

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E
INFORMÁTICA

MONITORAMENTO DE TUBULAÇÕES POR TÉCNICAS COMPUTACIONAIS ON-LINE

Autor: **CLAUDIO MALAGONI BUIATTI**

Orientador: **Prof. Dr. JOÃO ALEXANDRE F.R. PEREIRA**

Co-orientadora: **Prof. Dra. SANDRA LÚCIA DA CRUZ**

Tese submetida à comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Campinas -SP - Brasil

Agosto - 1995

9818234



UNIDADE: BC
 CHAMADA: UNICAMP
B868m
 Ex.
 LINGUAGEM: BC/35093
 REG. 395/98
 C ☐ D ☒
 VALOR 2811,00
 DATA 16/09/98
 CPD

CM-00116011-5

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

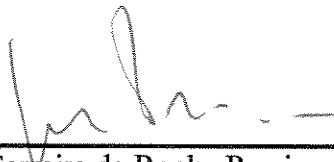
B868m Buiatti, Claudio Malagoni
 Monitoramento de tubulações por técnicas
 computacionais on-line. / Claudio Malagoni Buiatti.--
 Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientadores: João Alexandre F. R. Pereira, Sandra
 Lúcia da Cruz.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Mecânica dos fluidos. 2. Escoamento instável
 (Dinâmica dos fluidos). 3. Detectores de vazamento. I.
 Pereira, João Alexandre F. R. II. Cruz, Sandra Lúcia da.
 III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Química. III. Título.

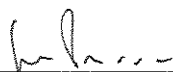
Esta versão corresponde a redação final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida pelo Eng. Cláudio Malagoni Buiatti e aprovada pela Comissão Julgadora em 24/08/95.



Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira

Orientador

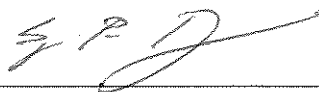
Dissertação de mestrado defendida e aprovada em 24 de agosto de 1995 pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:



Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira



Prof. Dr. Carlson Pereira de Souza



Prof. Dr. Sergio Persio Ravagnani

PREFÁCIO

Tempo virá em que uma pesquisa diligente e contínua esclarecerá aspectos que agora permanecem escondidos. O espaço de tempo de uma vida, mesmo que inteiramente devotada ao estudo da ciência, não seria suficiente para investigar um objetivo tão vasto... este conhecimento será conseguido somente através de gerações sucessivas.

Tempo virá em que nossos descendentes ficarão admirados de que não soubéssemos particularidades tão óbvias a eles... Muitas descobertas estão reservadas para os que virão, quando a lembrança de nós estará apagada.

O nosso universo será um assunto sem importância, a menos que haja alguma coisa nele a ser investigada a cada geração... A natureza não revela seus mistérios de uma só vez.

-Sêneca, *Problemas Naturais*

Livro 7, século I

DEDICATÓRIA

A meus pais, Zilto e Maria Aparecida, por todo amor, carinho e apoio, sem os quais a realização deste trabalho seria muito mais árdua.

MUITO OBRIGADO

A Adriana, que foi acima de tudo
minha amiga e companheira constante apesar
da distância e de todas as dificuldades.

Te Amo

A meus irmãos Flávio e Gustavo, por
serem os melhores irmãos do mundo.

Amo vocês

AGRADECIMENTOS

Ao **Prof. Dr. João A.F.R. Pereira**, por sua orientação e apoio em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho.

À **Profa. Dra. Sandra Lúcia da Cruz**, por sua colaboração e sugestões.

Aos meus amigos e companheiros de república, **Neil, Marcone, Douglas, César, Tetsu, Arturo e Luis Carlos**.

A todos os meus amigos, que tornaram minha permanência em Campinas mais agradável (Ou melhor, suportável), em especial **Bauer e família, Silvio e Kellen, José Vicente, Celso e Neila**.

Ao **CNPq** pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	01
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1 - Técnicas para detecção de vazamentos	05
2.1.1 - Balanço de massa	05
2.1.2 - Análise de medidas de pressão e vazão	06
2.1.3 - Simulação paralela	07
2.1.4 - Monitoramento de sinais característicos emitidos por vazamentos	08
3 - TRANSIENTE HIDRÁULICO	10
3.1 - Definição	11
3.2 - Classificação dos transientes hidráulicos.....	14
3.3 - Causas de transientes	14
3.4 - Equações do transiente hidráulico	15
4 - MONTAGEM EXPERIMENTAL	21
4.1 - Descrição do equipamento	22
4.2 - Especificação dos equipamentos	24
4.2.1 - Bomba centrífuga	24
4.2.2 - Transdutores de pressão	24
4.2.3 - A Placa analógica-digital-analógica (Placa ADA)	26
4.2.3.1 - O Multiplexador	26
4.2.3.2 - O Conversor analógico-digital (CAD)	27
4.2.3.3 - A Placa digital-digital	28
4.2.4 - O Microcomputador	29
5 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	30
5.1 - Descrição do sistema de aquisição de dados	31
5.2 - Conversão do sinal analógico em digital	32

5.3 - Temporização dos programas de aquisição.....	33
5.4 - Filtragem dos dados	35
5.4.1 - Média aritmética	35
5.4.2 - Filtros analógicos	36
5.4.3 - Filtros digitais	36
5.4.3.1 - Filtro exponencial simples	37
5.4.3.2 - Filtro exponencial duplo	38
5.5 - Programas de aquisição de dados	39
6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE	45
6.1 - Condições de operação do equipamento	46
6.2 - Procedimento experimental para operação do equipamento .	47
6.3 - Resultados experimentais	49
6.3.1 - Transiente hidráulico	49
6.4 - Análise dos resultados experimentais	78
6.4.1 - Queda de pressão na tubulação	78
6.4.2 - Vazamento mínimo detectado	81
6.4.3 - Velocidade de propagação do transiente hidráulico.....	82
6.4.4 - Localização do vazamento	86
6.4.4.1 - Vazamento provocado pelo microcomputador	87
6.4.4.2 - Vazamento provocado em um instante qualquer	89
6.4.5 - Determinação do atraso na abertura da válvula solenóide	91
7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	96
7.1 - Conclusões	97
7.2 - Sugestões	97
APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO	99
APÊNDICE B - LISTAGENS DOS PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO	102
ABSTRACT	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Representação gráfica da propagação de um transiente hidráulico	12
Figura 3.2 - Equação do movimento aplicada a um volume de controle	16
Figura 4.1 - Esquema representativo da montagem experimental	22
Figura 4.2 - Representação esquemática de um transdutor piezoelétrico	25
Figura 4.3 - Função de um multiplexador em um sistema de aquisição de dados	27
Figura 4.4 - (a) Funcionamento de um sampler, (b) conversão de um sinal contínuo em discreto	38
Figura 5.1 - Fluxograma do programa principal de pevalv01 e pevalv23	41
Figura 5.2 - Fluxograma da subrotina leitura dos programas pevalv01 e pevalv23	42
Figura 5.3 - Fluxograma do programa principal de localj15 e localm15	43
Figura 5.4 - Fluxograma da subrotina de leitura de dados para os programas localj15 e localm15	44
Figura 6.1 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente	50
Figura 6.2.1 - Influência da magnitude do vazamento e vazão de líquido sobre a queda de pressão máxima	79
Figura 6.2.2 - Influência da distância transdutor-vazamento sobre a queda de pressão máxima	79
Figura 6.3.1 - Influência da magnitude do vazamento e da vazão de líquido sobre a queda de pressão entre os estados estacionários	80
Figura 6.3.2 - Influência da distância transdutor-vazamento sobre a queda de pressão entre estados estacionários	80
Figura 6.4 - Esquema utilizado para cálculo da velocidade experimental	83

Figura 6.5 - Representação gráfica das ondas de pressão propagando-se nos sentidos a jusante e a montante do local do vazamento	83
Figura 6.6 - Influência do número de Reynolds e da posição do vazamento sobre a velocidade do transiente hidráulico	85
Figura 6.7 - Representação esquemática da montagem experimental para determinação do atraso da válvula solenóide	92
Figura 6.8 - Primeiro teste realizado para determinação do atraso da válvula	93
Figura 6.9 - Segundo teste realizado para determinação do atraso da válvula	93
Figura 6.10 - Terceiro teste realizado para determinação do atraso da válvula	94
Figura 6.11 - Quarto teste realizado para determinação do atraso da válvula	94
Figura 6.12 - Quinto teste realizado para determinação do atraso da válvula	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Posição de instalação dos transdutores de pressão e dos conjuntos de válvulas	23
Tabela 5.1 - Intervalo de tempo gasto entre duas leituras de pressão de um dado transdutor	35
Tabela 6.1 - Condições de operação do equipamento	47
Tabela 6.2 - Distância entre o vazamento e os transdutores de pressão	48
Tabela 6.3 - Propriedades físicas da água e do PVC	82
Tabela 6.4 - Precisão de localização do vazamento	88
Tabela 6.5 - Resultados obtidos com o programa localj15	90
Tabela 6.6 - Resultados obtidos com o programa localm15	91

NOMENCLATURA

- A - Área da seção transversal da tubulação (m^2)
- ΔA - Variação da área transversal da tubulação (m^2)
- a - Velocidade de propagação do transiente hidráulico (m/s)
- D - Diâmetro interno da tubulação (m)
- E - Módulo de Young do tubo ()
- e - Espessura da tubulação (m)
- g - Aceleração da gravidade (m/s^2)
- H_0 - Carga piezométrica inicial da tubulação (m)
- ΔH - Variação de carga no interior da tubulação (m)
- K - Módulo de elasticidade do líquido ()
- L - Comprimento total da tubulação (m)
- L_1 - Distância entre os transdutores 1 e 2 (m)
- L_2 - Distância entre os transdutores 2 e 3 (m)
- L_3 - Distância entre os transdutores 3 e 4 (m)
- P - Pressão no interior da tubulação (psig)
- ΔP - Variação de pressão no interior da tubulação (psig)
- ΔP_1 - Queda de pressão máxima no interior da tubulação (psig)
- ΔP_2 - Queda de pressão entre estados estacionários (psig)
- ΔS - Variação do comprimento da tubulação (m)
- t - Tempo (s)
- T_i - Transdutores de pressão
- V_0 - Velocidade inicial de escoamento do líquido (m/s)
- V_j - Válvulas solenóide
- ΔV - Variação da velocidade de escoamento do líquido (m/s)
- Y - Distância do vazamento ao transdutor a jusante (m)
- X - Distância do vazamento ao transdutor a montante (m)

Letras gregas

γ - Peso específico do líquido ($\text{kg/m}^2/\text{s}^2$)

μ - Módulo de Poisson do tubo ()

ρ - Densidade do líquido (kg/m^3)

$\Delta\rho$ - Variação da densidade do líquido (kg/m^3)

τ_F - Constante de tempo do filtro (s)

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um método computacional de análise de transientes hidráulicos em tubulações, com o objetivo de detectar e localizar vazamentos. Para isso, foi contruída uma tubulação de 427 metros de comprimento, em tubo de PVC, 3/4" de diâmetro. Ao longo da tubulação foram instalados 4 transdutores de pressão que, acoplados a um microcomputador PC/XT dotado de placa ADA, são os responsáveis por detectar o surgimento do vazamento.

O método utilizado para detecção e localização de vazamentos, baseia-se no estudo de ondas negativas de pressão. Tal método tem como vantagem ser relativamente simples de implantar em computador. A presença de um vazamento em uma tubulação, causa uma rápida queda de pressão na posição do mesmo, originando uma onda de pressão negativa que se propaga à velocidade do som nos sentidos a montante e a jusante do local do vazamento. Através do monitoramento da tubulação é possível detectar a propagação das ondas de pressão em ambos os lados do vazamento, o que permite registrar os instantes em que as ondas são detectadas pelos vários transdutores instalados ao longo da linha e fazer uma aproximação da localização do vazamento.

Foram realizados estudos para determinação da influência de diversos parâmetros hidráulicos sobre a velocidade de propagação das ondas de pressão e da queda de pressão na tubulação.

PALAVRAS-CHAVE: Localização de vazamentos, transiente hidráulico, supervisão de tubulações.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1- INTRODUÇÃO

Redes de tubulações possuem importância indiscutível para a indústria química. É um dos meios de transporte de matérias-primas e produtos mais utilizados devido à sua praticidade, economia e rapidez.

Entretanto, tubulações estão sujeitas a defeitos que podem ocorrer a qualquer instante e devido a vários motivos: falha do operador; mudanças súbitas no processo (Ex: variações bruscas de pressão); intempéries; manutenção inadequada; corrosão.

Quando uma tubulação transporta fluidos tóxicos, o aparecimento de um vazamento pode gerar sérios problemas de poluição ao meio ambiente e ter consequências desastrosas se a falha no tubo surgir próximo a áreas residenciais. Além disso, vazamentos ocasionam sérios prejuízos financeiros para as empresas. Sendo assim, é desejável que o surgimento de um vazamento qualquer em uma tubulação seja identificado e localizado o mais rápido possível.

Os vazamentos que aparecem em redes de tubulações podem ser divididos em duas classes [1]:

- Vazamento por “ruptura” do tubo. É o que menos ocorre mas é extremamente perigoso devido à quantidade de produto derramada nas vizinhanças do vazamento. Entretanto estas rupturas são facilmente detectadas por serem acompanhadas de elevadas quedas de pressão e diferenças volumétricas.

- Vazamento de pequenas proporções. Vazamentos da ordem de 5 l/h são de difícil detecção devido a seu tamanho e podem provocar perdas de produtos enormes até serem notados. Podem ser ocasionados por corrosão, falhas em soldas ou juntas e fadiga do material que compõe os tubos. Poucos são os métodos existentes capazes de detectar vazamentos dessa ordem.

Esse trabalho tem por objetivo propor um método para detecção e localização de vazamentos de qualquer magnitude em tubulações que transportam líquidos através de técnicas computacionais on-line em tempo real.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta as técnicas em que se baseiam os diversos métodos de detecção de vazamentos citados na literatura. São analisados também, os trabalhos mais relevantes para o desenvolvimento dos métodos de detecção de falhas em tubulações.

2.1 Técnicas para detecção de vazamentos

O surgimento do computador e das técnicas de computação em tempo real e sua consequente utilização no controle e supervisão de processos industriais tornou possível o desenvolvimento de métodos que visam solucionar o grave problema da identificação e localização de defeitos em uma tubulação que transporta produtos por grandes distâncias.

Na literatura encontra-se vários métodos computacionais capazes de detectar o aparecimento de um vazamento. Tais métodos baseiam-se em um dos princípios abaixo [3]:

- a) comparação dos volumes de entrada e saída da tubulação;
- b) análise de medidas de pressão e vazão;
- c) simulação paralela;
- d) monitoramento de sinais característicos gerados por um vazamento:
 - ondas negativas de pressão
 - sinais ultra-sônicos.

2.1.1 - Balanço de massa

Se um produto escoar através de uma tubulação em regime estacionário, o volume bombeado para a linha deve ser exatamente igual ao

volume que deixa os dutos. A diferença entre estes volumes significa a existência de vazamento em algum trecho da tubulação.

Entretanto, as condições do produto que entra na linha estão sujeitas a variações de temperatura, pressão e densidade durante o transporte do mesmo. Assim, a ordem de grandeza do vazamento que consegue-se detectar é função da precisão com a qual as modificações nas condições do produto são medidas. Portanto, a identificação de pequenos vazamentos (vazamentos ocultos) é extremamente difícil através desta técnica.

Sandberg et alii [9] analisam um método baseado neste princípio e que é utilizado pela refinaria de Tesoro Nikiski no Alasca. Este sistema de segurança toca um alarme quando a diferença de volume entre a entrada e saída de tubulação é superior a 2% para líquidos e 10% para gases. A grande desvantagem deste método é que um intervalo de tempo de várias horas é necessário até que vazamentos das ordens de grandeza citadas acima sejam localizados, o que ocasiona grandes perdas de produto.

2.1.2 - Análise de medidas de pressão e vazão

O atrito entre o escoamento de um líquido e as paredes de uma tubulação produz uma queda de pressão ao longo dos tubos que está diretamente relacionada com a velocidade de escoamento. Desvios da velocidade de escoamento e queda de pressão esperados em operação normal podem ser indicativos da existência de vazamentos na linha. Utilizando-se operadores para monitorar os medidores de pressão e vazão da tubulação, estas variações podem ser percebidas, e se forem maior que um valor limite pré-fixado, o vazamento é identificado. Entretanto, pequenas variações de pressão e vazão em uma tubulação podem ser resultantes de fontes diferentes de um vazamento, como por exemplo variações na temperatura de escoamento do líquido, oscilações de tensão que provocam variação no comportamento das bombas. Com isso, a precisão com que uma falha é identificada é função do tamanho do vazamento.

Aplicando esta técnica, Baghdadi e Mansy (1988) [1] desenvolveram um modelo matemático capaz de prever a posição de vazamentos em tubulações que transportam fluidos incompressíveis em regime laminar ou turbulento. O modelo proposto é baseado na solução iterativa de um sistema de equações que engloba a equação da continuidade, a equação que descreve a vazão de fluido através do orifício, a perda de energia devido ao atrito a montante e a jusante da posição do furo e o balanço de energia global do sistema em estudo. A solução do sistema de equações indica a localização do vazamento. As variáveis medidas pelos autores são pressão e vazão nas extremidades da linha. Os experimentos foram realizados em uma tubulação de PVC de 12 metros de comprimento. Os resultados obtidos indicam que para vazamentos na faixa de 20 a 50% da vazão de escoamento, o método localiza o vazamento com maior precisão. Este método não é aplicável a tubulações transportando gases.

2.1.3 - Simulação paralela

Através de medidas de pressão e vazão nas extremidades de uma tubulação é possível simular as condições de escoamento do fluido (pressão, velocidade, densidade, etc.) em várias posições ao longo do conduto. De posse das estimativas fornecidas pela simulação, é feita uma comparação com os valores experimentais medidos em diversos pontos do conduto. Divergências observadas nesta comparação são indícios de defeito na linha. Métodos baseados neste princípio têm permitido obter bons resultados para sistemas de tubulações com poucas ramificações e que operam fluidos incompressíveis.

Billmann e Isermann (1987) [2] propuseram um método baseado em medidas de pressão e vazão na entrada e na saída da tubulação. O tratamento destes dados é feito pela utilização de modelos matemáticos dinâmicos baseados nas equações da continuidade e de momento, estimadores de estado adaptativo não-linear (modelos matemáticos que representam a tubulação e fornecem estimativas do coeficiente de atrito ao longo da tubulação) e uma técnica de correlação dos sinais medidos e

estimados. Os testes foram realizados em uma tubulação de 150 km de comprimento e diâmetro de 0,26 metros. Este método requer um esforço computacional relativamente pequeno, o que possibilita a utilização de microcomputadores no processo. A principal limitação desta técnica reside na consideração de que o escoamento é isotérmico, o que não é verdade para uma tubulação tão longa quanto a utilizada neste trabalho.

2.1.4 - Monitoramento de sinais característicos emitidos por vazamentos

a) Detecção de ondas negativas de pressão:

Com o surgimento de um vazamento em um conduto, uma onda de pressão negativa é emitida nas direções a montante e a jusante do local do defeito a uma velocidade superior a de propagação do som no meio. Estas ondas dissipam-se rapidamente, de forma que o escoamento volta a estabilizar-se em novas condições estacionárias. A instalação de transdutores de pressão ligados a um computador, em vários pontos da tubulação, possibilita a detecção da onda de pressão gerada pelo vazamento proporcionando ainda, uma estimativa da localização do vazamento.

Naves (1991) [8] propôs um método para detecção de vazamentos baseado na teoria do transiente hidráulico. Este trabalho foi realizado em uma tubulação de PVC de aproximadamente 20 metros de comprimento, à qual foram acoplados dois transdutores-transmissores de pressão interfaceados a um microcomputador, sendo um na entrada e o outro na saída da tubulação. Estudou-se a influência da vazão de escoamento e da posição do vazamento sobre o perfil de pressão. Foi realizada ainda, uma simulação a partir das equações da continuidade e do momento e do método das características, de modo a obter o perfil teórico de um transiente hidráulico gerado por um vazamento e compará-lo ao perfil experimental correspondente. Os resultados obtidos mostram que este método apresenta bons resultados para a detecção de vazamentos, sendo que suas principais vantagens são a

facilidade de instalação, de medição e sua aplicabilidade a uma grande variedade de condições operacionais.

b) Detecção de sinais ultra-sônicos:

Quando um gás sob pressão escapa através de um orifício na parede de um tubo, ruídos ultra-sônicos são gerados. Tais ruídos podem ser medidos e gravados através da utilização de sensores localizados ao longo da linha. Este método consegue detectar e localizar vazamentos “ocultos” (vazamentos de pequena magnitude) com boa precisão.

Watanabe et alii (1991) [10] apresentaram um estudo com base na propagação de ondas acústicas emitidas por um defeito em tubulação fechada, contendo gás a uma pressão de $0,5 \text{ kgf cm}^{-2}$. Um microfone instalado em uma das extremidades da tubulação, é responsável por detectar e medir a frequência das ondas de pressão geradas pelo vazamento. O método é baseado em um modelo matemático que descreve o fenômeno acústico e na detecção das ondas. Estas ondas possuem forma de pulso e o instante em que elas aparecem e sua amplitude indicam, respectivamente, a posição e o tamanho do vazamento. Os experimentos foram realizados em uma tubulação de pequeno comprimento (aproximadamente 10 metros) e sem escoamento do gás.

O trabalho desenvolvido aqui tem por finalidade propor um método para detecção e localização de vazamentos em tempo real, que se adapte a maioria dos casos existentes na indústria química. Por esse motivo, o método é baseado na teoria do transiente hidráulico, que necessita de um número mínimo de considerações. Além disso, o método proposto aqui é de fácil instalação e operação e provou ser aplicável a uma grande variedade das condições operacionais (pressão da tubulação, vazão de escoamento do líquido, ordem de grandeza do vazamento, posição do vazamento) [8], fatos que viabilizam a utilização desta técnica em unidades industriais que transportam líquidos através de tubulações.

CAPÍTULO 3 - TRANSIENTE HIDRÁULICO

3 - TRANSIENTE HIDRÁULICO

3.1 - Definição

O termo transiente hidráulico é usado para definir flutuações de pressão causadas por uma mudança no escoamento de um líquido ou gás. Em uma tubulação que transporta líquidos, o surgimento do transiente hidráulico pode ser provocado por vários motivos: abertura ou fechamento de válvulas; partida ou parada de bombas; rompimento de um tubo.

