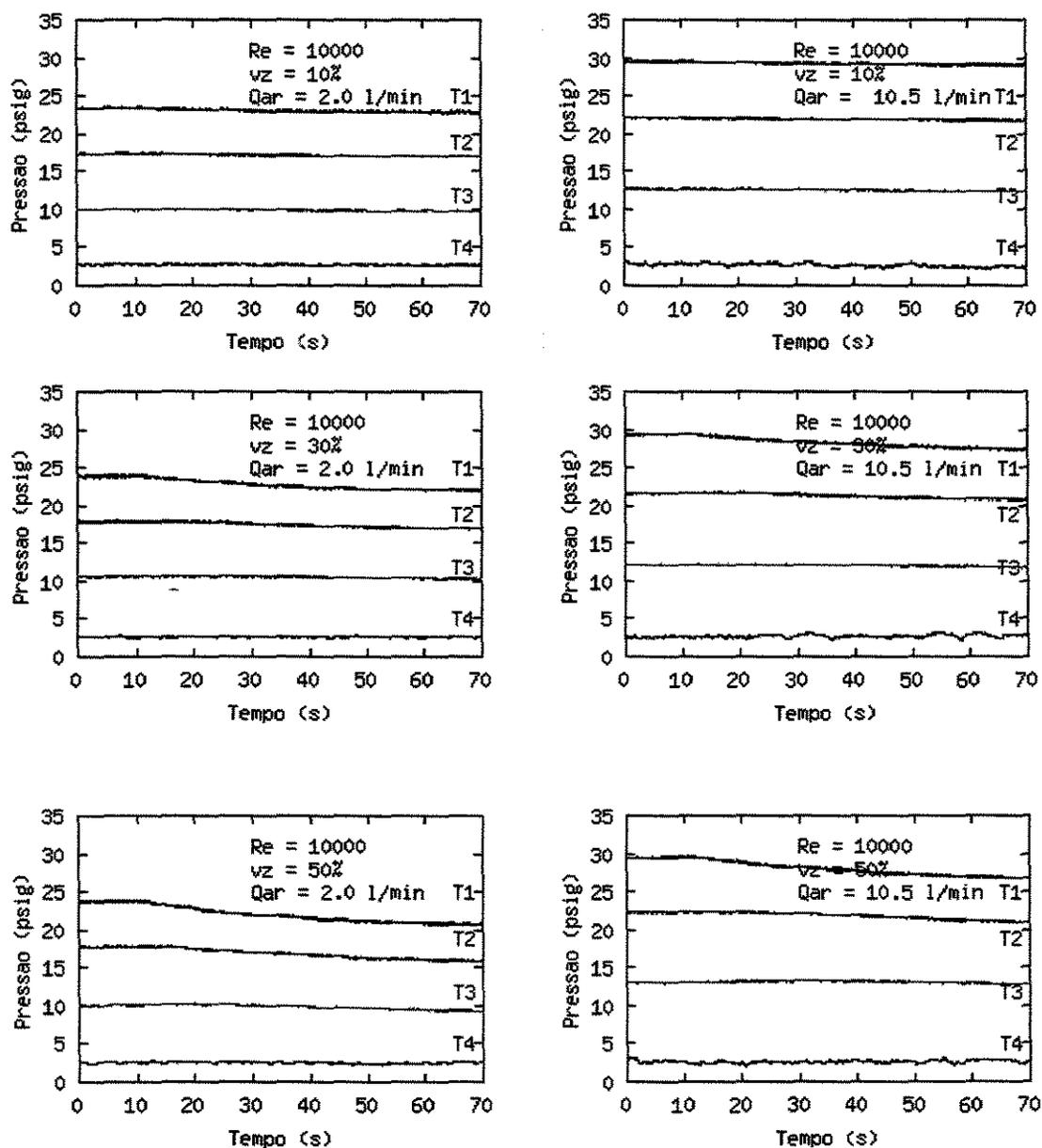


Figura G.1: Transientes de pressão durante escoamento contínuo ar-água  
( $Re = 10.000$ , posição do vazamento = 250 m).