Para ilustração do fenômeno transiente hidráulico apresenta-se o exemplo a seguir.

Consideremos o sistema mostrado na figura 3.1, o qual encontra-se em condições de escoamento estacionárias. Um líquido qualquer escoa por um tubo de comprimento L , no sentido da válvula e com velocidade V_0 . O atrito entre o líquido e as paredes do tubo é desprezado de modo que a pressão ao longo de toda a tubulação é correspondente à altura de líquido no nível dos tubos, H_0 . Em um instante $t = 0$, a válvula do sistema é instantaneamente fechada, o que provoca o aparecimento do transiente hidráulico, que propaga-se no interior do tubo a uma velocidade a .

A sequência de eventos que se segue ao fechamento da válvula representa o transiente hidráulico e pode ser dividida em quatro partes (figura 3.1) que são descritas a seguir:

a) $0 < t \leq L/a$ (figuras 3.1.a e 3.1.b)

No momento em que a válvula se fecha, a velocidade de escoamento do líquido através da mesma é reduzida de V_0 a 0, o que causa um aumento de pressão ΔH na camada de líquido em contato com a válvula. Este aumento de pressão faz com que o tubo se expanda e o líquido seja comprimido, o que aumenta sua densidade (Na figura 3.1.a, o estado inicial do tubo está representado por linhas pontilhadas).

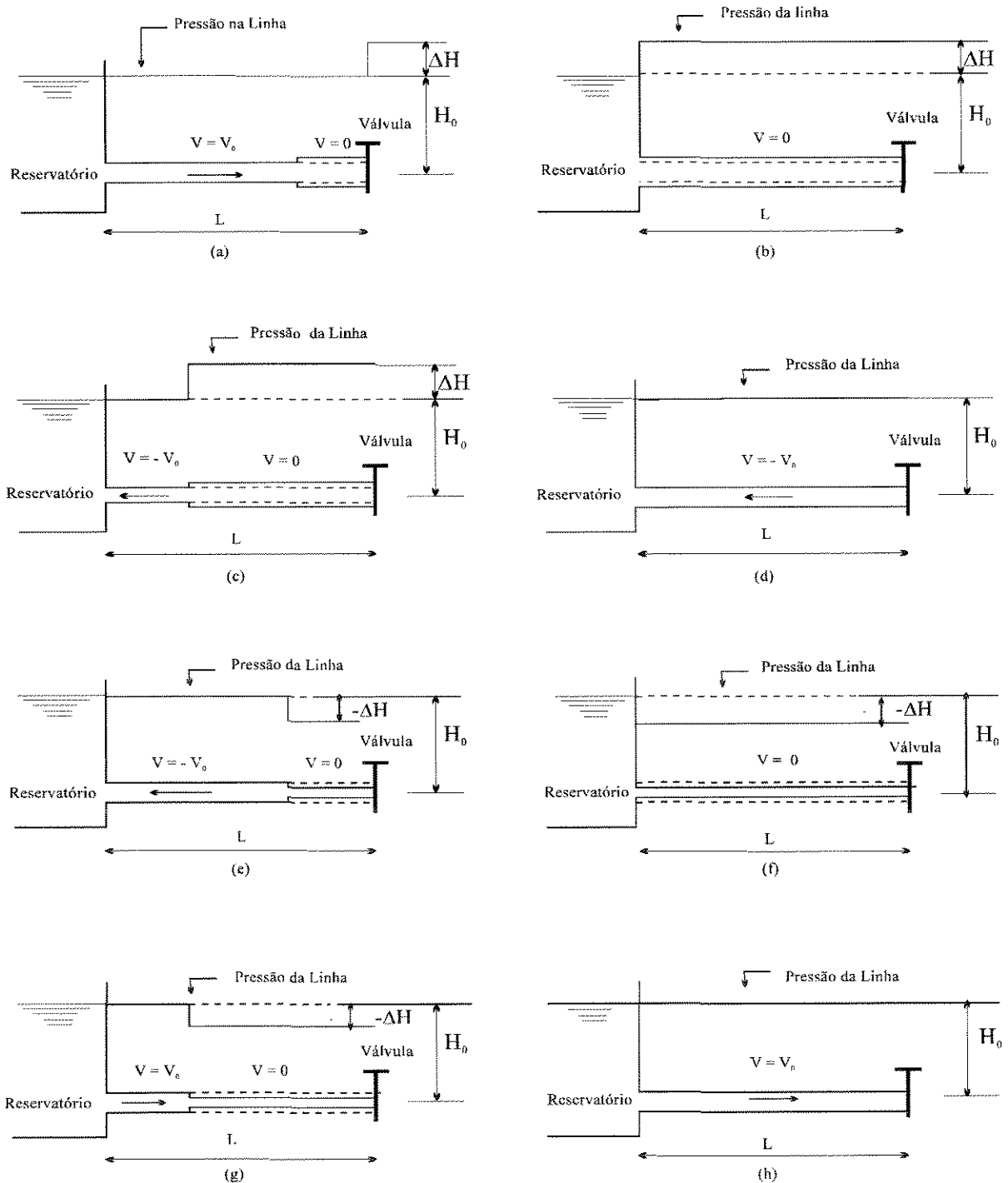


Figura 3.1: Representação gráfica da propagação de um transiente hidráulico no interior de uma tubulação devido ao fechamento de uma válvula no fim da linha.

O mesmo fenômeno ocorre quando as camadas de líquido que escoam com velocidade V_0 encontram a camada estacionária. Dessa forma, uma onda de pressão positiva propaga-se no sentido do tanque a uma velocidade a . Como o comprimento da tubulação é L , no instante $t = L/a$ a onda de pressão terá alcançado o tanque e toda a tubulação se encontrará a uma pressão $H_0 + \Delta H$ e a uma velocidade de escoamento $V = 0$.

b) $L/a < t \leq 2L/a$ (figuras 3.1.c e 3.1.d)

Quando a onda de pressão atinge o reservatório, o sistema encontra-se em desequilíbrio já que a pressão no interior do tanque é H_0 e a pressão nos tubos $H_0 + \Delta H$. Essa diferença de pressão faz o líquido que encontra-se no interior da tubulação escoar para dentro do reservatório com velocidade $-V_0$, o que provoca uma queda de pressão $-\Delta H$ nos tubos. Em outras palavras uma onda de pressão negativa propaga-se no sentido da válvula de modo que a montante da onda a velocidade de escoamento e a pressão do líquido são respectivamente $-V_0$ e H_0 . No instante $t = 2L/a$ a onda de pressão alcança a válvula e ao longo de toda a tubulação o líquido escoa com velocidade $-V_0$ e pressão H_0 .

c) $2L/a < t \leq 3L/a$ (figuras 3.1.e e 3.1.f)

Como a válvula encontra-se completamente fechada o escoamento no sentido do reservatório não pode ser mantido. Dessa forma, a velocidade de escoamento varia instantaneamente de $-V_0$ para 0, o que provoca uma queda de pressão na parede da válvula de H_0 para $H_0 - \Delta H$. Assim, uma onda de pressão negativa de amplitude $-\Delta H$ propaga-se no sentido do tanque. Quando a onda alcança o tanque (instante $t=3L/a$) o líquido dentro do conduto está com velocidade de escoamento igual a zero e pressão $H_0 - \Delta H$.

d) $3L/a < t \leq 4L/a$ (figuras 3.1.g e 3.1.h)

No instante em que a onda de pressão negativa chega ao tanque o sistema encontra-se novamente em condições instáveis devido à diferença de pressão entre o tubo e o tanque. Como a pressão no reservatório é maior, o

líquido passa a escoar no sentido da válvula com velocidade V_0 , fazendo a pressão na tubulação aumentar para H_0 . Em $t = 4L/a$ a onda de pressão alcança a válvula e as condições de escoamento na tubulação são velocidade V_0 e Pressão H_0 , ou seja, as condições iniciais do sistema.

Como a válvula mantém-se fechada e o sistema não possui atrito, o processo descrito acima repete-se a cada intervalo de tempo $4L/a$ mantendo o sistema em regime transiente permanente.

Entretanto, em sistemas físicos reais, as ondas de pressão dissipam-se devido ao atrito entre as ondas e as paredes do tubo e em pouco tempo as condições de escoamento voltam a ser estacionárias.

3.2 - Classificação dos Transientes Hidráulicos

Os transientes hidráulicos podem ser classificados em três categorias diversas dependendo do conduto em que as condições transientes estão ocorrendo:

- a) transiente em condutos fechados (ex: tubulação);
- b) transiente em canais abertos (ex: rios);
- c) transiente combinado (ex.: superfície livre pressurizada).

Neste trabalho são estudados transientes hidráulicos que aparecem em uma tubulação (conduto fechado) devido ao rompimento da parede do conduto.

3.3 - Causas de Transientes

O estágio de escoamento que ocorre quando as condições de escoamento são mudadas de um estado estacionário para outro é denominado estado transiente. Em outras palavras, as condições transientes iniciam-se

quando há uma perturbação do regime estacionário. Esta perturbação pode originar-se de modificações planejadas ou acidentais em um sistema qualquer.

Exemplos comuns do que ocasiona o aparecimento de transientes em engenharia são citados a seguir:

- a) abertura, fechamento ou vibração de válvulas em uma tubulação;
- b) partida ou parada de bombas em um sistema de bombeamento;
- c) vibrações nas pás de um rotor ou ventilador;
- d) mudanças súbitas na vazão de entrada ou saída de um canal ou uma tubulação, através do fechamento de um portão ou de uma válvula de controle;
- e) falha ou colapso de uma tubulação, de um tanque, etc.;
- f) aumentos súbitos de alimentação em um rio devido a tempestades;
- g) queda ou variação da energia elétrica em uma unidade industrial.

Geralmente, o estudo de transientes hidráulicos envolve a análise de problemas em sistemas de tubulações que possuem uma ou mais das condições de contorno citadas acima.

3.4 - Equações do Transiente Hidráulico

Processos com escoamento são governados pelas equações do movimento e da continuidade. A resolução destas equações fornece a equação da velocidade de propagação da onda de transiente hidráulico e o perfil de pressão.

Para transientes hidráulicos ocorrendo em condutos fechados as seguintes hipóteses são levadas em consideração para a dedução das equações do movimento e da continuidade:

- a) o atrito entre o líquido e as paredes do conduto é considerado constante durante o regime transiente;
- b) escoamento unidimensional e velocidade uniforme;
- c) as paredes do tubo e o líquido são linearmente elásticos.

Consideremos um caso particular do exemplo do fechamento da válvula anteriormente descrito e representado pela figura 3.1, no qual ocorre apenas uma pequena variação na abertura da válvula.

No instante em que se varia a abertura da válvula, o líquido imediatamente adjacente à válvula tem sua velocidade de escoamento mudada de V_0 a V , devido ao impulso de uma maior pressão desenvolvida na face da válvula. Assim, ocorre transformação da energia cinética do líquido em energia potencial. Tão logo a primeira camada de líquido que toca a válvula sofre esta transformação de energia, a mesma ação ocorre com a camada de líquido vizinha. Este fenômeno ocorre em todo o líquido presente no interior da tubulação. Dessa maneira, uma onda de pressão positiva é visualizada propagando-se no sentido do tanque.

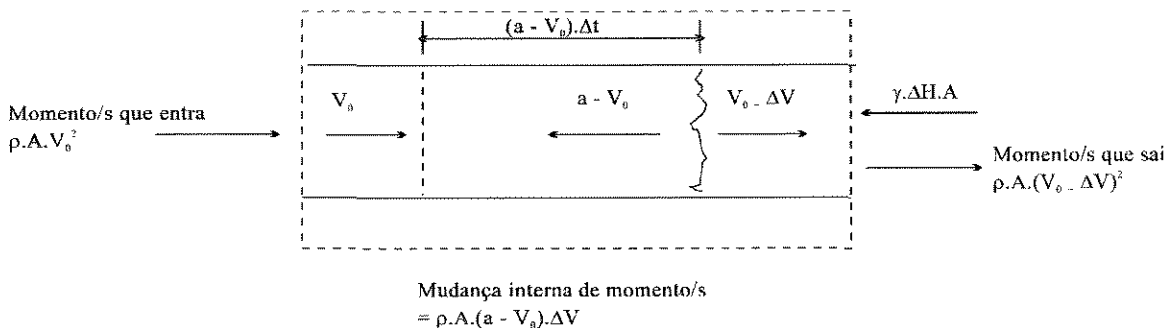


Figura 3.2: Equação do movimento aplicada a um volume de controle.

A equação do movimento é aplicada a um volume de controle (figura 3.2) onde a onda de pressão move-se para a esquerda a uma velocidade absoluta $(a - V_0)$. A mudança na altura de líquido ΔH na válvula é acompanhada por uma mudança de velocidade ΔV . A equação do movimento na direção X pode ser escrita como:

$$-\rho \cdot g \cdot \Delta H \cdot A = \rho \cdot A \cdot (a - V_0) \cdot \Delta V + \rho \cdot A \cdot (V_0 + \Delta V)^2 - \rho \cdot A \cdot V_0^2 \quad (3.1)$$

onde: ρ - densidade do líquido
 g - aceleração da gravidade
 A - Área transversal do tubo
 V_0 - velocidade inicial de escoamento do líquido
 ΔV - variação da velocidade de escoamento
 a - Velocidade de propagação da onda de pressão
 ΔH - Variação da altura da coluna de líquido da tubulação

Como a variação da abertura da válvula é pequena, a variação de velocidade ΔV também é pequena. Assim o termo ΔV^2 na equação 3.1 pode ser desprezado. Dividindo ainda a equação por $\rho.A$ tem-se:

$$\Delta H = -a \cdot \frac{\Delta V}{g} \cdot \left(1 + \frac{V_0}{a} \right) \quad (3.2)$$

Para líquidos escoando em tubos de metal ou de plástico, $V_0/a \ll 1$ [2]. Então:

$$\Delta H = -a \cdot \frac{\Delta V}{g} \quad (3.3)$$

No caso em que a válvula é fechada instantaneamente, temos $\Delta V = -V_0$. Assim, a equação 3.3 para este caso pode ser reescrita como:

$$\Delta H = \frac{a \cdot V_0}{g} \quad (3.4)$$

Para o caso em que a válvula é fechada em pequenos incrementos, a equação 3.3 é reescrita como:

$$\sum \Delta H = -\frac{a}{g} \cdot \sum \Delta V \quad (3.5)$$

Das equações 3.3 a 3.5, vemos que para uma diminuição da velocidade na válvula ocorre um aumento de pressão na mesma, o que coincide com o fenômeno descrito na seção 3.1.

A equação 3.3 é válida para a onda de pressão que propaga-se a montante da válvula. Para a onda que se propaga a jusante a equação é:

$$\Delta H = a \cdot \frac{\Delta V}{g} \quad (3.6)$$

Portanto:

$$\Delta H = \pm a \cdot \frac{\Delta V}{g} \quad (3.7)$$

A equação 3.7 é a equação básica do transiente hidráulico e é válida na ausência de reflexões da onda (intervalo $0 < t \leq L/a$).

É necessário agora aplicar a equação da continuidade ao sistema representado pela figura 3.1.a para que possamos obter a velocidade de propagação da onda de pressão, a , em uma tubulação de comprimento L , quando a válvula é fechada.

Com o fechamento da válvula, representado na figura 3.1.a, enquanto houver líquido entrando no tubo, este deve sofrer uma extensão em seu comprimento, ΔS , e em seu diâmetro, ΔA . Já o líquido deve sofrer compressão, $\Delta \rho$. Considerando que esta extensão e compressão ocorre em L/a segundos (intervalo de tempo em que o líquido entra no tubo após o fechamento total da válvula), para esse intervalo de tempo a equação da continuidade pode ser escrita como:

$$\rho \cdot A \cdot V_0 \cdot \frac{L}{a} = \rho \cdot L \cdot \Delta A + \rho \cdot A \cdot \Delta S + L \cdot A \cdot \Delta \rho \quad (3.8)$$

A variação de velocidade do líquido pode ser escrita como:

$$\Delta V = \Delta S \cdot \frac{a}{L} - V_0 \quad (3.9)$$

Substituindo a equação acima em 3.8 de modo a eliminar V_0 temos:

$$-\frac{\Delta V}{a} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3.10)$$

Definindo o módulo de elasticidade do líquido, K :

$$K = \frac{\rho \cdot \Delta P}{\Delta \rho} \quad (3.11)$$

Substituindo as equações 3.3 e 3.11 na equação 3.10 obtém-se:

$$a^2 = \frac{K}{\rho \left[1 + \left(\frac{K}{A} \right) \left(\frac{\Delta A}{\Delta P} \right) \right]} \quad (3.12)$$

Para tubulações com paredes finas ou espessas, são estudadas três situações:

- a) tubo fixo apenas a montante da válvula;
- b) tubo fixo em vários pontos impedindo movimento na direção axial;
- c) tubo fixo em vários pontos e com juntas de expansão.

Para os três casos acima, é necessário avaliar o termo $\Delta A/(A \cdot \Delta P)$, o qual é função dos módulos de Poisson, μ , e de Young, E , do material de que é composto o tubo. Segundo Wylie e Streeter [14], para tubos elásticos e com parede espessa ($D/e < 25$), tem-se as seguintes expressões para o termo em questão:

$$a) \frac{\Delta A}{A \cdot \Delta P} = \frac{D}{E \cdot e} \left[\frac{2 \cdot e}{D} \cdot (1 + \mu) + \frac{D}{D + e} \cdot \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) \right] \quad (3.13)$$

$$b) \frac{\Delta A}{A \cdot \Delta P} = \frac{D}{E \cdot e} \left[\frac{2 \cdot e}{D} \cdot (1 + \mu) + \frac{D}{D + e} \cdot (1 - \mu^2) \right] \quad (3.14)$$

$$c) \frac{\Delta A}{A \cdot \Delta P} = \frac{D}{E \cdot e} \left[\frac{2 \cdot e}{D} \cdot (1 + \mu) + \frac{D}{D + e} \cdot (1 - \mu)^2 \right] \quad (3.15)$$

Para nossa montagem experimental, o caso (b), em que a tubulação está fixa em vários pontos, é o que melhor descreve o equipamento. A equação da velocidade da onda pode então, ser escrita como:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho \cdot [1 + (K \cdot D / E \cdot e) \cdot C_1]}} \quad (3.16)$$

sendo C_1 :

$$C_1 = \frac{2 \cdot e}{D} \cdot (1 + \mu) + \frac{D}{D + e} \cdot (1 - \mu^2) \quad (3.17)$$

A equação 3.16 é válida para o intervalo de tempo L/a segundos, ou seja, enquanto não ocorrer reflexão do transiente hidráulico (figura 3.1.a).

Wylie e Streeter [14] obtiveram a equação da velocidade da onda para vários outros casos. A seguir encontram-se citados, alguns dos casos por eles estudados:

- Túneis circulares de parede espessa;
- túneis circulares revestidos com aço;
- tubos de concreto reforçados;
- condutos com seção transversal retangular e outras não circulares.

CAPÍTULO 4 - MONTAGEM EXPERIMENTAL

4 - MONTAGEM EXPERIMENTAL

O objetivo deste capítulo é apresentar o equipamento experimental. Encontram-se especificados aqui, todos os aparelhos que compõem a montagem.

4.1 - Descrição do equipamento

O equipamento construído no laboratório para simular o aparecimento de um vazamento em uma tubulação é mostrado na figura 4.1.

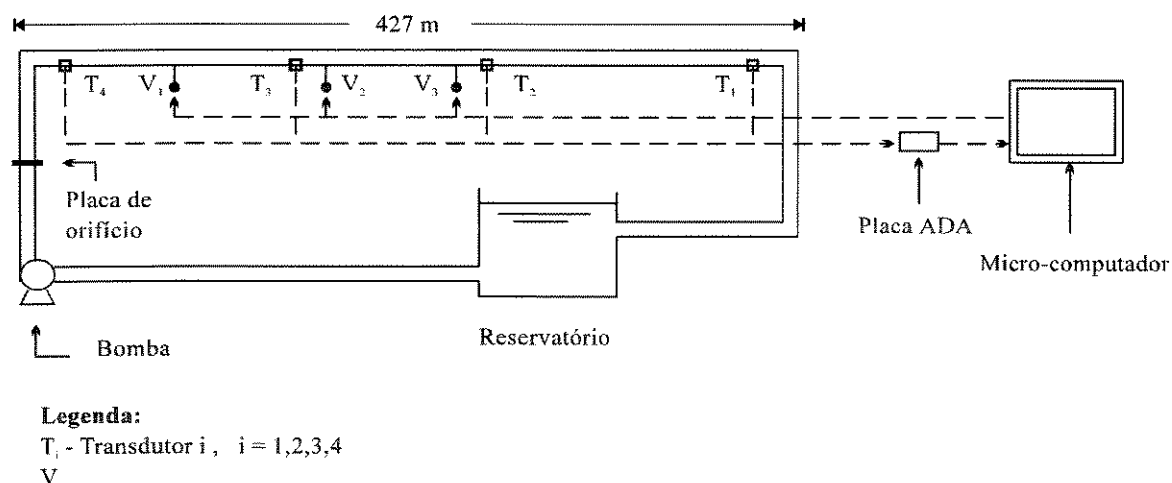


Figura 4.1 - Esquema representativo da montagem experimental.

A tubulação experimental é constituída por trechos de tubos de PVC de 6 metros de comprimento, 3/4 polegadas de diâmetro e 0,25 centímetros de espessura. Os tubos são ligados uns aos outros por dois joelhos padrão de 90°. O comprimento total da tubulação desde a saída da bomba até a descarga no reservatório é de 426,77 metros.

Ao longo da tubulação existem várias tomadas laterais de amostragem, onde podem ser instalados transdutores de pressão ou conjuntos

válvula solenóide - válvula gaveta, responsáveis por simular o rompimento da tubulação.

Foram fixados na tubulação 4 transdutores de pressão. Conjuntos válvula solenóide - válvula gaveta foram instalados em 3 posições diferentes ao longo da linha. A tabela 4.1 indica os locais em que foram instalados os transdutores e o conjunto de válvulas.

Tabela 4.1 - Posições de instalação dos transdutores de pressão e dos conjuntos válvula solenóide - válvula gaveta.

Equipamento	Distância da saída da bomba (m)
Transdutor 1	420,9
Transdutor 2	262,3
Transdutor 3	165,1
Transdutor 4	6,5
Conjunto de válvulas 1	85,7
Conjunto de válvulas 2	170,9
Conjunto de válvulas 3	256,2

O conjunto de válvulas é utilizado para gerar e controlar o tamanho do vazamento. A válvula solenóide ao se abrir simula o rompimento do tubo, enquanto a válvula gaveta tem como função fixar a magnitude do vazamento.

Os transdutores de pressão são os responsáveis pelo monitoramento da tubulação. Estes transdutores estão ligados a um micro-computador PC dotado de placa ADA, ao qual enviam, continuamente, suas leituras de pressão.

O micro-computador com placa ADA tem como funções: abrir a válvula solenóide de modo a simular o vazamento, receber os dados emitidos pelos transdutores e arquivá-los; apresentar estes dados em forma gráfica ao usuário.

Como todos os transdutores enviam seus sinais ao micro simultaneamente, e estes sinais são de natureza analógica, faz-se necessária a utilização de um multiplexador e de um conversor analógico-digital em conjunto com o micro. O multiplexador possibilita ao micro ter acesso aos sinais dos transdutores alternadamente, enquanto o conversor discretiza estes sinais e os transforma em números binários.

O fluido que escoar em circuito fechado pelo interior da tubulação é água. A água é impulsionada para dentro dos tubos por uma bomba centrífuga e tem sua vazão medida por uma placa de orifício, construída no laboratório. A calibração desta placa encontra-se no apêndice A. A vazão do vazamento através do conjunto válvula solenóide-válvula gaveta é regulada utilizando-se um tanque e um cronômetro.

Os componentes da unidade experimental encontram-se especificados na seção seguinte.

4.2 - Especificação dos equipamentos

4.2.1 - Bomba centrífuga

A bomba utilizada para circular a água através da tubulação é da marca Weg, modelo D568692, 1,5 cv de potência. Sua vazão máxima é de aproximadamente $210 \text{ cm}^3/\text{s}$ (756 l/h). Na saída da bomba foram acopladas duas válvulas gaveta, sendo uma com o objetivo de regular a vazão de água que escoar pelos tubos e a outra, por motivo de segurança, fixar a vazão máxima à saída da bomba.

4.2.2 - Transdutores de pressão

Um transdutor pode ser definido como um aparelho que transforma uma quantidade física em outro tipo qualquer com o objetivo de medir e transmitir a forma de energia primária.

Em controle digital de processos, os transdutores mais usados são aqueles que transformam uma quantidade física (Ex: pressão, temperatura, nível, etc.) em voltagem ou corrente equivalentes. No caso em estudo, medidas de pressão são transformadas em voltagem. Exemplos de transdutores que transformam pressão em voltagem são: transdutores de capacitância variável e transdutores piezoelétricos. O transdutor utilizado no desenvolvimento deste trabalho é do tipo piezoelétrico.

Existem alguns materiais sólidos que ao serem deformados, quer por compressão, expansão ou torção, geram carga elétrica (Exemplos: Titanato de bário e zirconato de chumbo). Estes materiais têm estrutura cúbica, mas quando são deformados passam a ter uma estrutura tetragonal. Este efeito é reversível, ou seja, quando aplica-se uma corrente elétrica a estes materiais, eles deformam-se mecanicamente. Esta propriedade denomina-se “efeito piezoelétrico”.

A figura 4.2, representa um transdutor piezoelétrico. O transdutor piezoelétrico é construído a partir de um material sólido que possui esta propriedade. A este material são acoplados eletrodos metálicos, como mostra a figura 4.2. Quando ocorre a deformação do material transdutor, a carga gerada, q , produz uma diferença de potencial entre os eletrodos, sendo esta carga proporcional à deformação do material, x_i . A diferença de potencial gerada é então, transmitida a um amplificador, que amplia este sinal e o envia até o micro-computador.

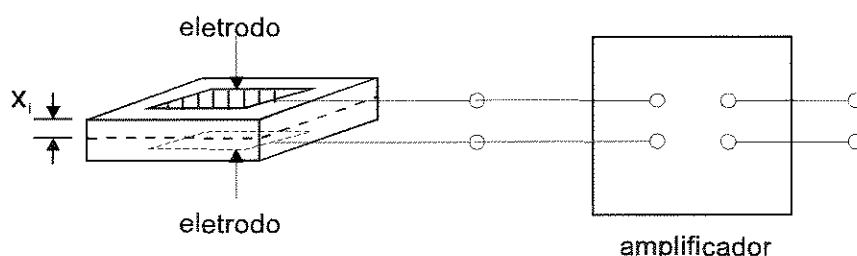


Figura 4.2: Representação esquemática de um transdutor piezoelétrico.

Para utilização destes transdutores de maneira eficiente, é necessário condicionar os sinais transmitidos de modo a eliminar ruídos e

compatibilizá-los com o micro-computador utilizado na aquisição de dados. Este assunto é discutido no capítulo 5.

Os transdutores usados no desenvolvimento deste trabalho são da marca COLE PARMER, modelo K1. Dois transdutores são indicados para medirem valores máximos de pressão equivalentes a 15 psig. O outro par é capaz de realizar leituras até 30 psig. O sinal elétrico emitido pelos transdutores para o micro está na faixa de 1 a 5 volts.

4.2.3 - A Placa analógica-digital-analógica (Placa ADA)

Utilizou-se uma placa ADA versão 2.2 da TAURUS ELETRÔNICA - Brasil, para realizar a conversão de sinais analógicos em digitais e vice-versa. Esta placa ADA é composta por:

- Um conversor Analógico-digital (CAD) de 12 bits e 8 canais;
- Um conversor Digital-analógico (CDA) de 10 bits e 8 canais;
- Uma placa Digital-digital (D/D) de 8 bits 8 canais de entrada e 8 canais de saída;
- Um multiplexador.

4.2.3.1 - O Multiplexador

O multiplexador pode ser descrito como um aparelho eletrônico com várias portas, ou canais, que permitem a um único conversor analógico-digital (CAD), ter acesso a várias linhas de sinais analógicos. A utilização de um multiplexador em nossa montagem experimental evita a necessidade de se usar 4 CAD's para receber os sinais analógicos emitidos pelos 4 transdutores de pressão. A figura 4.3 ilustra a função do multiplexador.

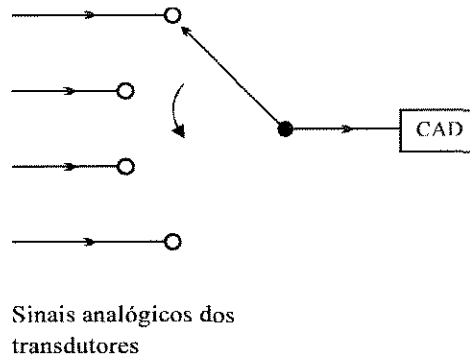


Figura 4.3 - Função de um multiplexador em um sistema de aquisição de dados.

O multiplexador utilizado possui 8 portas para receber os sinais enviados pelos transdutores, e é parte integrante da placa ADA, onde se encaixa o CAD.

4.2.3.2 - Conversor analógico-digital (CAD)

Um conversor analógico digital é constituído por um sampler e por uma placa conversora de sinais analógicos em digitais.

O sampler funciona como um interruptor e sua função é discretizar o sinal enviado por um transdutor, que é contínuo com o tempo, possibilitando sua leitura pelo computador. Esta discretização é necessária pois o microcomputador gasta um intervalo de tempo finito para ler o sinal enviado pelo transdutor. Se durante este período de tempo a variável medida modificar-se, esta mudança não é percebida pelo computador. A figura 4.4 mostra o funcionamento do sampler e a discretização do sinal transmitido pelo transdutor.

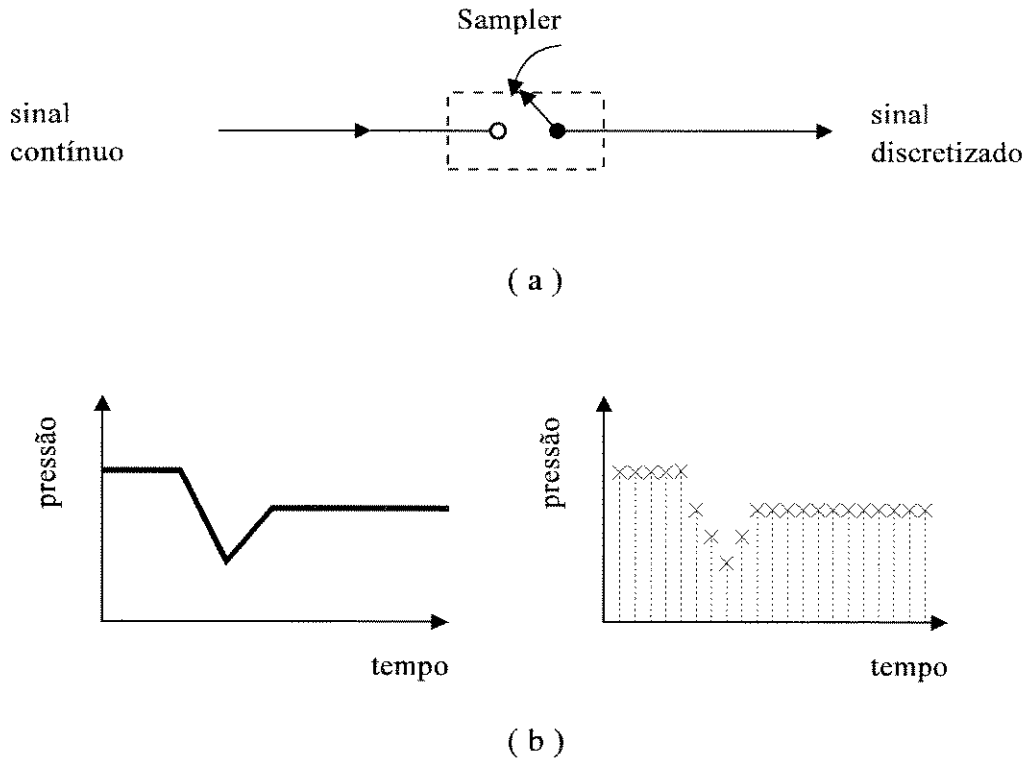


Figura 4.4: (a) Funcionamento do sampler; (b) conversão de um sinal contínuo em um sinal discretizado.

Entretanto, o sinal discretizado é um sinal elétrico de natureza analógica, que não pode ser usado diretamente pelo computador, já que este só reconhece sinais de natureza digital. O conversor analógico-digital (CAD) é responsável por transformar sinais analógicos em palavras de 12 bits, ou seja, em números inteiros na forma binária.

4.2.3.3 - Placa Digital-Digital (D/D)

Para simular o vazamento em nosso equipamento experimental, é necessário que o computador envie um sinal para a válvula solenóide se abrir. Assim, é indispensável utilizar uma saída digital para o computador poder comunicar-se com a válvula. Como o sinal emitido pelo computador é de natureza digital, e o relé da válvula solenóide reconhece este tipo de sinal, na saída digital é instalada em uma placa digital-digital.

Ao utilizar o programa de aquisição de dados, o usuário receberá ordem para apertar uma tecla qualquer do micro para iniciar o estado transiente (abertura da válvula) e para finalizá-lo (fechamento da válvula). Ao apertar tal tecla, o usuário acessa a subrotina `write_dig()` que envia o sinal digital que atuará sobre o relé da válvula. Esta subrotina encontra-se no apêndice B.

A saída digital utilizada no sistema de aquisição de dados é constituída de oito portas, o que permite ao computador acionar até oito relés diferentes.

4.2.6 - Micro-computador

O micro-computador usado na aquisição de dados em tempo real é um PC/XT de marca HENGESYSTEM, modelo HSTURBO.

As tarefas realizadas pelo micro são:

- Receber os sinais emitidos pelos transdutores e arquivá-los em tempo real;
- mostrar os dados experimentais ao usuário em forma de gráficos;
- abrir e fechar a válvula solenóide.

É muito importante, para a aquisição de dados em tempo real, que se conheça o período de tempo gasto pelo micro-computador para receber um sinal dos transdutores, processá-lo e mostrá-lo ao usuário. Como o micro utilizado possui relógio interno, é possível identificar o intervalo de tempo gasto entre duas aquisições, o que garante a interação entre o processo e o sistema de aquisição de dados.

O capítulo 5 descreve o sistema de aquisição de dados em detalhes.

CAPÍTULO 5 - O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

5 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Um sistema de aquisição de dados pode ser definido como uma unidade de instrumentos eletrônicos que reúne dados de várias fontes, mede, processa e grava os dados adquiridos. Além disso, fornece instruções de controle ao processo monitorado, com base nas informações medidas.

Através de um sistema de aquisição de dados, é possível realizar as tarefas citadas acima com maior rapidez e precisão do que utilizando-se operadores para monitoramento de um processo.

O presente capítulo tem como objetivo descrever o sistema de aquisição de dados em tempo real, desenvolvido para obtenção do perfil de pressão em função do tempo, gerado pelo surgimento de um vazamento em uma tubulação.

5.1 - Descrição do sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizados no desenvolvimento deste trabalho é constituído pelos seguintes instrumentos:

- Transdutores de pressão. Responsáveis por medir e transmitir os valores de pressão no interior da tubulação ao microcomputador dotado de placa ADA;
- Multiplexador. Responsável por escolher quais transdutores terão seus sinais transmitidos ao microcomputador;
- Conversor analógico-digital. Responsável por converter as medidas do processo em sinais digitais, que serão reconhecidos pelo microcomputador;
- Microcomputador. Responsável por processar os dados do processo, apresentar os resultados e poder arquivar tanto os dados experimentais como os resultados;
- Programas de aquisição de dados e de localização do vazamento. Responsáveis por enviar instruções aos instrumentos componentes do

sistema de aquisição de dados, ou seja, é o responsável pelo funcionamento de todo o sistema de aquisição de dados.

5.2 - Conversão do sinal analógico em digital

Conforme foi discutido no capítulo 4, os transdutores de pressão utilizados em nosso sistema de aquisição de dados transmite um sinal analógico à placa ADA, que encontra-se na faixa de 1 a 5 volts. Este sinal ao ser recebido pela placa ADA é convertido em sinal digital, número decimal equivalente na faixa de 819 a 4095. Esta conversão é feita conforme a relação linear descrita abaixo:

$$\frac{(SD - 819)}{(4095 - 819)} = \frac{(SA - 1)}{(5 - 1)} \quad (5.1)$$

onde SA é o sinal analógico e SD o sinal digital (número decimal equivalente).

Após a conversão do sinal, este será convertido em unidades de pressão nas subrotinas LEITURA dos programas de aquisição de dados (PEVALV01, PEVALV23, LOCALJ15 e LOCALM15).

A conversão em unidades de pressão é feita da seguinte forma para os transdutores de pressão que realizam leituras até 15 psig:

- para uma pressão de 0 psig, o transdutor transmite um sinal de 1 volt que corresponde a um sinal digital, em número decimal equivalente, de 819;
- para uma pressão de 15 psig, o transdutor transmite um sinal de 5 volts que corresponde a um sinal digital, em número decimal equivalente, de 4095.

Assim, para uma dada leitura de V volts, tem-se:

$$P = 15 \cdot \frac{(SD - 819)}{(4095 - 819)} \quad (5.2)$$

De maneira semelhante, obtém-se a relação que representa a conversão do sinal digital em unidades de pressão para transdutores que efetuam medidas de até 30 psig:

$$P = 30 \cdot \frac{(SD - 819)}{(4095 - 819)} \quad (5.3)$$

5.3 - Temporização dos programas de aquisição de dados

Utilizando-se o relógio interno do microcomputador, foi possível determinar o intervalo de tempo gasto pelo micro para efetuar a execução do 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, além da aquisição de dados em si, são feitos a conversão dos sinais, a transformação dos sinais digitais em unidades de pressão, filtragem dos dados e, para os programas LOCALJ15 e LOCALM15, a localização do vazamento.

Outra tarefa realizada na subrotina de leitura de dados (subrotina leitura), é o cálculo da média de um determinado número de amostras (20 para os programas PEVALV01 e PEVALV23 e 15 para os programas LOCALJ15 e LOCALM15). O valor médio obtido é considerado como sendo o sinal transmitido pelo transdutor piezoelétrico. Este cálculo é feito visando diminuir o efeito de oscilações devido ao processo de bombeamento sobre os valores de pressão lidos, funcionando assim, como um pré-filtro.

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. Dessa forma, é possível garantir a exata correspondência entre as variáveis de processo.

Com a finalidade de realizar a temporização dos programas de aquisição de dados, foram feitas algumas modificações nos programas de

aquisição de dados, de modo a determinar o tempo gasto pelos programas para executar o laço de leitura.

Estas modificações consistem basicamente em introduzir a biblioteca `time.h` e a subrotina `clock()` no programa principal. Esta subrotina nada mais é do que um relógio que mede o tempo consumido na realização do programa de aquisição de dados. Assim, ao inicializar-se o programa, a subrotina `clock()` liga o relógio interno do micro, e desliga-o ao final do programa.

Com a utilização da subrotina `clock()`, é possível saber o exato instante em que a subrotina leitura é inicializada e o instante em que é finalizada. Ao chamar-se a subrotina leitura, o valor atual de `clock()` é arquivado em uma variável denominada `tempo1`. No instante em que se finaliza a subrotina, o valor atual de `clock()` é arquivado em uma variável `tempo2`. A diferença entre `tempo2` e `tempo1` corresponde ao tempo gasto na execução da subrotina leitura. Dividindo-se este valor pelo número de vezes que realiza-se o laço de leitura, tem-se o intervalo de tempo consumido entre duas leituras seguidas para um dado transdutor. Dentro da subrotina, são feitas 250 leituras para cada transdutor quando utiliza-se os programas `PEVALV01` e `PEVALV23` (2 transdutores de pressão), e 125 leituras para cada transdutor quando utiliza-se os programas `LOCALJ15` e `LOCALM15` (4 transdutores de pressão), totalizando um total de 500 leituras.

Durante os experimentos realizados para temporização dos programas de aquisição de dados, a subrotina leitura foi executada por 100 vezes com o intuito de obter um valor médio representativo do tempo gasto para executar a subrotina leitura.

Assim, intervalo de tempo consumido pelo micro entre duas leituras sucessivas de um dado transdutor pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\Delta t = \frac{(\text{tempo2} - \text{tempo1})}{100.250} \quad (5.4.1)$$

$$\Delta t = \frac{(\text{tempo2} - \text{tempo1})}{100.125} \quad (5.4.2)$$

A equação 5.4.1 é válida para os programas PEVALV01 e PEVALV23, enquanto a equação 5.4.2 é válida para os programas LOCALJ15 e LOCALM15.

A tabela 5.1 traz o tempo gasto entre duas leituras para todos os programas de aquisição de dados desenvolvidos.

Tabela 5.1: Intervalo de tempo gasto entre duas leituras de pressão de um dado transdutor, pelos programas de aquisição de dados.

Programa	Intervalo de tempo (s)
Pevalv01	0,010456
Pevalv23	0,010571
LocalJ15	0,023976
LocalM15	0,023843

5.4 - Filtragem de 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 uma tubulação gera um transiente hidráulico, que pode ser confundido com estes ruídos, dependendo da magnitude deste vazamento. Para que seja possível identificar corretamente um vazamento, torna-se necessário reduzir ao máximo estes ruídos.

A redução de ruídos em um processo qualquer é possível através de uma filtragem dos dados. A seguir são discutidos alguns tipos de filtros usados em controle de processos.

5.4.1 - 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 os programas de aquisição de dados PEVALV01 e PEVALV23, calcula-se a média de 20 medidas de pressão para cada transdutor. Este valor médio é considerado como sendo a medida feita pelo transdutor, sendo então convertido em sinal digital e, posteriormente, em unidades de pressão.

Para os programas LOCALJ15 e LOCALM15, considera-se como a leitura de um transdutor em um dado instante, a média de 15 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.

5.4.2 - Filtros analógicos

Um filtro analógico nada mais é do que um capacitor ligado a um resistor e que pode ser definido por uma função de transferência de primeira ordem ou por uma equação diferencial de primeira ordem. Sendo assim, a equação a seguir representa um filtro analógico:

$$\tau_F \cdot \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = X(t) \quad (5.5)$$

onde $X(t)$ é o valor medido, $Y(t)$ é o valor filtrado e τ_F a constante de tempo do filtro.

Os filtros analógicos têm sido usados frequentemente como pré-filtros do processo, de modo a reduzir ruídos de alta frequência.

5.4.3 - Filtros digitais

5.4.3.1 - Filtro exponencial simples

Um transdutor de pressão transmite uma sequência de medidas de pressão que podem representadas como $X_n, X_{n-1}, X_{n-2}, \dots$, onde n corresponde à medida atual e $n-1$ à medida anterior. À cada medida corresponde um valor filtrado $Y_n, Y_{n-1}, Y_{n-2}, \dots$ etc.

No instante de tempo n , a derivada da equação 5.5 pode ser reescrita utilizando-se diferenças finitas:

$$\frac{dY}{dt} \cong \frac{Y_n - Y_{n-1}}{\Delta t} \quad (5.6)$$

Podemos então, reescrever a equação 5.5 como:

$$\tau_F \cdot \frac{(Y_n - Y_{n-1})}{\Delta t} + Y_n = X_n \quad (5.7)$$

Rearranjando o termo constante e definindo-o como α , temos:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{\tau_F}{\Delta t} + 1} \quad (5.8)$$

sendo $0 < \alpha \leq 1$.

Da equação 5.7 e da definição de α temos:

$$Y_n = \alpha \cdot X_n + (1 - \alpha) \cdot Y_{n-1} \quad (5.9)$$

Da equação 5.9 conclui-se que o valor filtrado de uma medida é função da medida atual e do valor filtrado anterior. Os casos limites para α são:

- $\alpha = 1 \Rightarrow \tau_F = 0$: não há filtragem;
- $\alpha \rightarrow 0$: ignora-se a medida.

5.4.3.2 - Filtro exponencial duplo

Outro filtro digital largamente utilizado é o filtro exponencial duplo, que nada mais é do que um filtro exponencial simples filtrando o sinal de outro filtro exponencial.