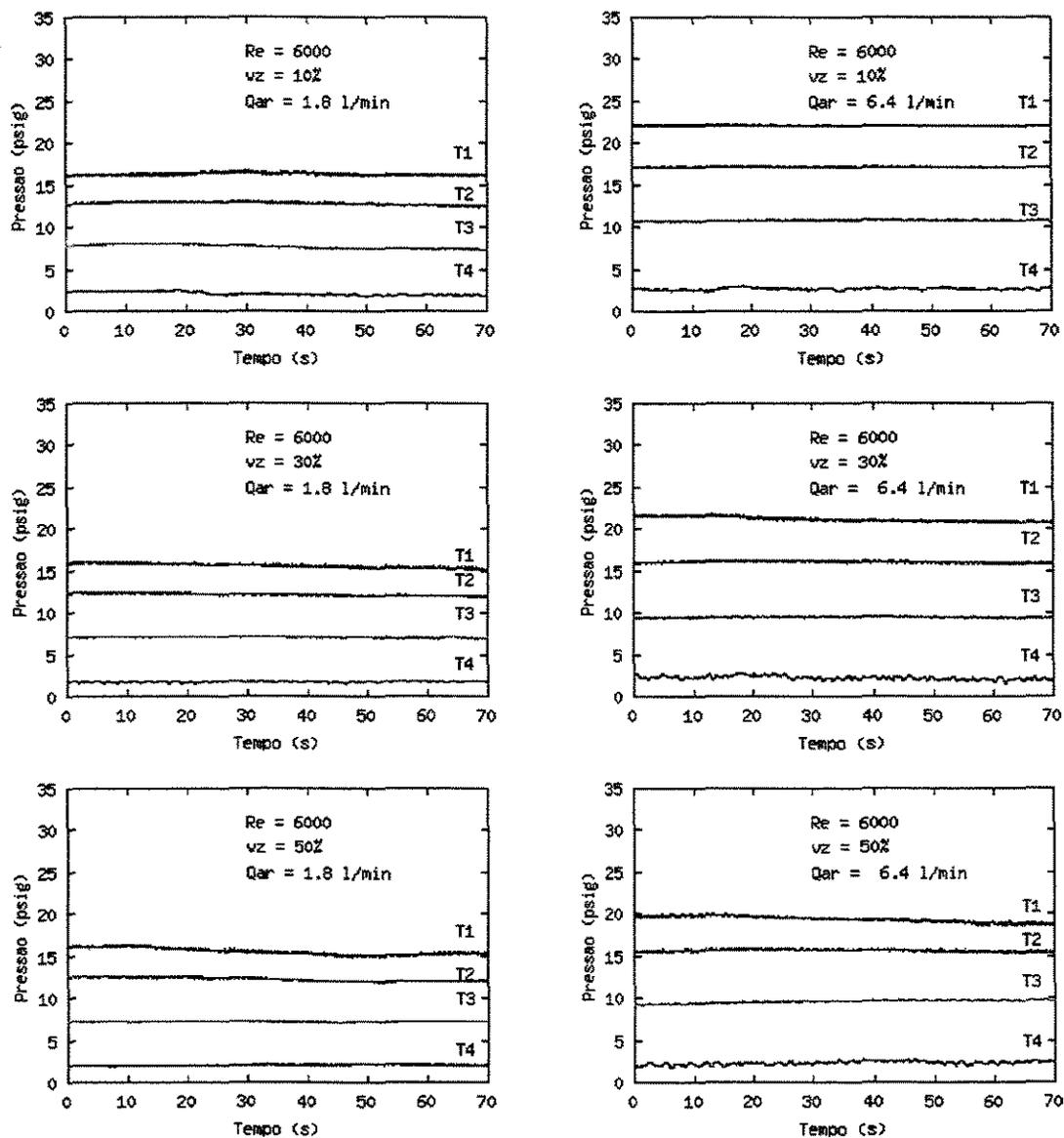


Figura G.2: Transientes de pressão durante escoamento contínuo ar-água  
 ( $Re = 6.000$ , posição do vazamento = 250 m).