Aplicando um filtro exponencial simples ao sinal filtrado fornecido pela equação 5.9 e ao sinal filtrado no instante anterior, temos:

$$\bar{Y}_n = \gamma \cdot Y_n + (1 - \gamma) \cdot \bar{Y}_{n-1} \quad (5.10)$$

$$\bar{Y}_{n-1} = \gamma \cdot Y_{n-1} + (1 - \gamma) \cdot \bar{Y}_{n-2} \quad (5.11)$$

Substituindo 5.9 em 5.10:

$$\bar{Y}_n = \gamma \cdot \alpha \cdot X_n + \gamma \cdot (1 - \alpha) \cdot Y_{n-1} + (1 - \gamma) \cdot \bar{Y}_{n-1} \quad (5.12)$$

Isolando Y_{n-1} em 5.12 e substituindo em 5.11 temos:

$$\bar{Y}_n = \alpha \cdot \gamma \cdot X_n + (2 - \gamma - \alpha) \cdot \bar{Y}_{n-1} - (1 - \alpha) \cdot (1 - \gamma) \cdot \bar{Y}_{n-2} \quad (5.13)$$

Considerando $\gamma = \alpha$, podemos simplificar a equação 5.13:

$$\bar{Y}_n = \alpha^2 \cdot X_n + 2 \cdot (1 - \alpha) \cdot \bar{Y}_{n-1} - (1 - \alpha)^2 \cdot \bar{Y}_{n-2} \quad (5.14)$$

A equação 5.14 indica que o valor filtrado no instante n , é função do valor medido no mesmo instante e dos valores filtrados nos instantes $n-1$ e $n-2$.

O filtro exponencial duplo fornece melhores resultados que o exponencial simples e o analógico, e por isso foi o escolhido para ser utilizado neste trabalho. Estudos realizados por Naves [8] mostram que os melhores resultados de filtragem foram obtidos utilizando-se $\alpha = 0,5$. Portanto, este será o valor de α utilizado em nosso sistema de aquisição de dados.

5.5 - Programas de aquisição de dados

Foram desenvolvidos quatro programas de aquisição de dados, sendo que dois deles (PEVALV01 e PEVALV23) são responsáveis por abrirem a válvula solenóide e simular o vazamento, enquanto nos outros dois (LOCALJ15 e LOCALM15), a válvula solenóide é aberta manualmente. Além disso, os programas LOCALJ15 e LOCALM15 indicam a localização do vazamento na tela do micro, o que não ocorre nos outros programas, sendo necessário que o usuário leia os arquivos de dados para saber a posição do vazamento.

A seguir encontram-se descritas as tarefas de cada programa de aquisição de dados e as diferenças básicas entre eles:

- Programas PEVALV01 e PEVALV23

- 1) Fechamento da válvula solenóide, de modo a garantir o estado estacionário;
- 2) Limpeza da tela;
- 3) Aquisição de dados para o estado estacionário;
- 4) Conversão dos dados lidos em sinais digitais e posteriormente, em unidades de pressão;
- 5) Filtragem dos dados de estado estacionário;
- 6) Impressão na tela do micro, do perfil de pressão obtido para o estado estacionário;
- 7) Limpeza da tela;
- 8) Abertura da válvula solenóide, iniciando assim, o estado transiente;
- 9) Leitura do estado transiente;
- 10) Conversão dos dados do estado transiente em unidade de pressão;
- 11) Filtragem dos dados de estado transiente;
- 12) impressão na tela do micro, do perfil de pressão obtido para o estado transiente;
- 13) Fechamento da válvula solenóide;
- 14) Arquivo do perfil de pressão do estado transiente.

A diferença básica entre os programas PEVALV01 e PEVALV23 está na utilização de diferentes portas do multiplexador para a aquisição de dados. Sendo assim, o programa PEVALV01 acessa as portas 0 e 1 do multiplexador, recebendo os sinais transmitidos pelos transdutores 1 e 2 (ver posição dos transdutores na tabela 4.1). Já o programa PEVALV23 acessa as portas 2 e 3 e conseqüentemente, os transdutores 3 e 4.

- Programas LOCALJ15 e LOCALM15

- 1) Leitura de pressão no interior da tubulação para os quatro transdutores;
- 2) Conversão do sinal analógico em digital e posteriormente, em unidades de pressão;
- 3) Filtragem das leituras de pressão;
- 4) Comparação entre as leituras atuais de cada transdutor e as leituras anteriores, de modo a identificar o surgimento de um vazamento na linha;
- 5) Impressão na tela do micro dos perfis de pressão obtidos pelos quatro transdutores para um dado intervalo de tempo;
- 6) limpeza da tela;
- 7) Reinício da aquisição de dados;
- 8) Quando identifica-se o surgimento de um vazamento na tubulação, o programa interrompe a aquisição de dados;
- 9) Cálculo da posição do vazamento através da subrotina LOCAL, identificando entre quais transdutores e a que distância dos mesmos encontra-se o vazamento;
- 10) Impressão na tela da posição em que apareceu o vazamento.

Nos programas LOCALJ15 e LOCALM15, os quatro transdutores são utilizados, o que aumenta o intervalo de tempo entre duas leituras de um mesmo transdutor (ver tabela 5.1). Nestes programas, são identificados os instantes em que cada transdutor percebe o transiente hidráulico gerado por um vazamento. De posse destes valores de tempo, a velocidade da onda é calculada e a posição do vazamento encontrada. Estas tarefas são realizadas pelas subrotinas leitura1 e local. A diferença entre os dois programas é a

utilização de sinais de diferentes transdutores para calcular a velocidade de propagação do transiente hidráulico. O programa LOCALJ15 calcula a velocidade da onda através dos transdutores a jusante do local de vazamento, enquanto o programa LOCALM15 utiliza-se dos transdutores a montante.

Fluxogramas dos programas de aquisição de dados são mostrados aqui, com o intuito de facilitar a compreensão dos programas listados no Apêndice B.

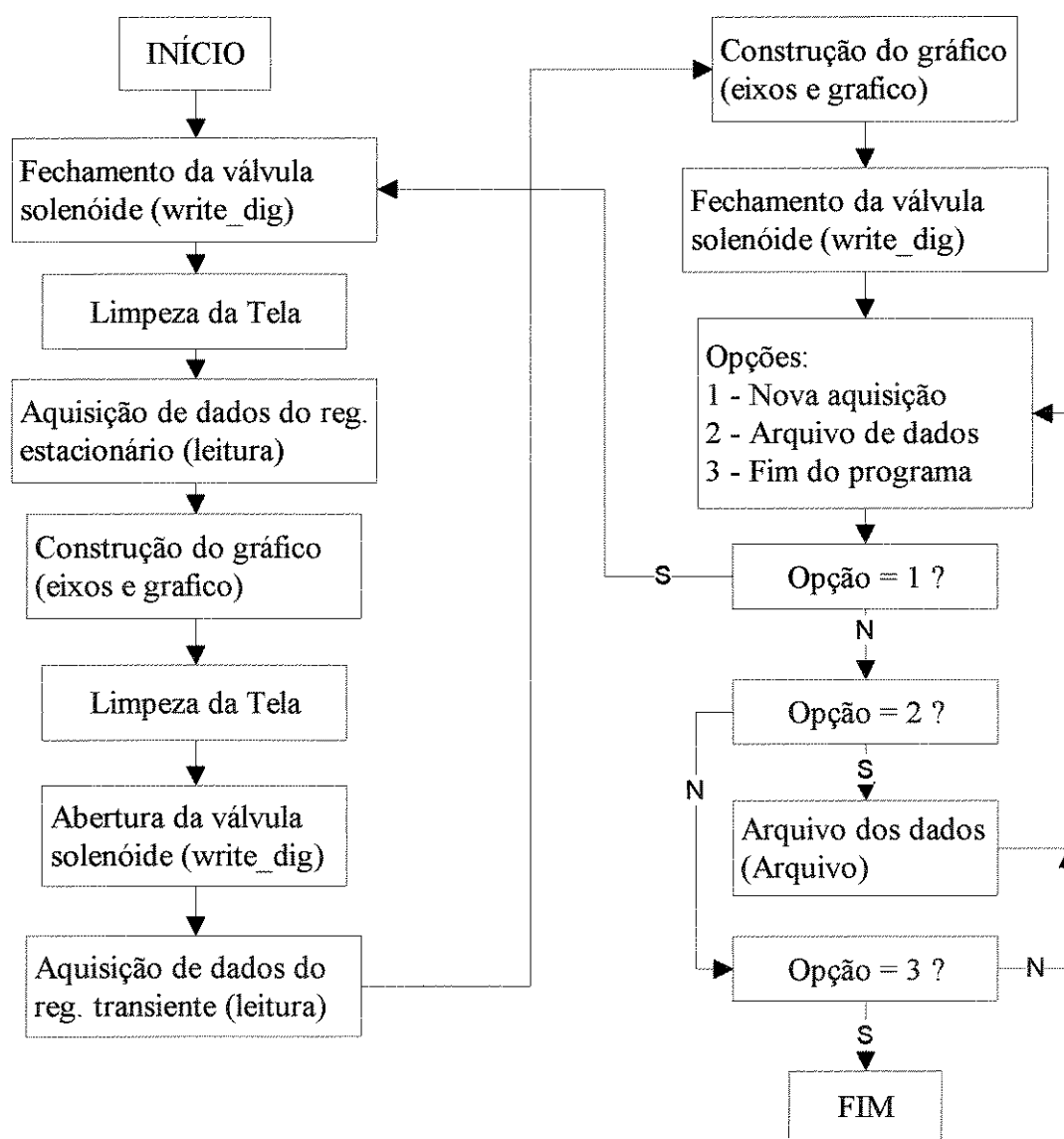


Figura 5.1: Fluxograma do programa principal de pevalv01 e pevalv23. As subrotinas utilizadas são citadas entre parênteses.

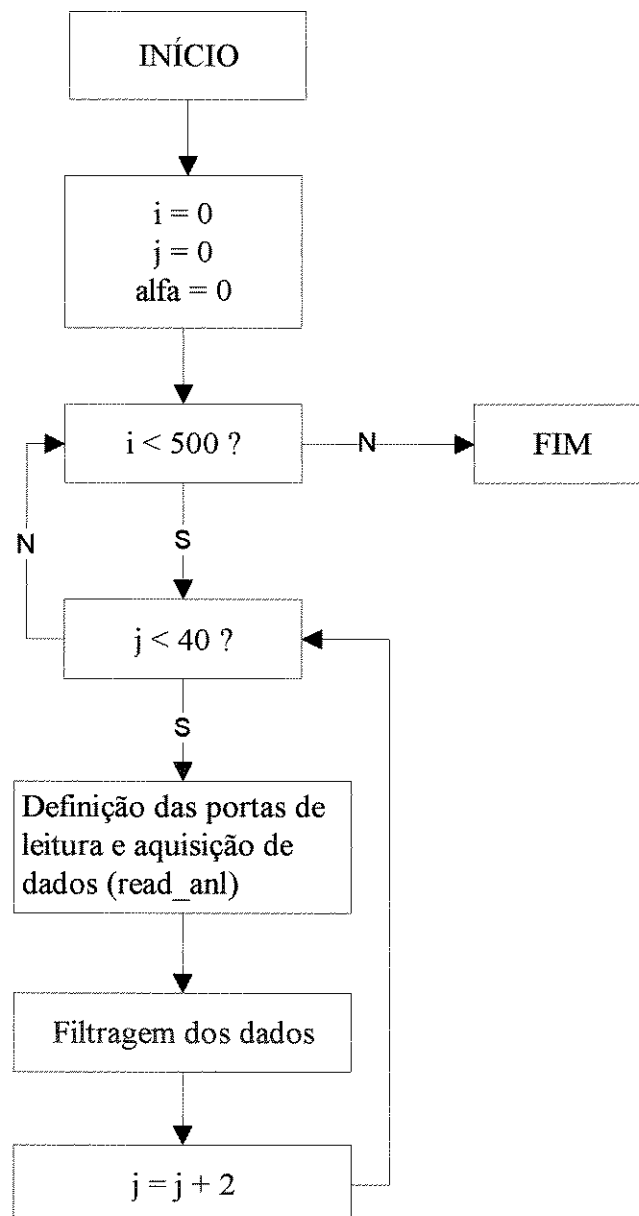


Figura 5.2: Fluxograma representativo da subrotina leitura dos programas PEVALV01 e PEVALV23. Os nomes entre parênteses indicam as subrotinas utilizadas na realização das tarefas.

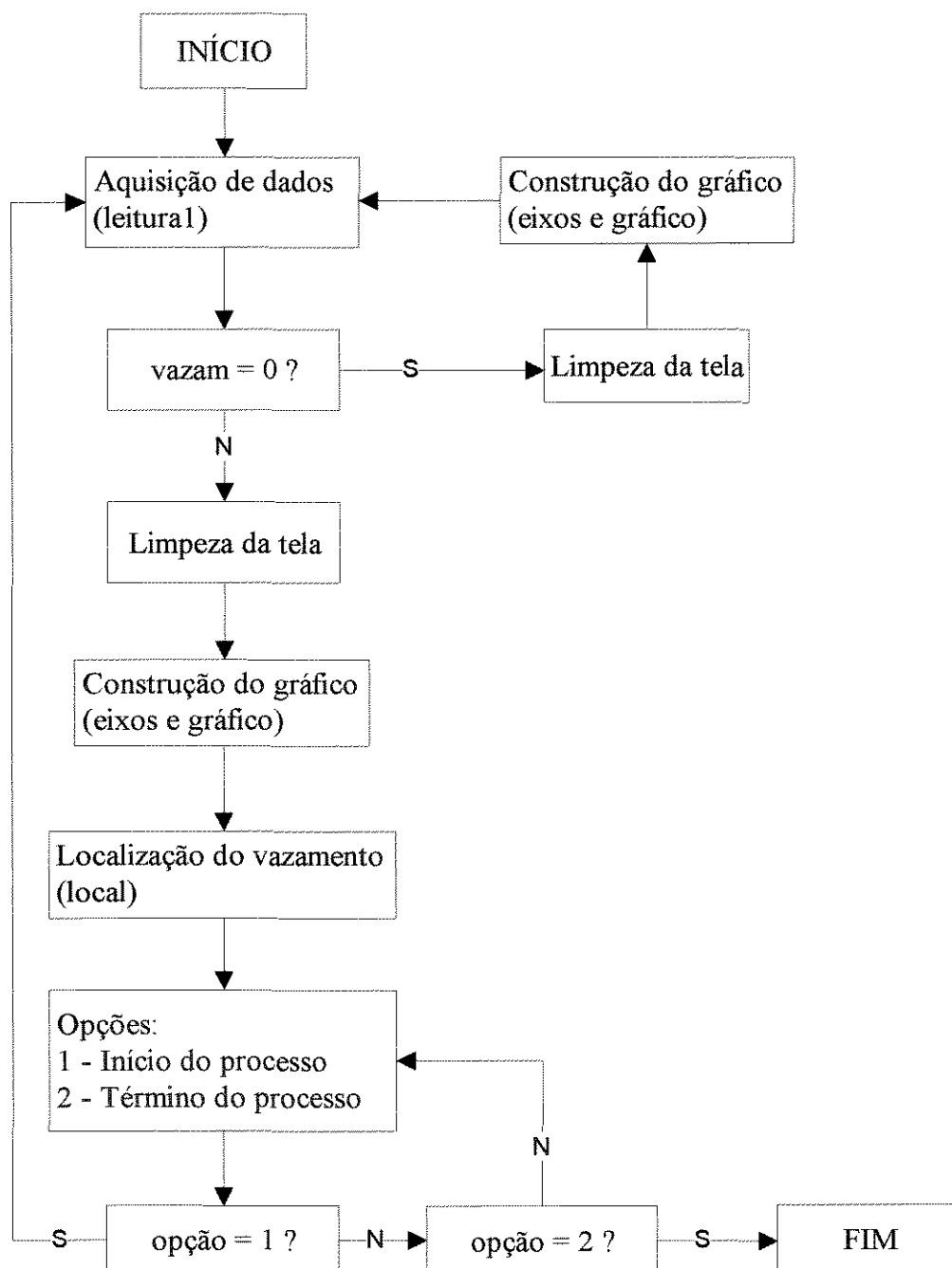


Figura 5.3: Fluxograma representativo do programa principal de localj15 e localm15. Os nomes entre parênteses indicam as subrotinas utilizadas na realização das tarefas.

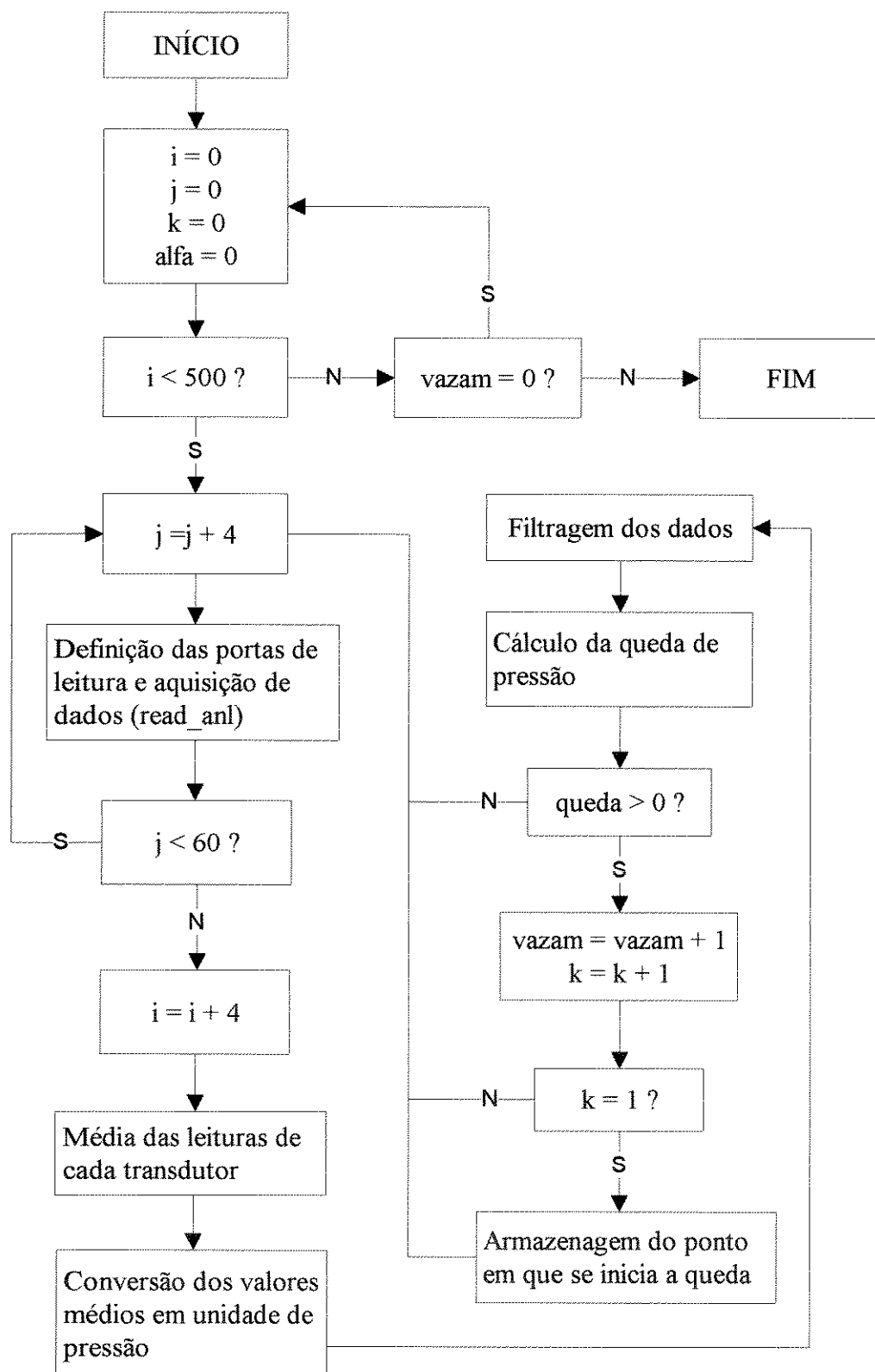


Figura 5.4: Fluxograma representativo da subrotina de aquisição de dados para programas Localj15 e Localm15. Os nomes entre parênteses indicam as subrotinas utilizadas.

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

Os resultados experimentais obtidos através dos programas de aquisição de dados (PEVALV01 e PEVALV23) para as várias configurações da montagem experimental são mostrados e discutidos neste capítulo. Procurou-se analisar a influência do tamanho e posição do vazamento, vazão de escoamento do líquido e pressão no interior da tubulação sobre:

- o perfil de pressão do transiente hidráulico;
- a velocidade de propagação da onda de pressão;
- o erro na localização do vazamento.

São apresentados também, resultados da localização do vazamento obtidos pelo programa de identificação e localização de vazamentos (Programas LOCALJ15 e LOCALM15).

Através da discussão dos resultados obtidos, procura-se esclarecer a influência dos vários parâmetros hidráulicos sobre o estado transiente ocasionado por um vazamento, de modo a solucionar os problemas provocados pelo rompimento de uma tubulação.

6.1 - Condições de operação do equipamento

Durante a realização dos experimentos, para uma dada vazão de líquido variou-se a pressão no interior dos tubos e o tamanho dos vazamentos. A faixa de operação destas variáveis encontra-se na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Condições de operação da montagem experimental.

Parâmetro hidráulico	Valor mínimo	Valor máximo
Pressão no transdutor 1 (psig)	2,0	15,0
Número de Reynolds	5000	13000
Ordem de grandeza do vazamento (%)	0,5	150,0

6.2 - Procedimento experimental para operação do equipamento

Através dos programas de aquisição de dados (PEVALV01 utiliza transdutores 1 e 2, PEVALV23 os transdutores 3 e 4) obteve-se os perfis transientes de pressão a partir do instante em que a válvula solenóide é aberta.

O procedimento experimental seguido para a aquisição de dados pode ser descrito pelos seguintes passos:

- 1) Fixação do número de Reynolds ou vazão de escoamento do líquido. É estabelecida a partir da leitura do manômetro em U da placa de orifício. O apêndice A traz a curva de calibração do medidor de orifício.
- 2) Fixação da pressão de trabalho. Feita através da visualização na tela do micro do perfil de pressão da tubulação durante o estado estacionário. O perfil de pressão corresponde às leituras dos transdutores, que são convertidas à forma gráfica pelo programa de aquisição de dados. A pressão na tubulação é ajustada através dos valores de pressão indicados pelo transdutor mais próximo à saída da tubulação.
- 3) Fixação da vazão do vazamento. Obtida com a regulagem da abertura da válvula gaveta acoplada à válvula solenóide na posição em que se simula o vazamento. A medição da vazão através das válvula é feita no início de cada experimento utilizando-se tanque e cronômetro.
- 4) Regime transiente. É provocado pelo programa de aquisição de dados, que envia um sinal à válvula solenóide para que esta se abra. Este sinal é emitido ao apertar-se qualquer tecla no teclado do micro conforme instrução

impressa na tela pelo programa. Quando a válvula solenóide é aberta, ondas negativas de pressão propagam-se a jusante e a montante da posição em que se encontra o vazamento.

- 5) Aquisição dos dados de pressão x tempo pelo computador.
- 6) Arquivo dos dados obtidos.
- 7) Variação da vazão do vazamento.
- 8) Repete-se os passos 3 a 7 até atingir vazamentos de aproximadamente 50% da vazão de escoamento da água.
- 9) Variação da pressão no interior da tubulação. Repete-se os passos 2 a 8.
- 10) Variação do número de Reynolds do líquido. Repete-se os passos 1 a 9.

Ao término dos experimentos para uma dada posição de vazamento, passa-se a utilizar outro dos conjuntos válvula gaveta-válvula solenóide acoplados às demais saídas laterais existentes ao longo da tubulação. Em seguida, são repetidos os passos destacados anteriormente na realização dos experimentos.

No desenvolvimento deste trabalho foram estudadas três posições de vazamento diferentes com a onda de pressão sendo detectada pelos transdutores 1-2 e 3-4, totalizando 5 configurações diferentes. A tabela 6.2 fornece as distâncias do vazamento aos transdutores para as cinco configurações.

Tabela 6.2: Distância entre o vazamento e os transdutores de aquisição de dados para as configurações de trabalho.

Configuração	Distância vazamento-transd. 1 (m)	Distância vazamento-transd. 2 (m)	Distância vazamento-transd. 3 (m)	Distância vazamento-transd. 4 (m)
1	335,26	176,61	-	-
2	250,00	91,35	-	-
3	-	-	5,81	164,44
4	164,74	6,09	-	-
5	-	-	91,07	249,70

6.3 - Resultados experimentais

6.3.1 - Transiente Hidráulico

As figuras que se seguem mostram os perfis de pressão gerados pelo vazamento e que foram obtidos pelo programa de aquisição de dados.

Estas figuras representam o comportamento da onda negativa de pressão em função da ordem de grandeza do vazamento, da posição do vazamento e da vazão de escoamento de água.

As faixas de operação das variáveis do processo encontram-se na tabela 6.1. Para a primeira configuração estudada (vazamento a 335,3 metros do transdutor 1) obteve-se perfis de pressão para vazamentos de até 150% da vazão de escoamento da água anterior ao aparecimento do vazamento, de modo a mostrar que o método utilizado apresenta bons resultados para vazamentos de ordens de grandeza variadas. Para as demais configurações, estudou-se vazamentos de até 50% da vazão inicial de água, pois os primeiros testes já haviam provado que o método identifica e localiza vazamentos de grande magnitude facilmente, e o maior interesse deste trabalho é a identificação e localização de pequenos vazamentos.

Através dos perfis de pressão aqui apresentados, observa-se que vazamentos da ordem de 0,5% a 150% da vazão inicial de escoamento de água são identificados.

Para melhor entendimento das figuras, vale citar que:

- Configurações 1, 2 e 4: Linha contínua corresponde ao transdutor 1 e linha pontilhada ao transdutor 2;
- Configurações 3 e 5: Linha contínua corresponde ao transdutor 4 e linha pontilhada ao transdutor 3.

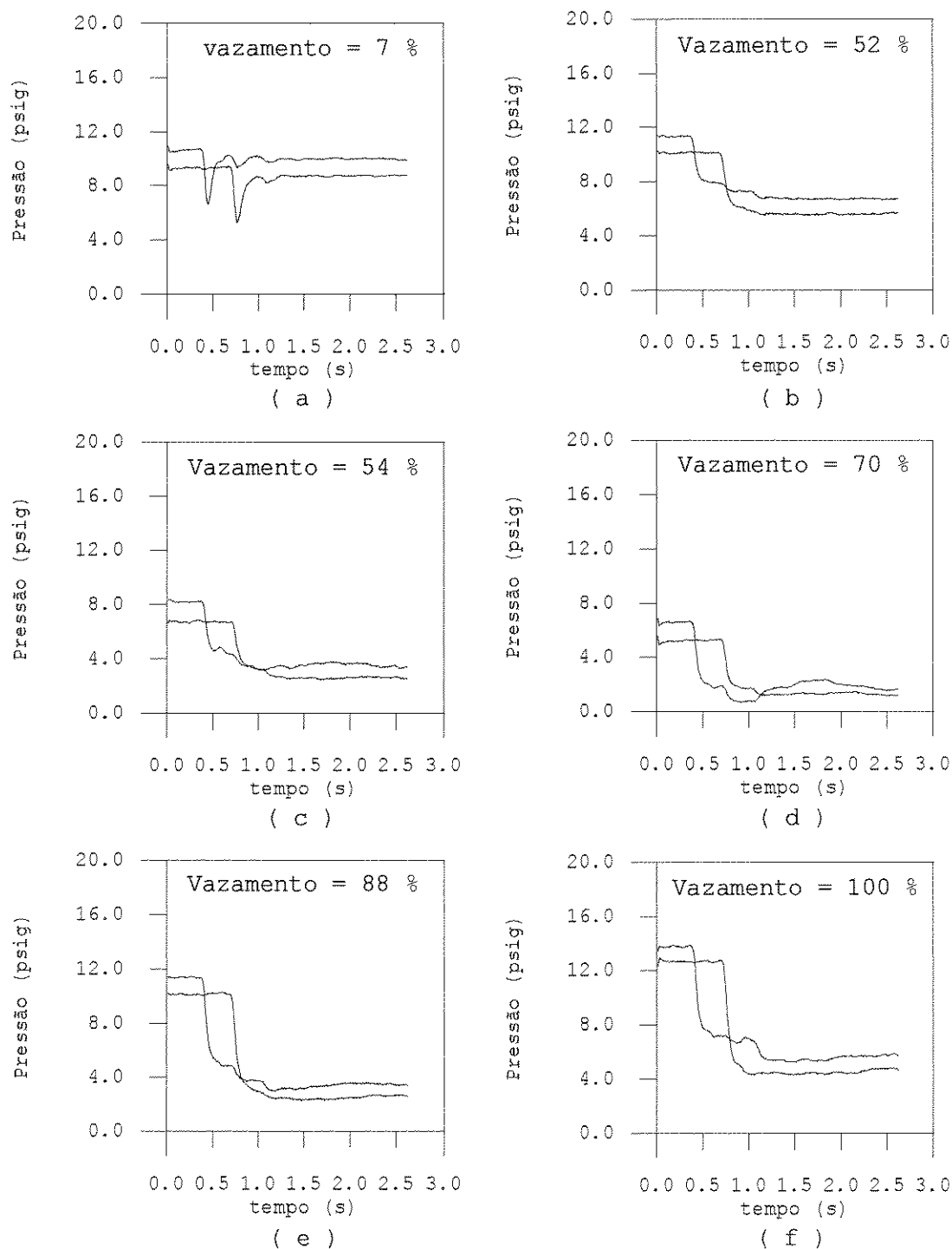


Figura 6.1.1 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 5000 e configuração 1.

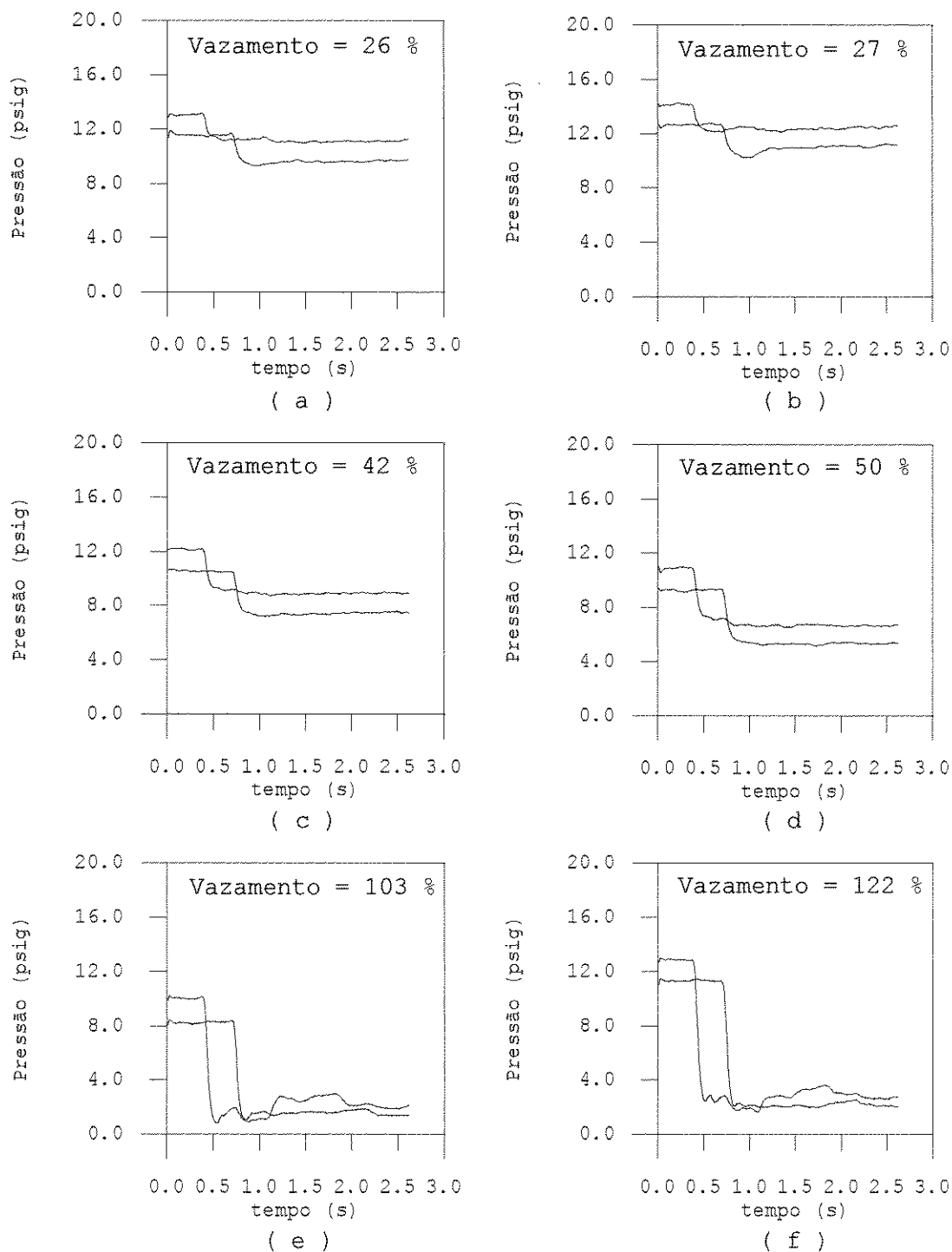


Figura 6.1.2 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 6000 e configuração 1.

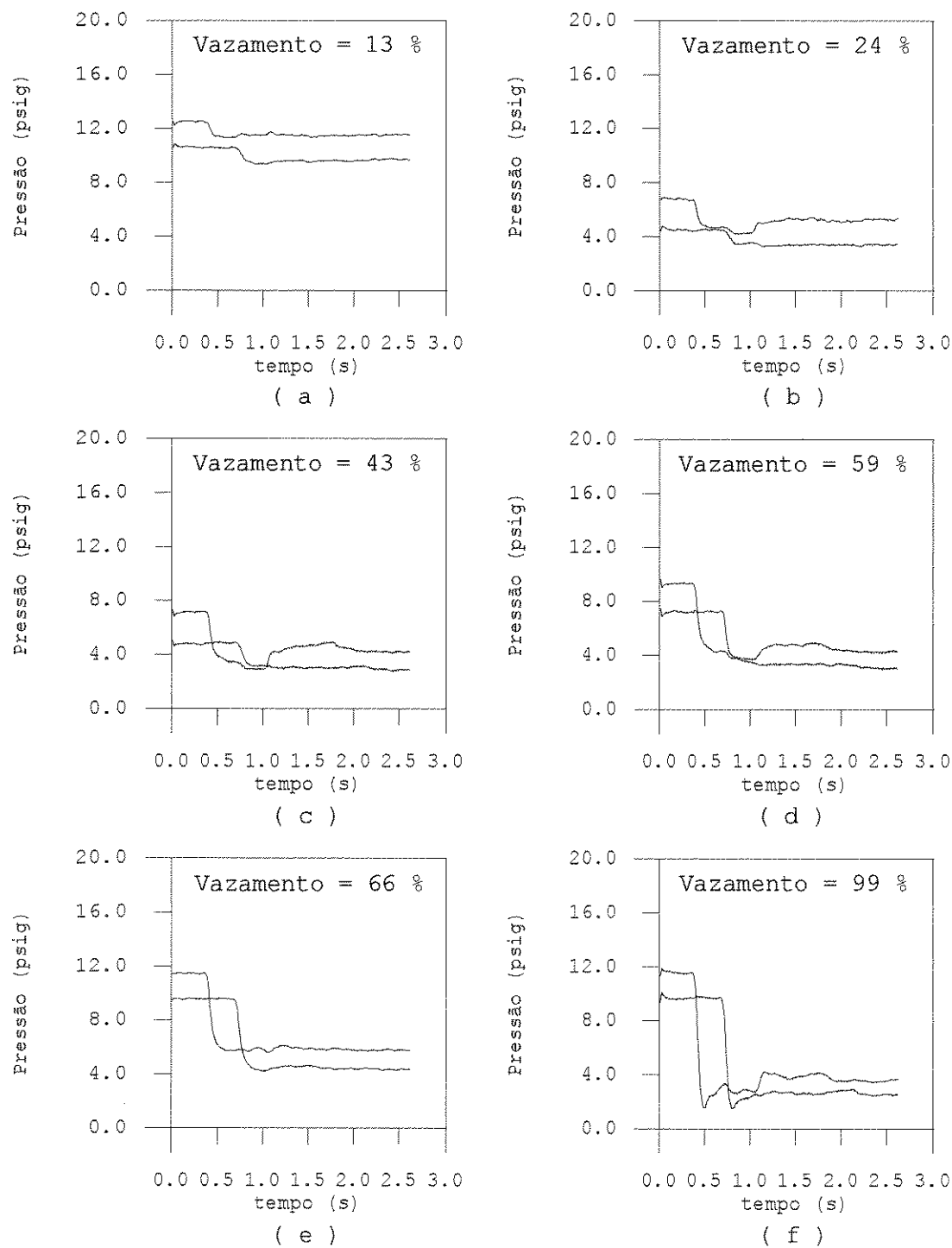


Figura 6.1.3 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 7000 e configuração 1.

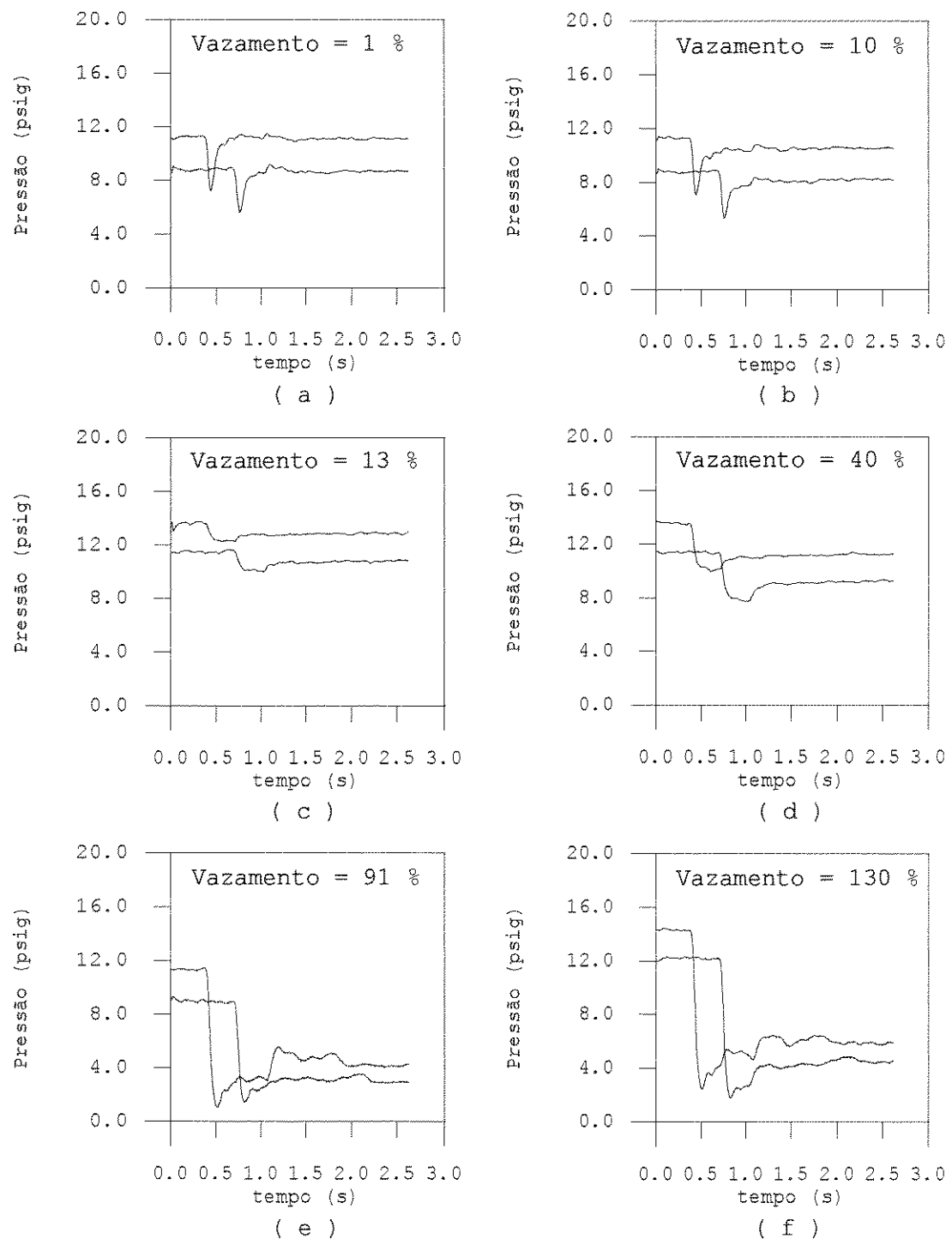


Figura 6.1.4 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 8000 e configuração 1.

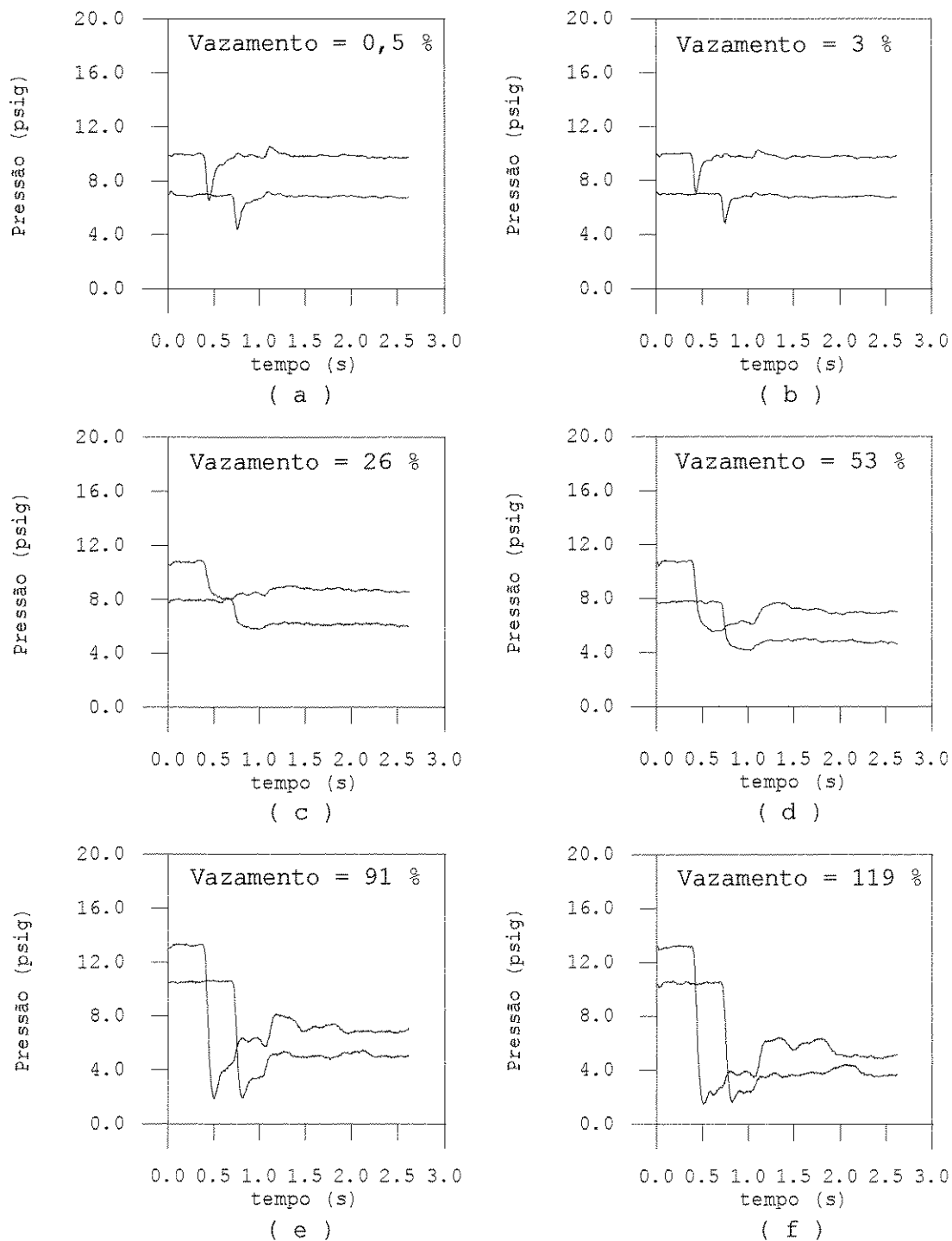


Figura 6.1.5 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 9000 e configuração 1.