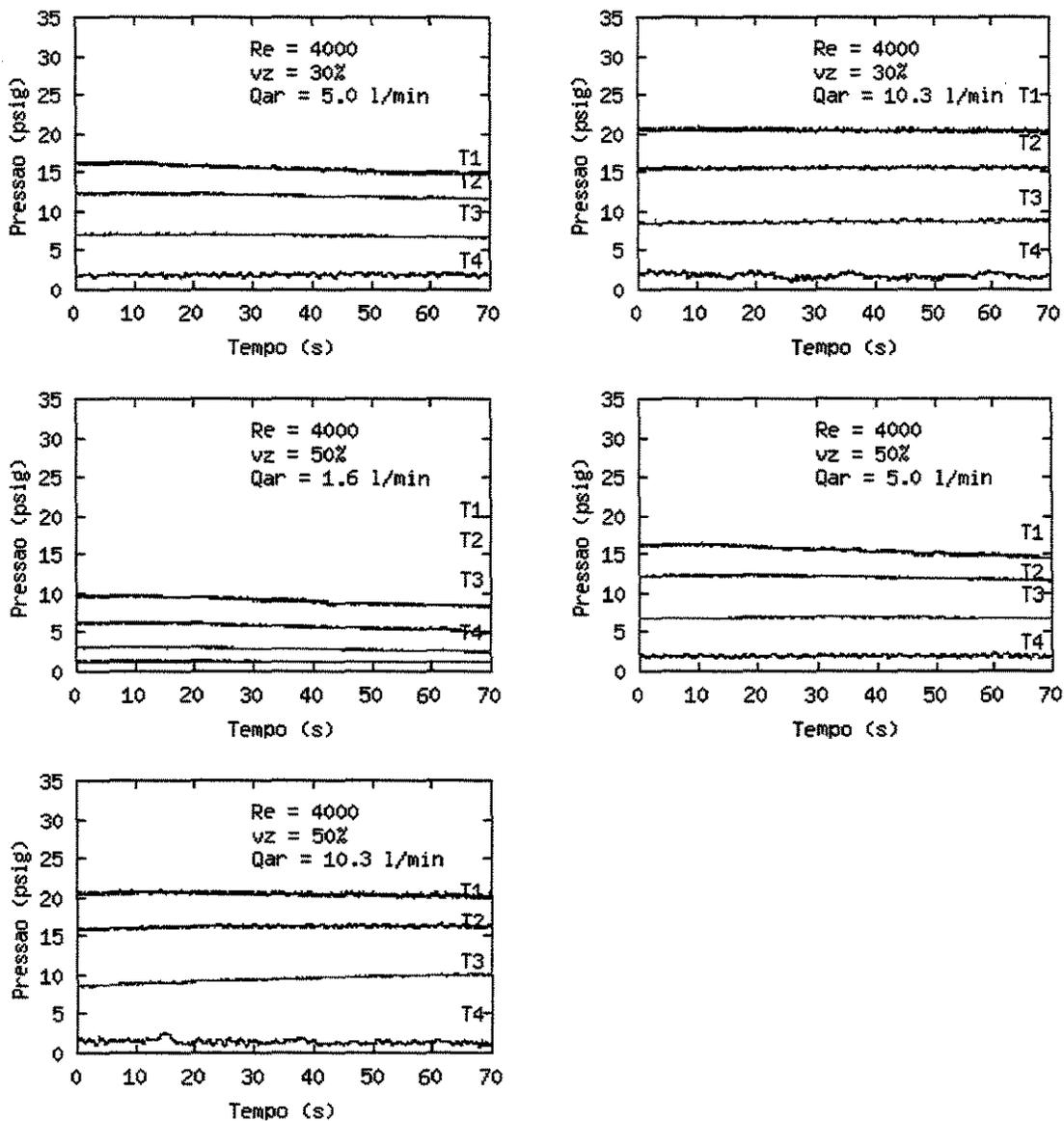


Figura G.3: Transientes de pressão durante escoamento contínuo ar-água  
(Re = 4.000, posição do vazamento = 250 m).