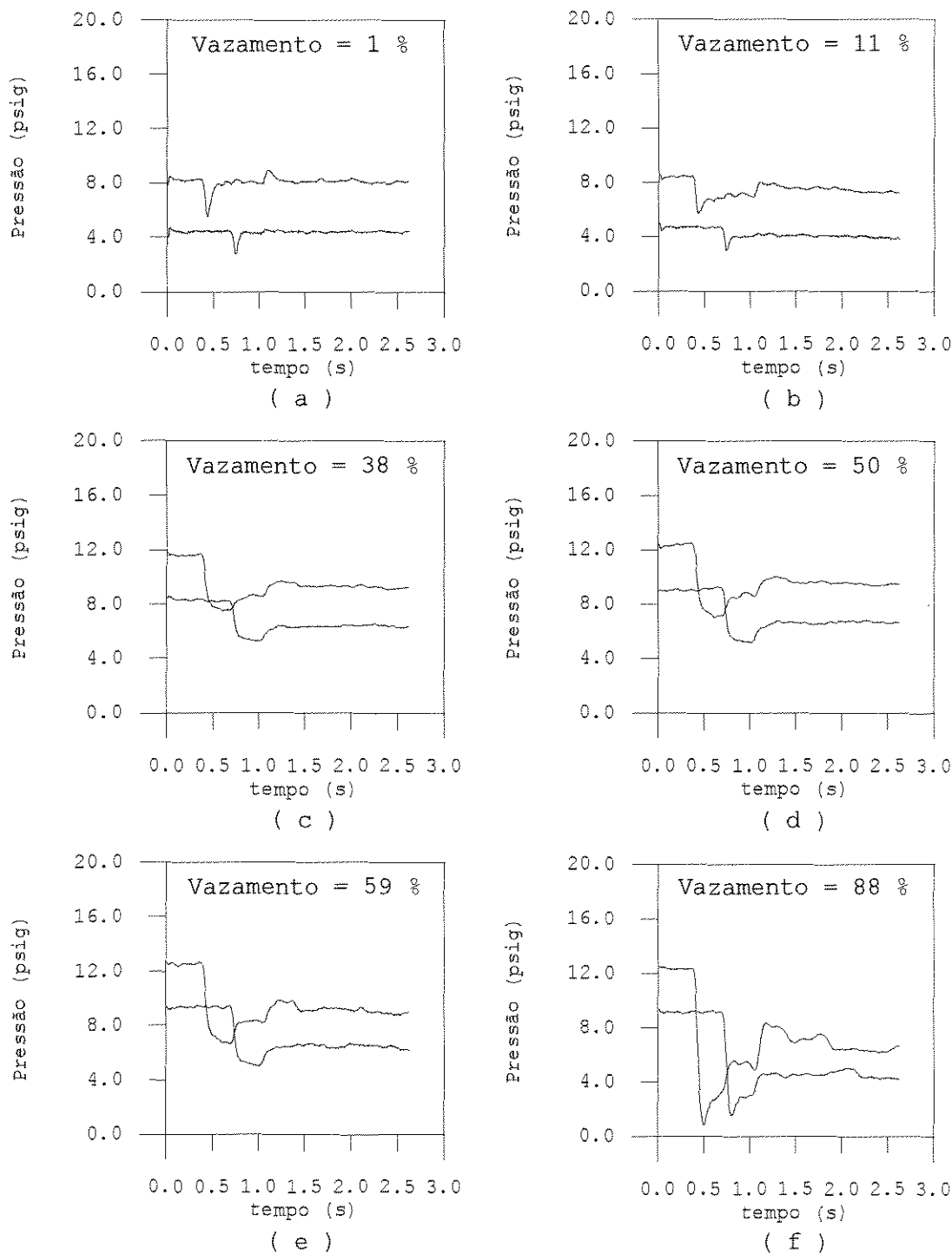


Figura 6.1.6 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 10000 e configuração 1.

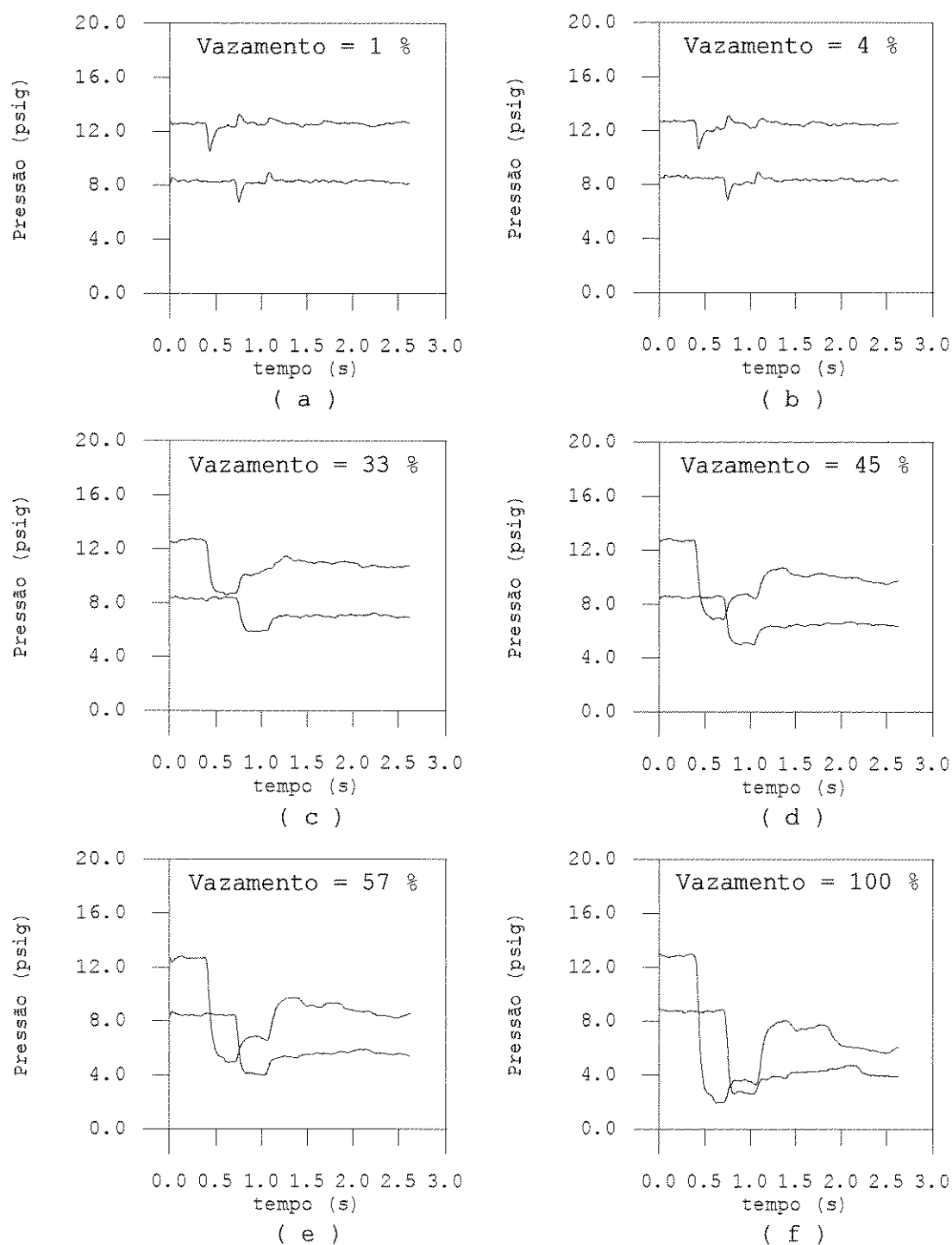


Figura 6.1.7 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 11000 e configuração 1.

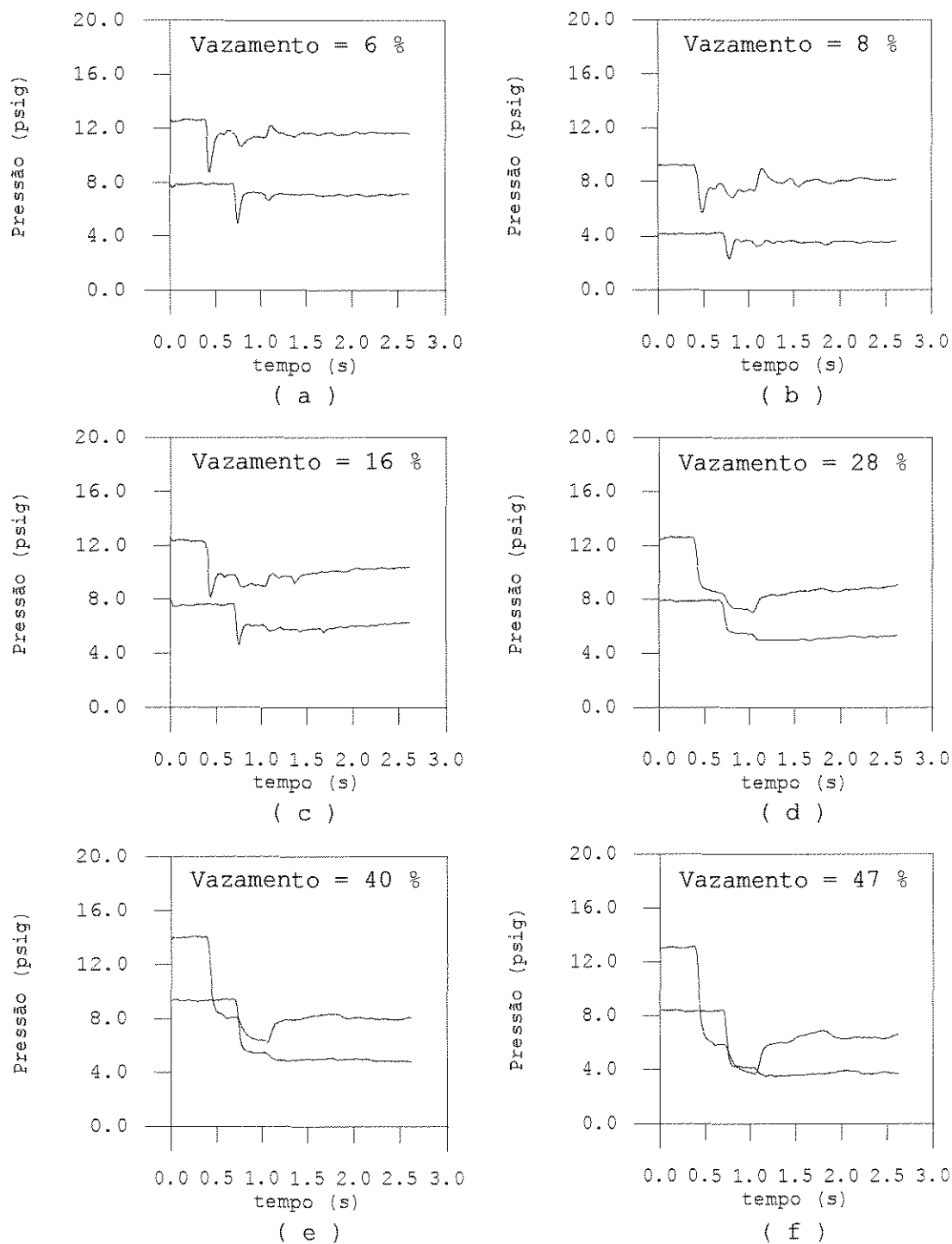


Figura 6.1.8 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 12000 e configuração 1.

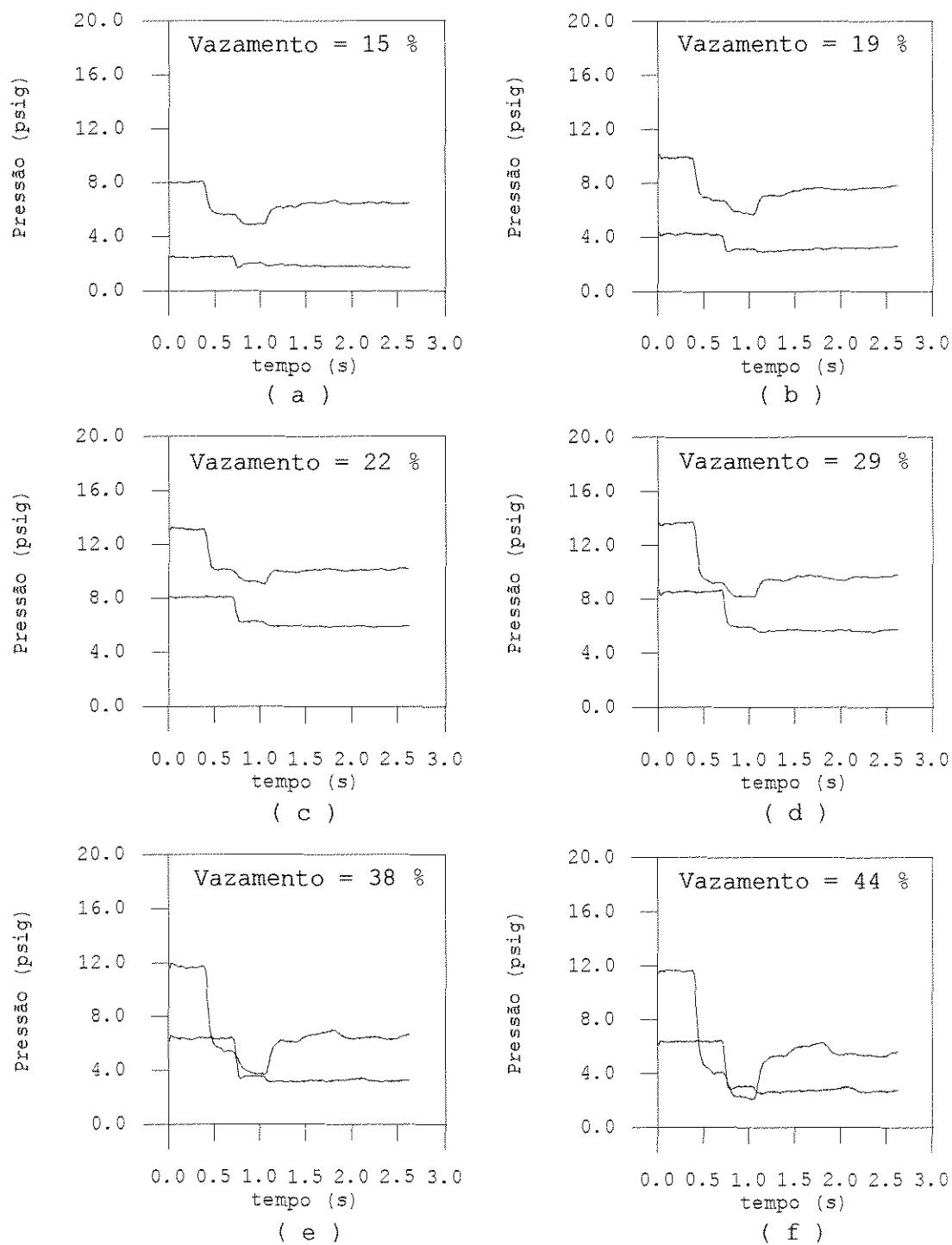


Figura 6.1.9 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 13000 e configuração 1.

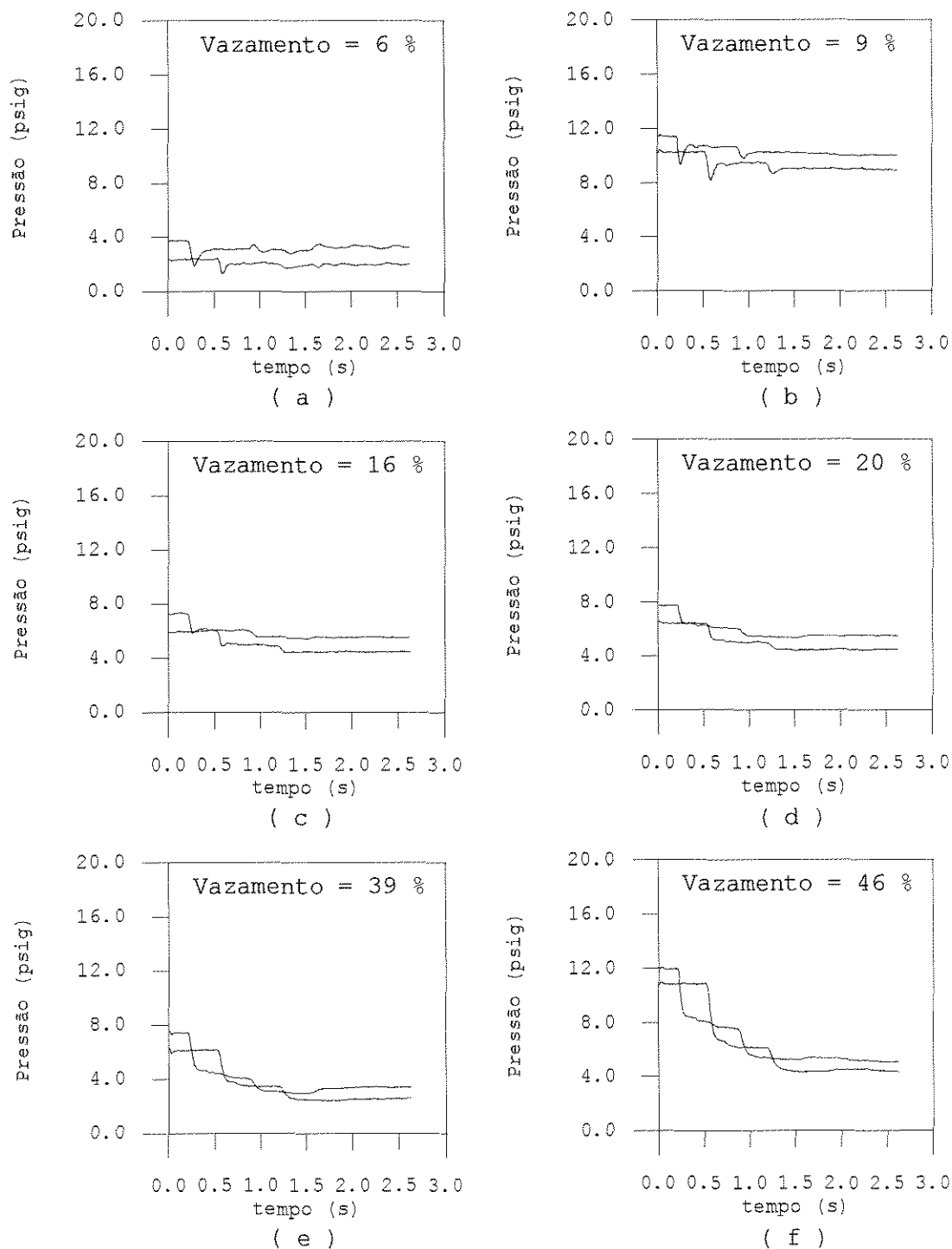


Figura 6.1.10 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 5000 e configuração 2.

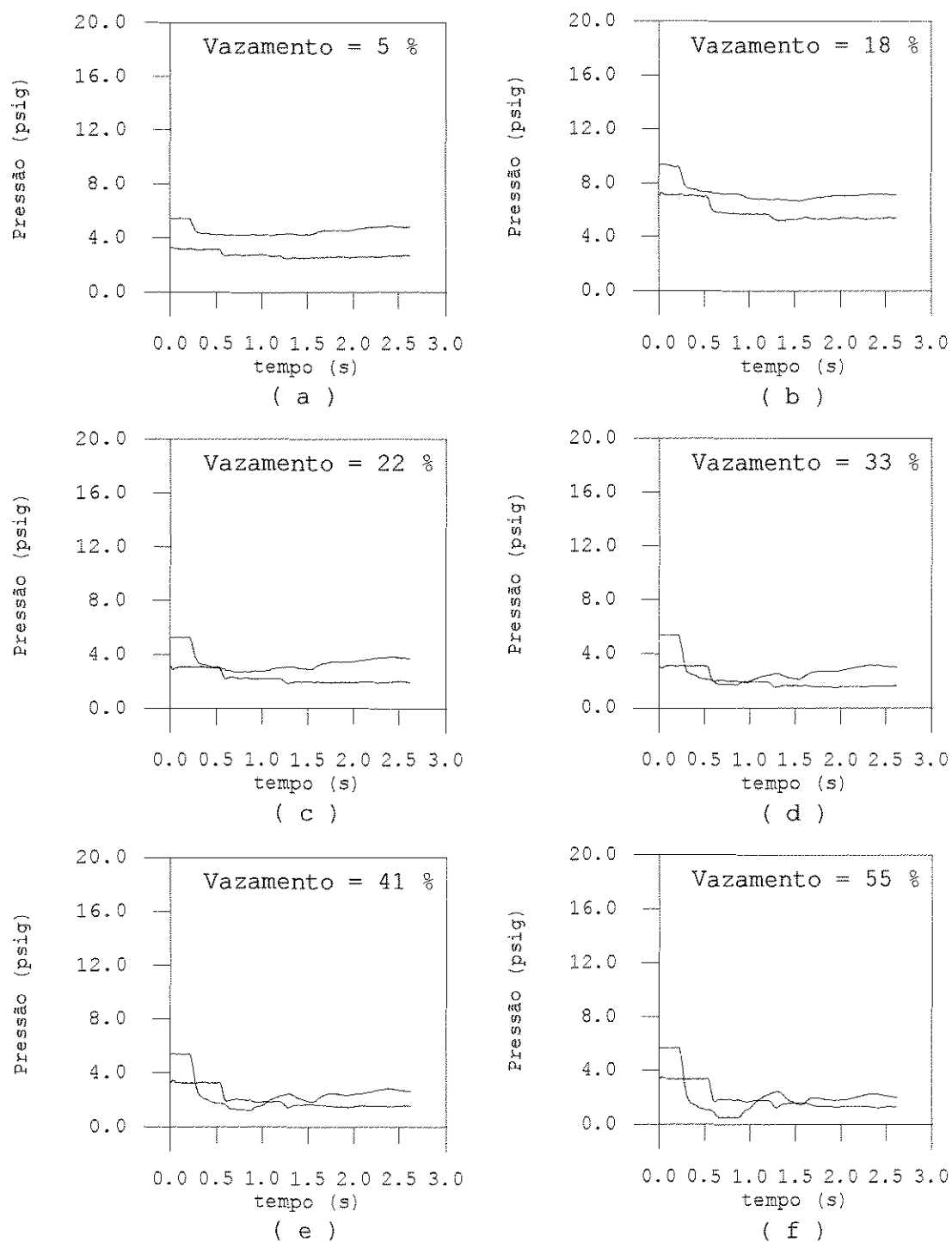


Figura 6.1.11 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 7000 e configuração 2.

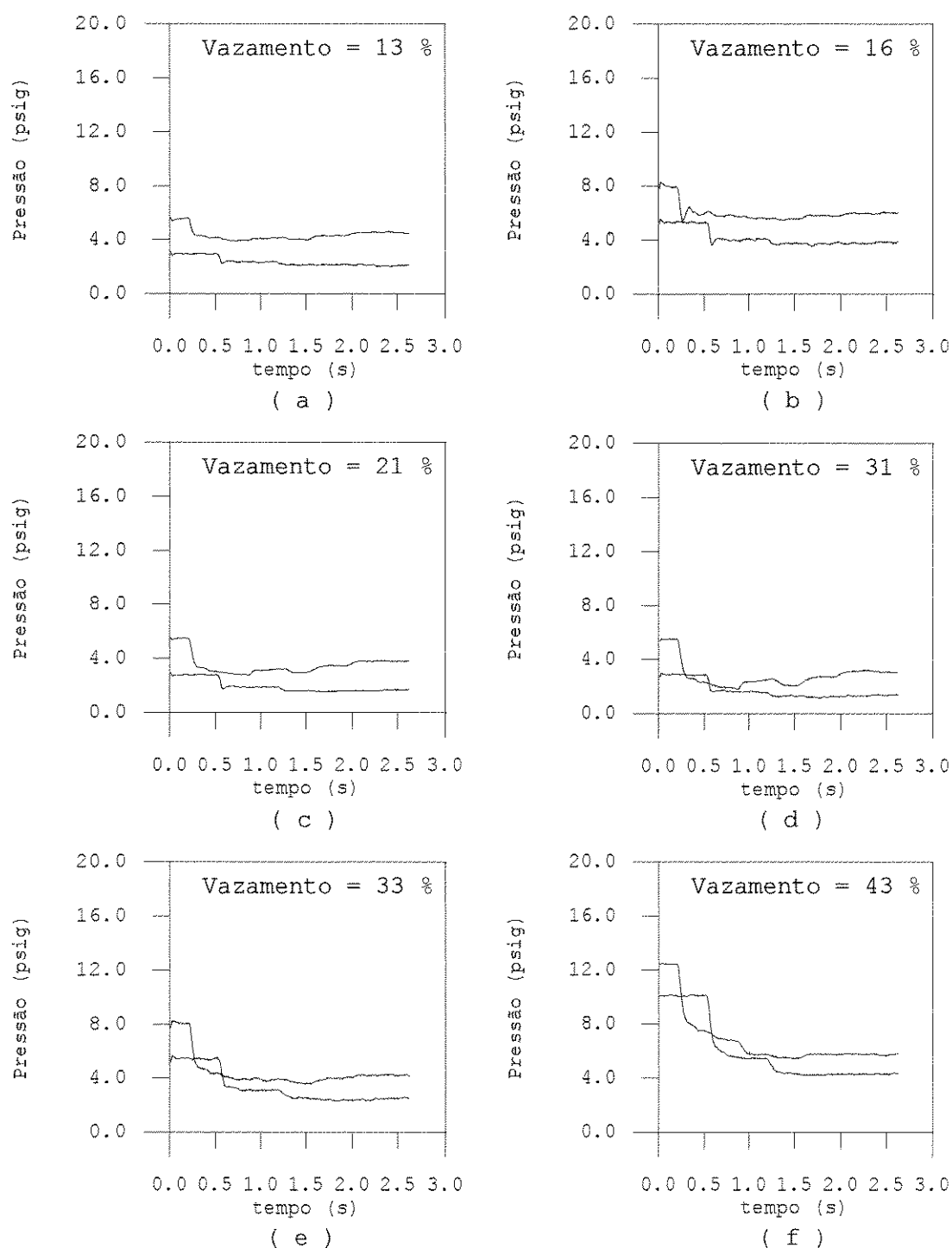


Figura 6.1.12 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 8000 e configuração 2.

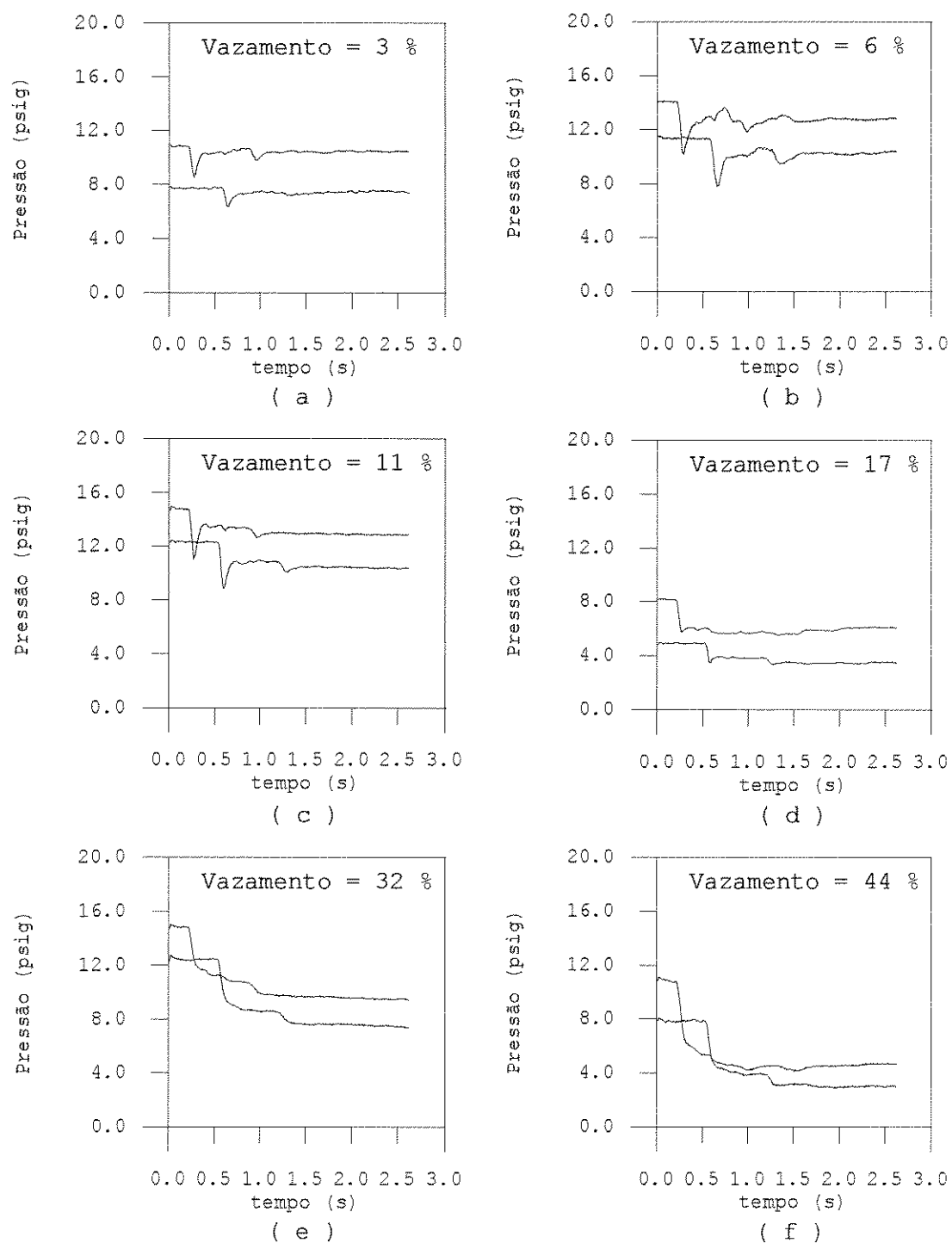


Figura 6.1.13 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 9000 e configuração 2.

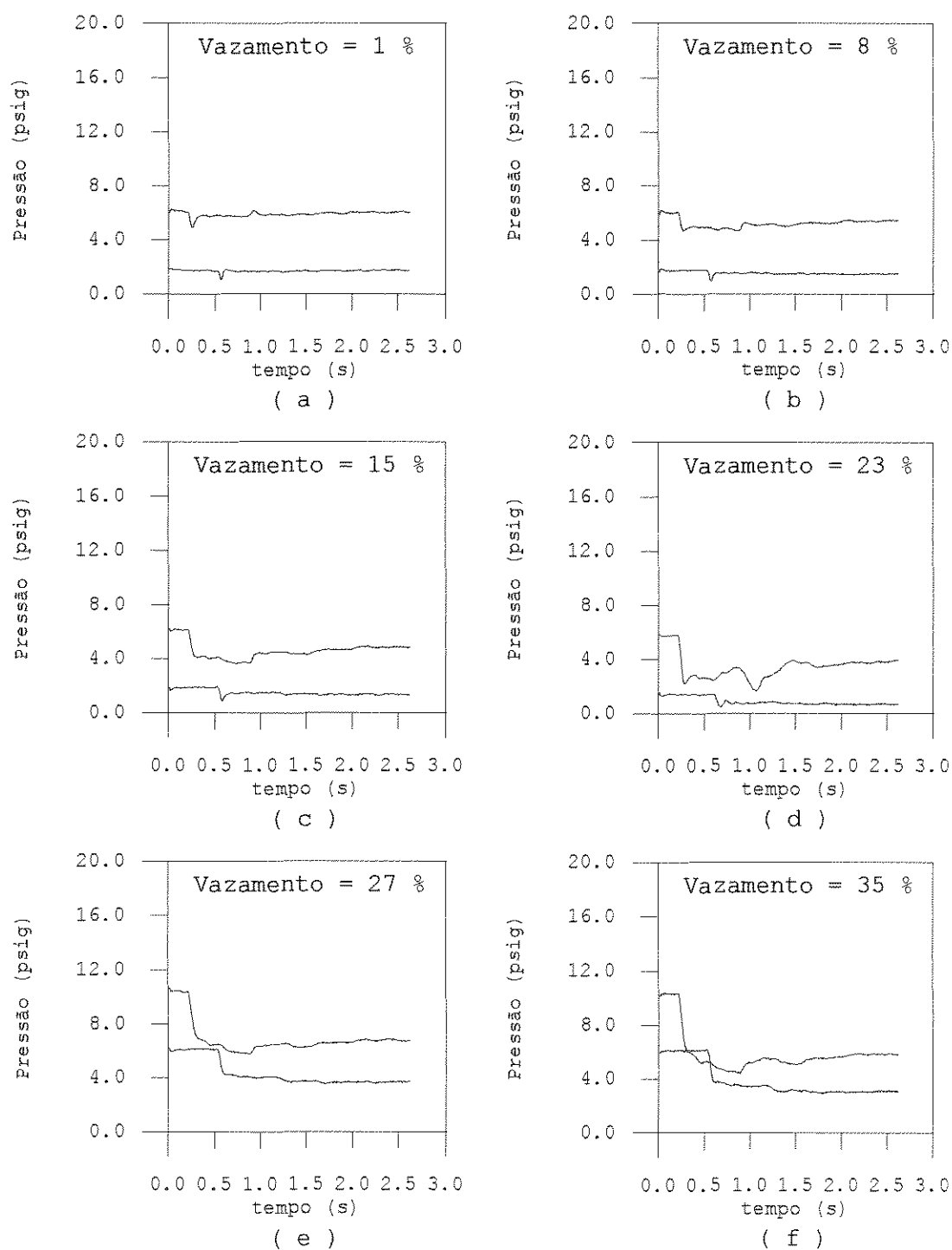


Figura 6.1.14 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 11000 e configuração 2.

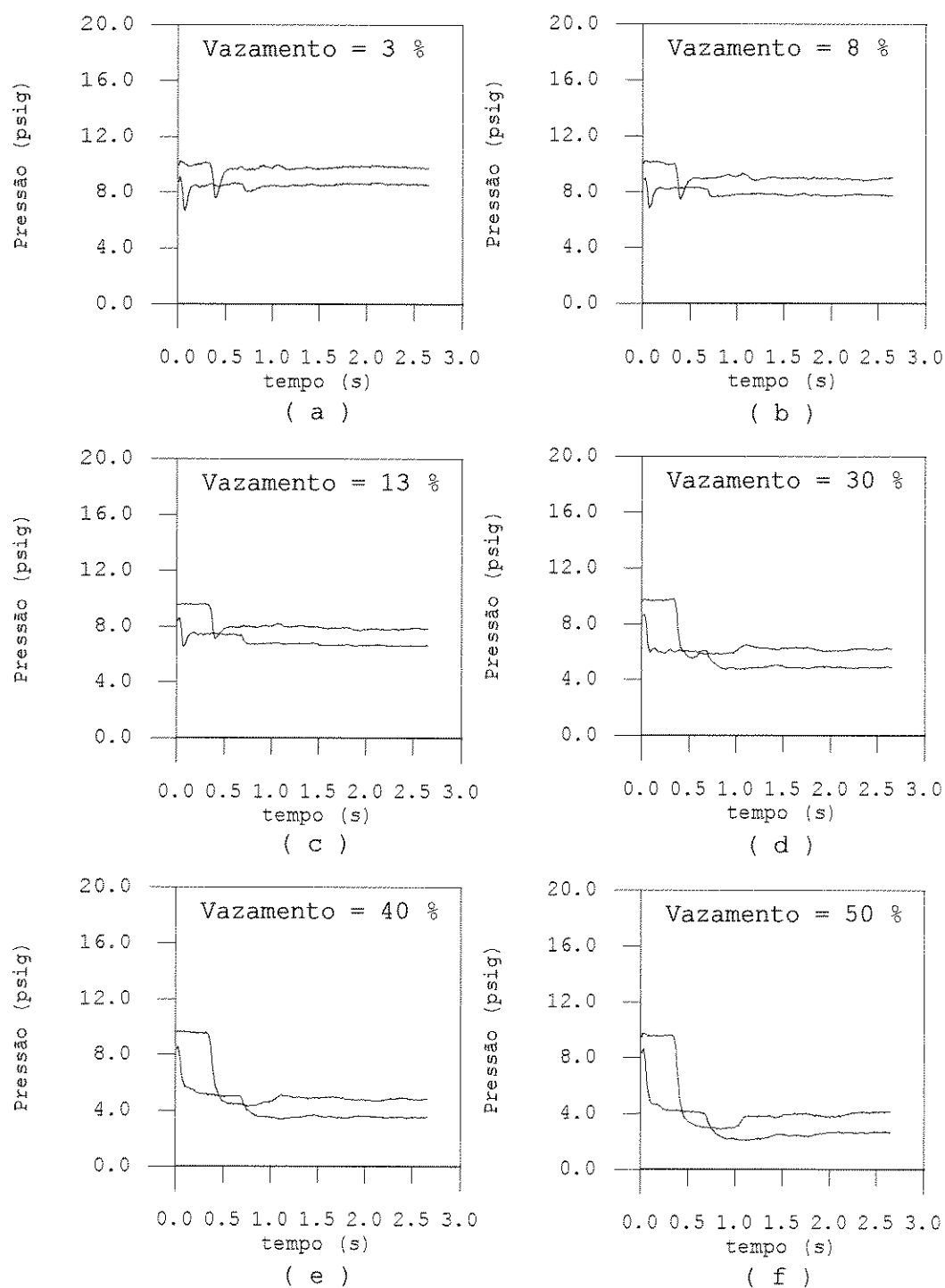


Figura 6.1.15 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 5000 e configuração 3.

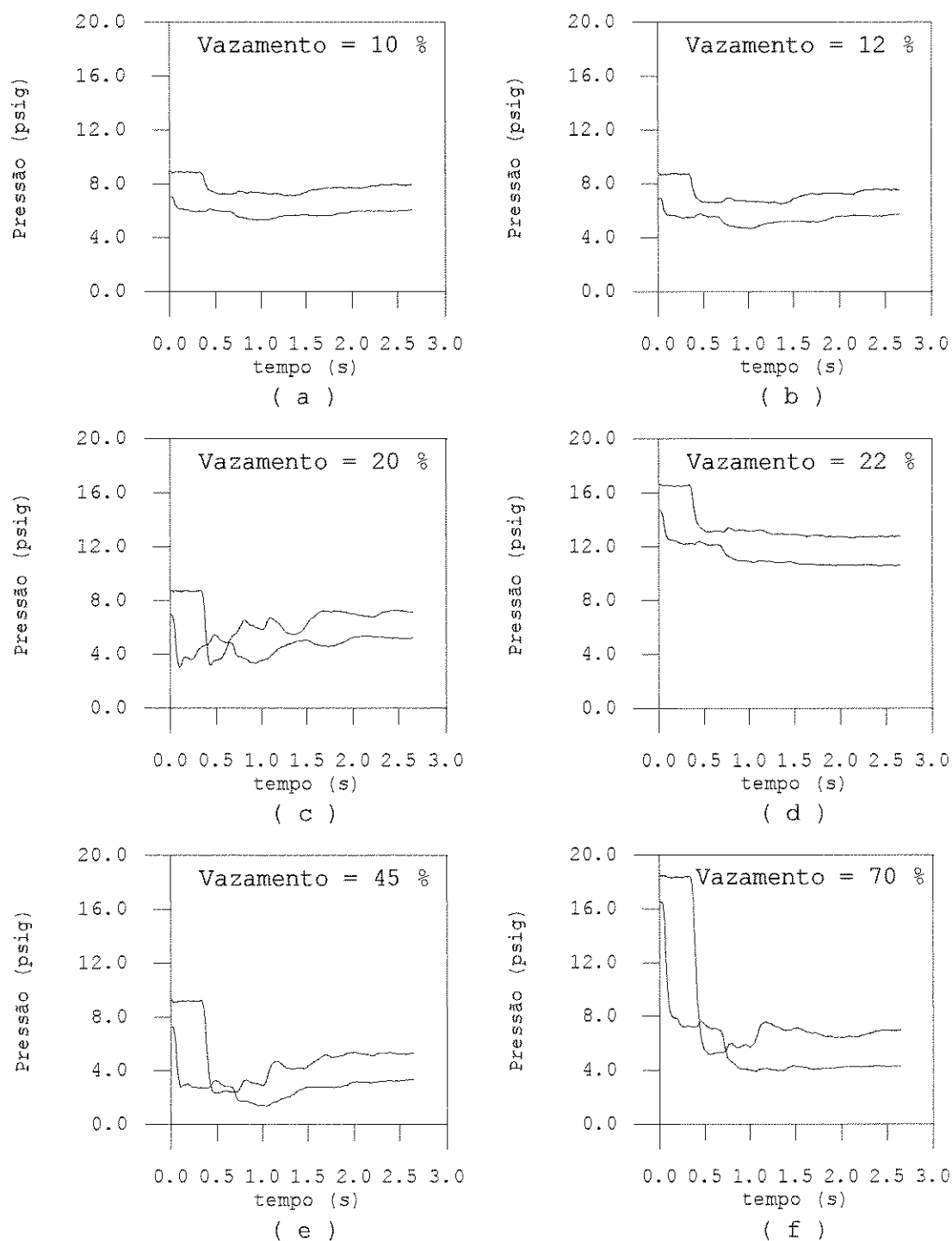


Figura 6.1.16 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 7000 e configuração 3.

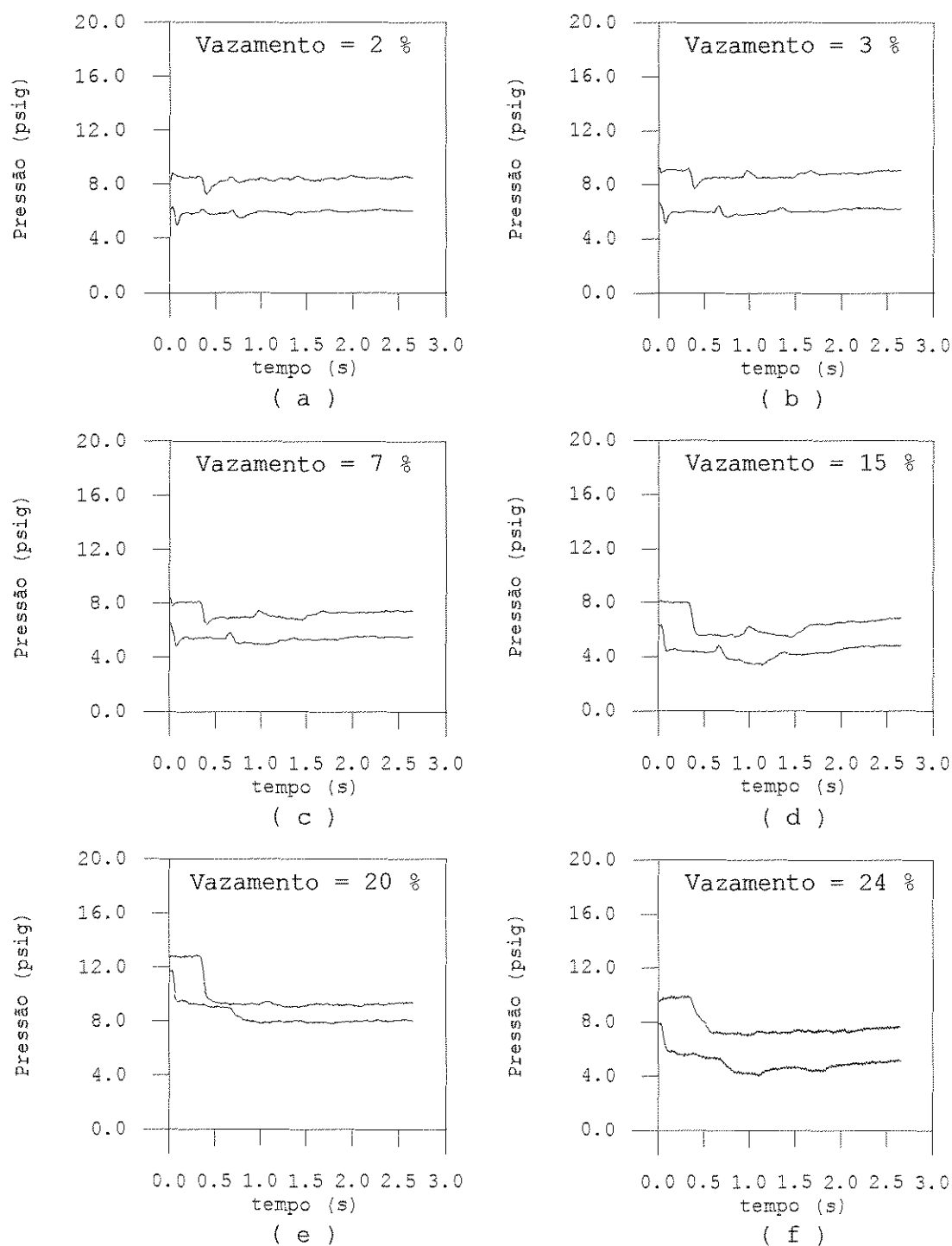


Figura 6.17 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 8000 e configuração 3.