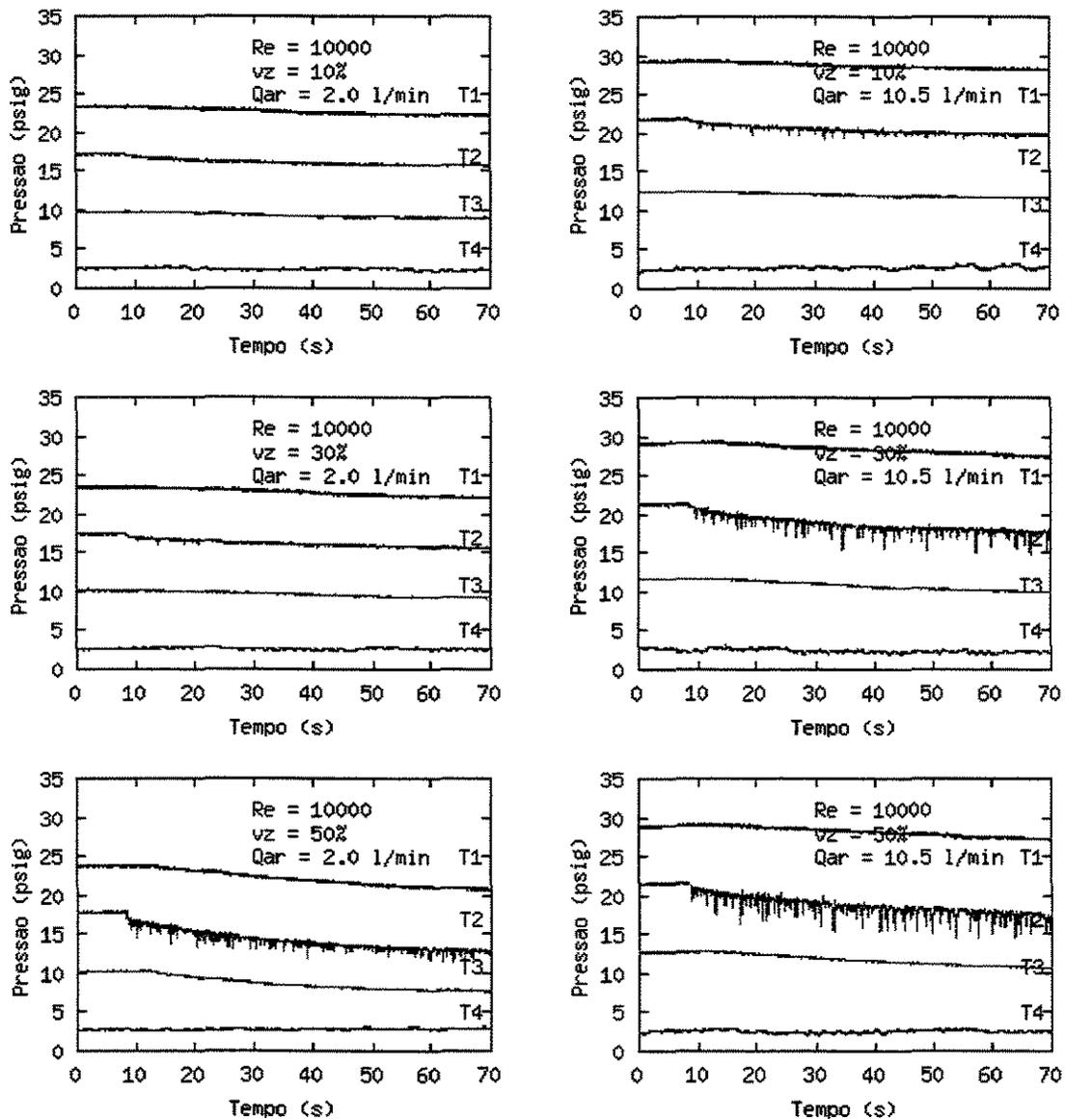


Figura G.4: Transientes de pressão durante escoamento contínuo ar-água  
 (Re = 10.000, posição do vazamento = 750 m).

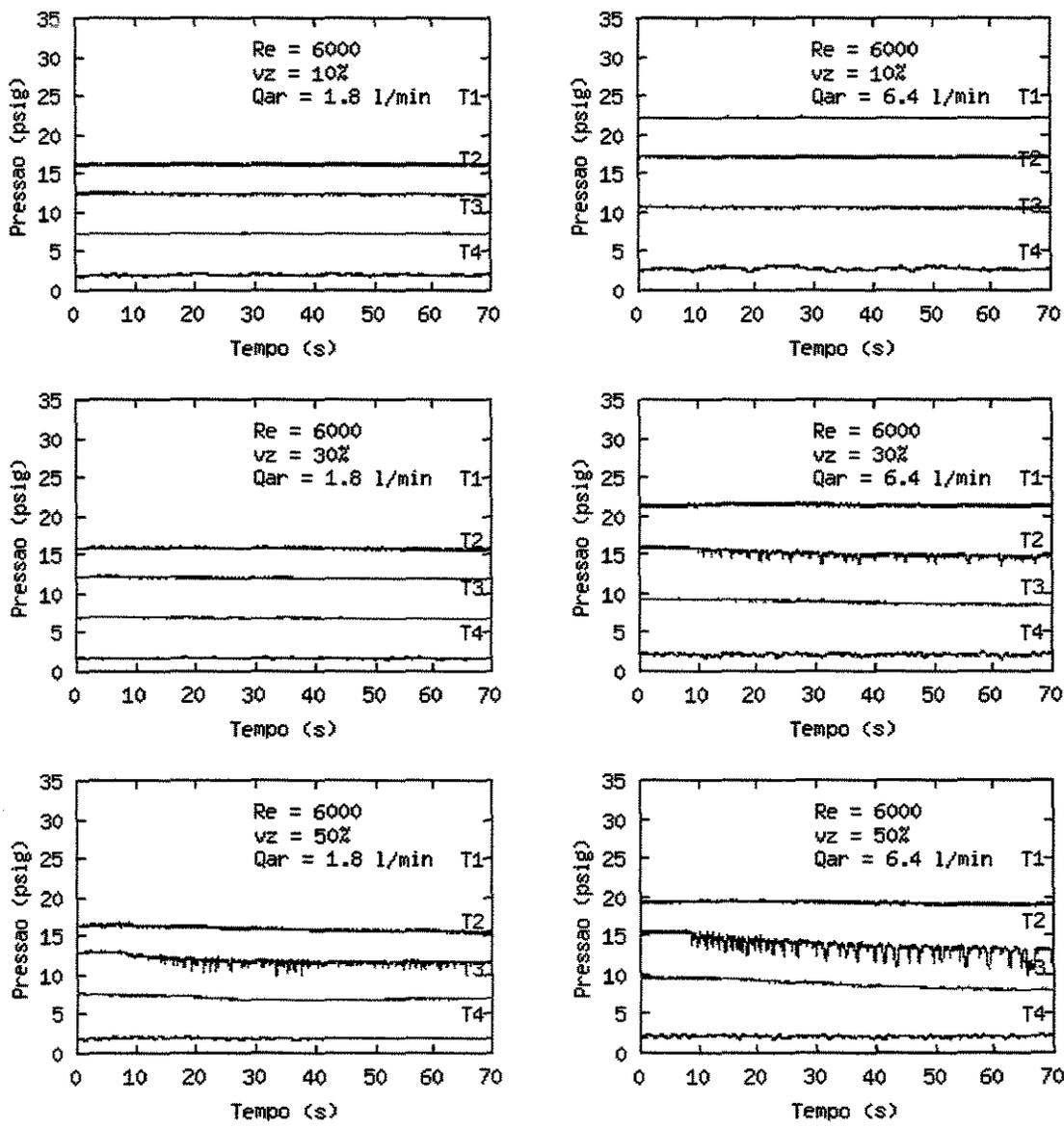


Figura G.5: Transientes de pressão durante escoamento contínuo ar-água  
 (Re = 6.000, posição do vazamento = 750 m).

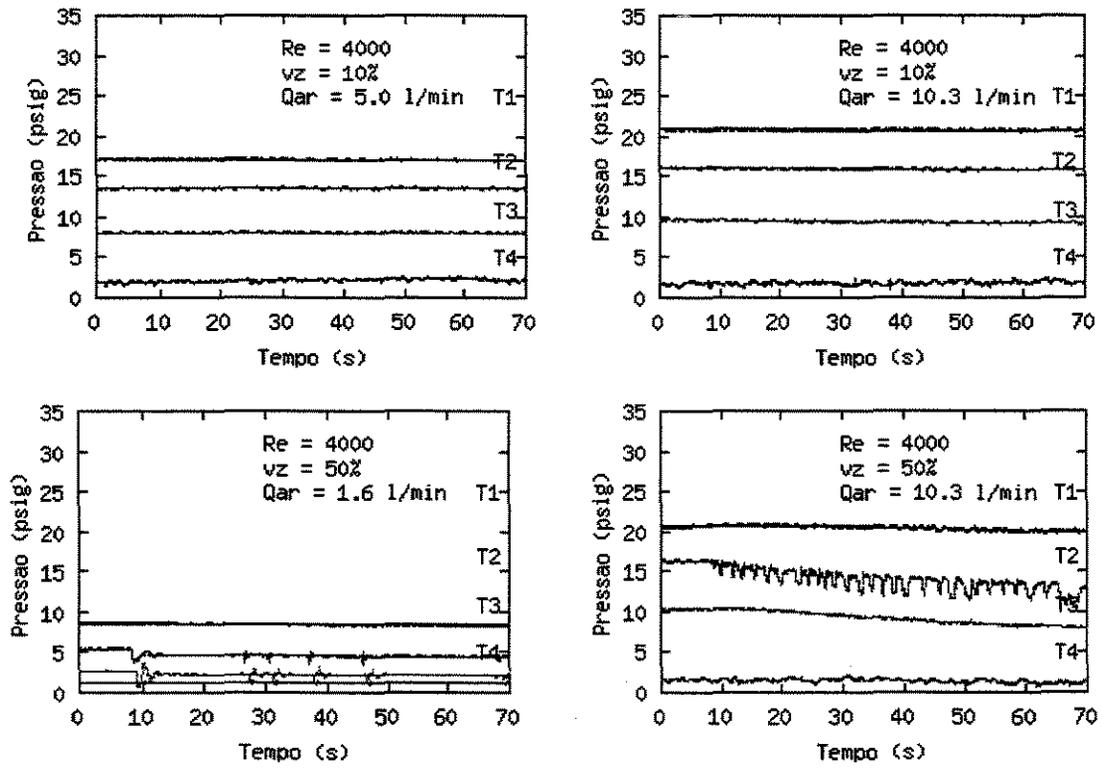


Figura G.6: Transientes de pressão durante escoamento contínuo ar-água  
 ( $Re = 4.000$ , posição do vazamento = 750 m).

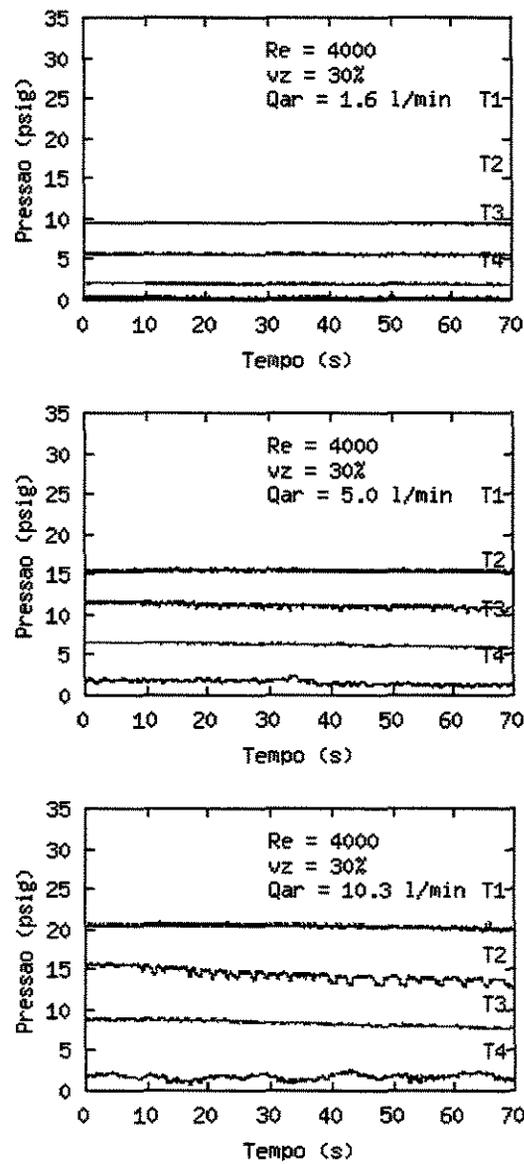


Figura G.7: Transientes de pressão durante escoamento contínuo ar-água  
 ( $Re = 4.000$ , posição do vazamento =  $750 \text{ m}$ ).