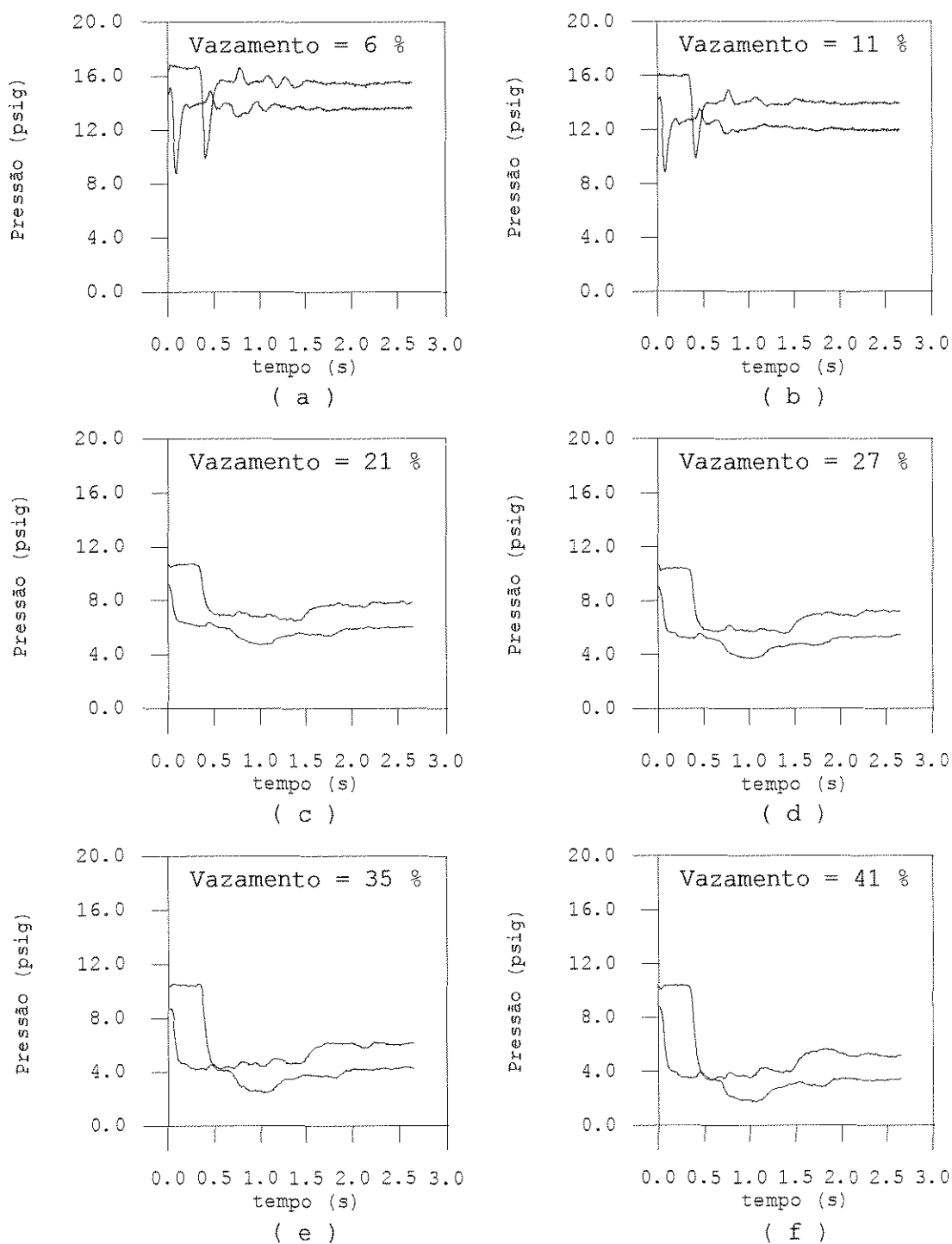


Figura 6.1.18 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 9000 e configuração 3.

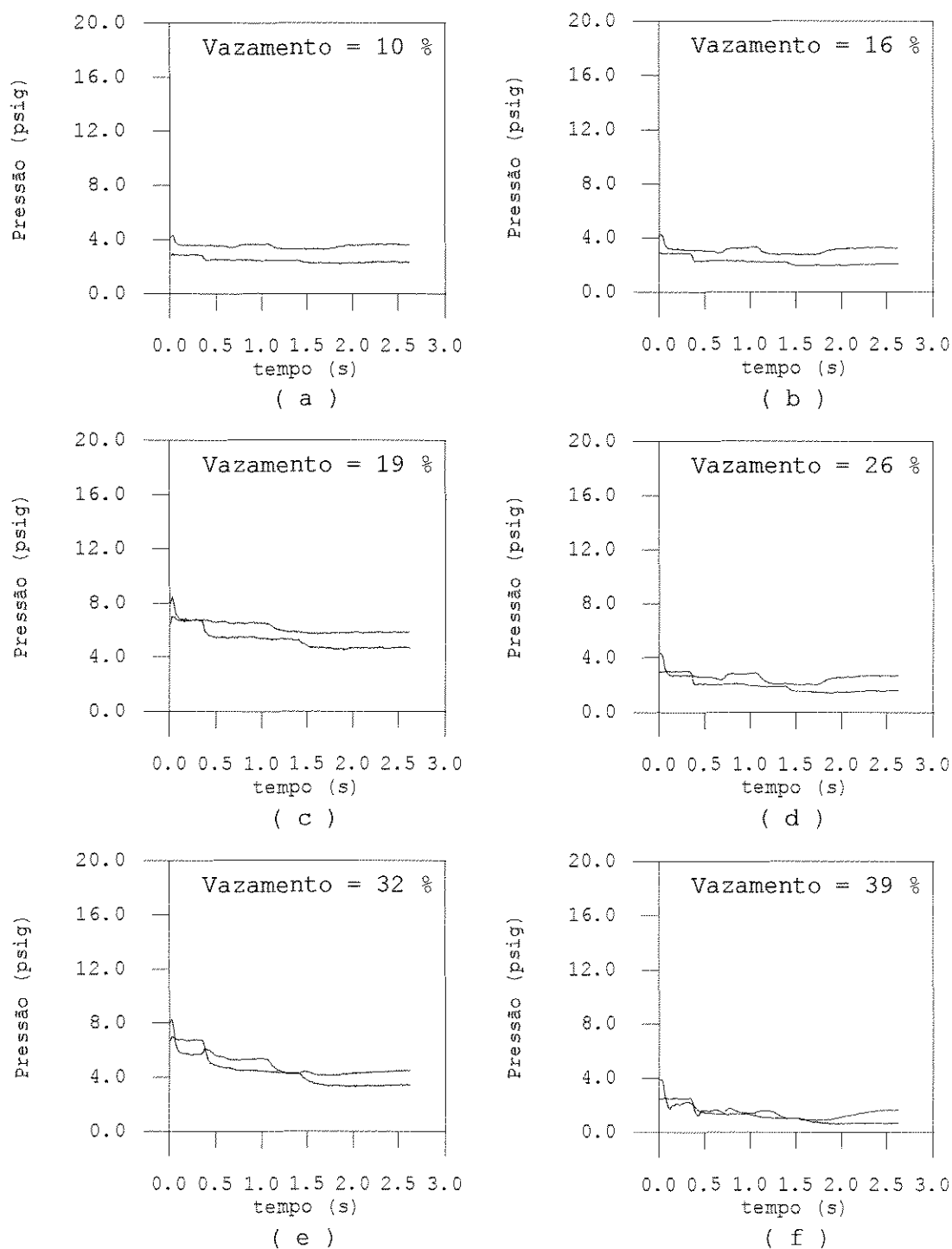


Figura 6.1.19 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 5000 e configuração 4.

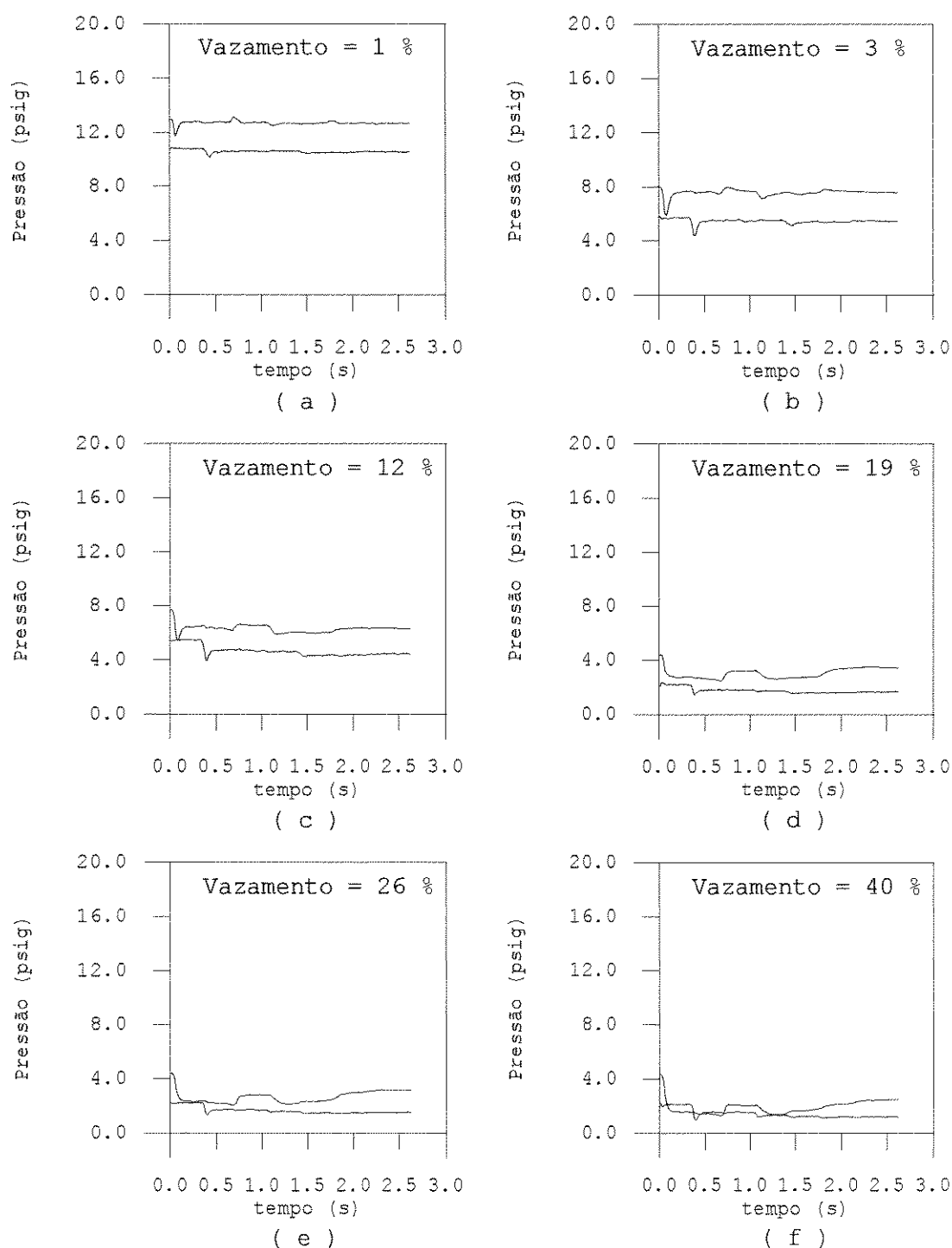


Figura 6.1.20 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 7000 e configuração 4.

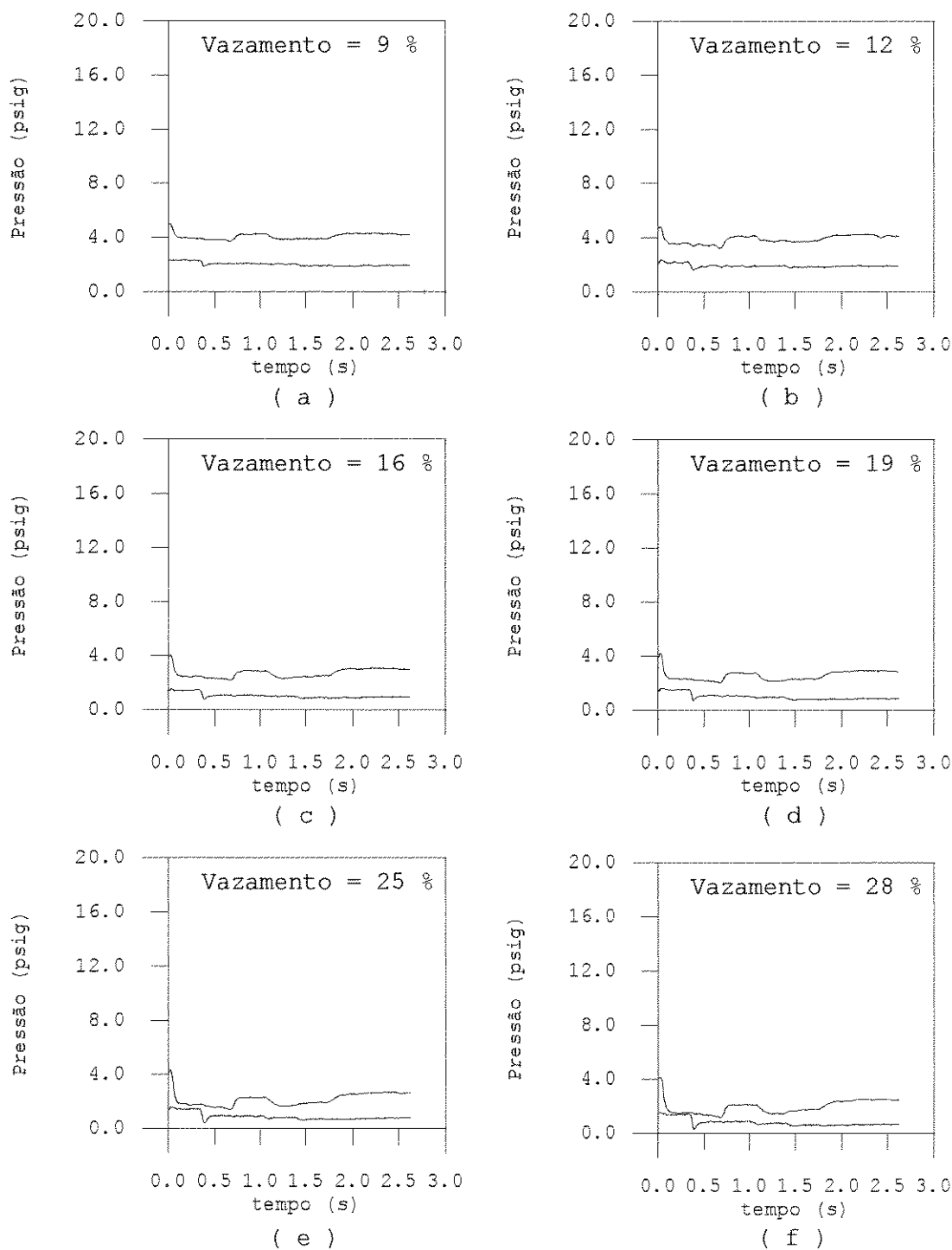


Figura 6.1.21 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 8000 e configuração 4.

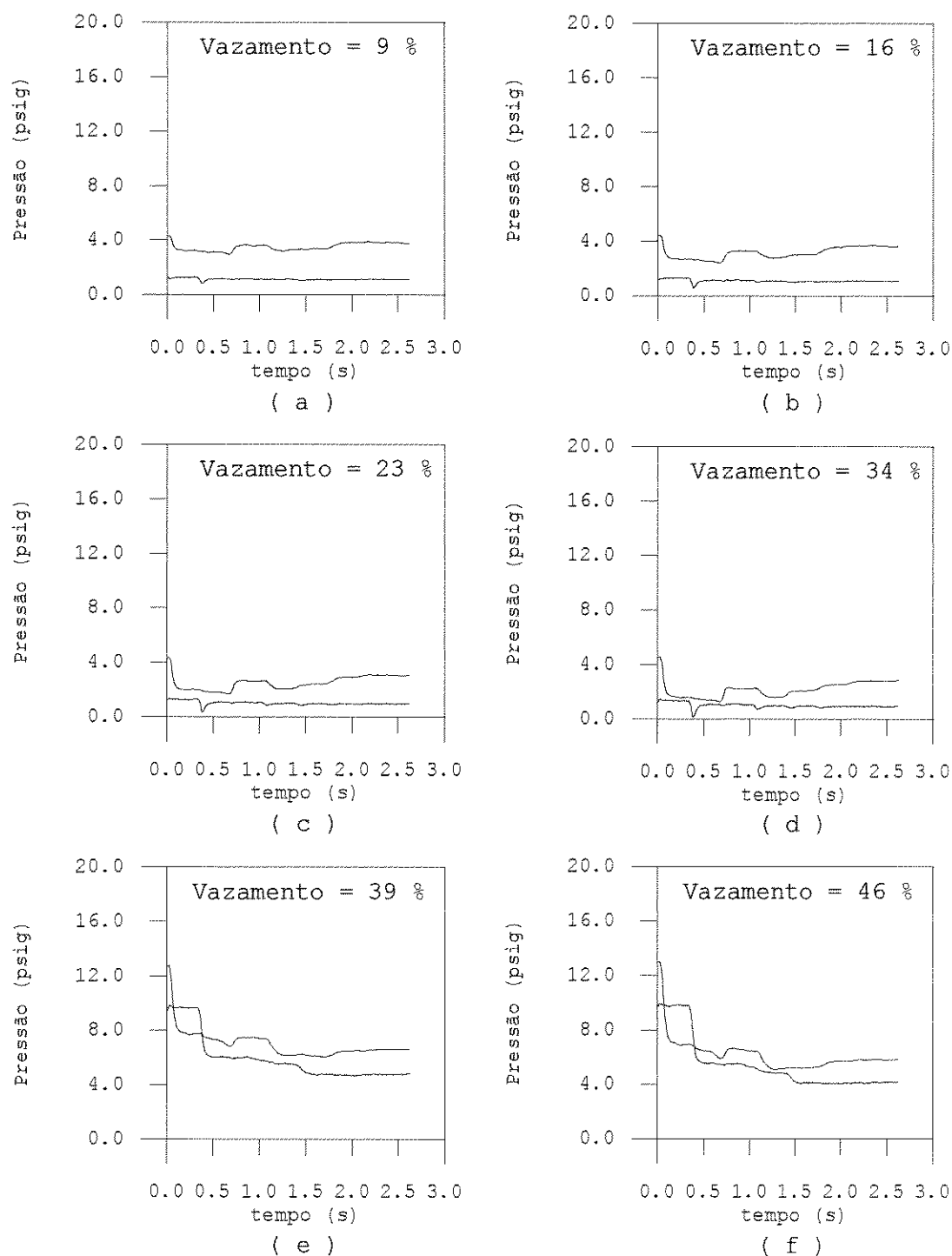


Figura 6.1.22 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 9000 e configuração 4.

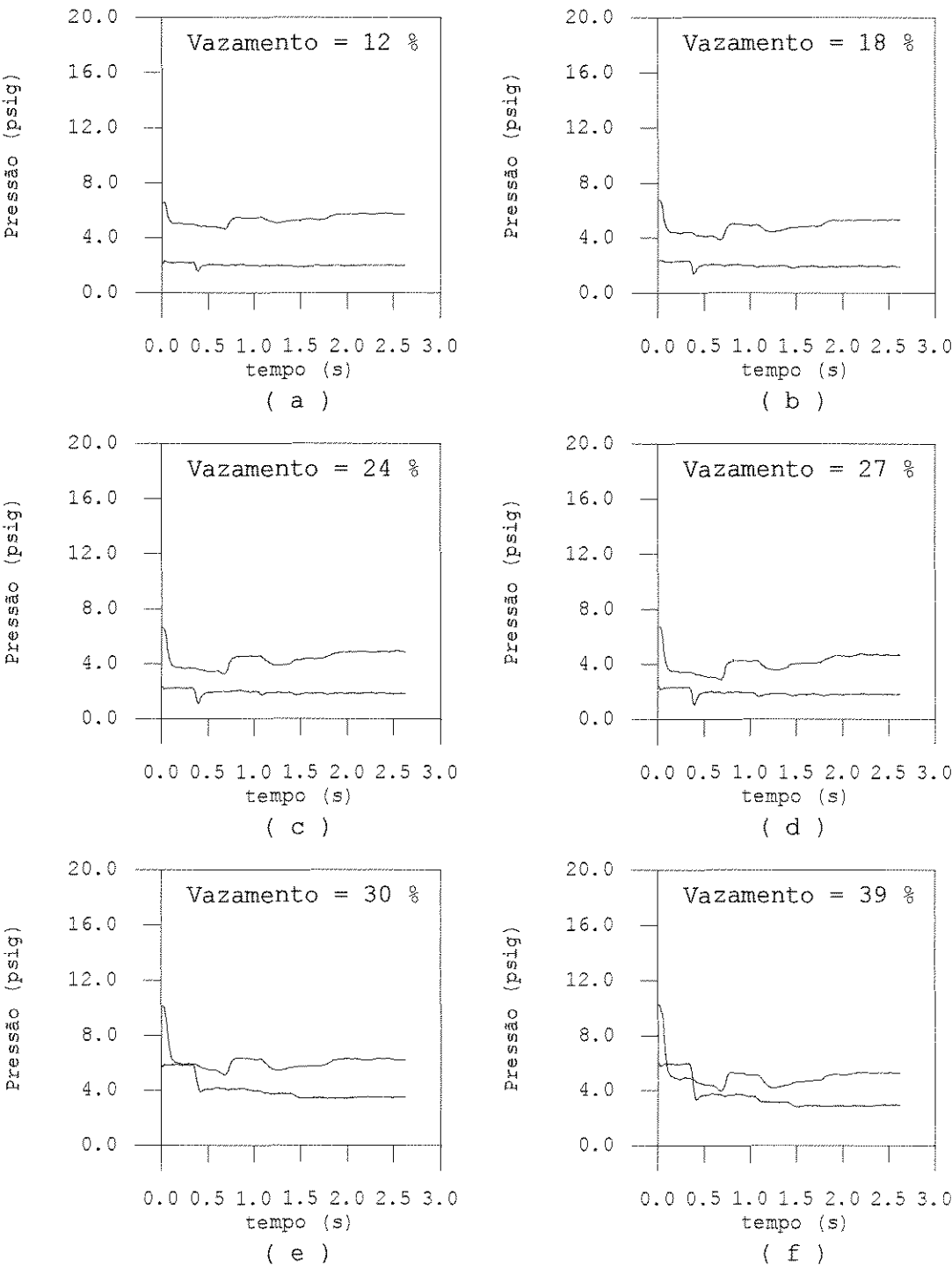


Figura 6.1.23 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 11000 e configuração 4.

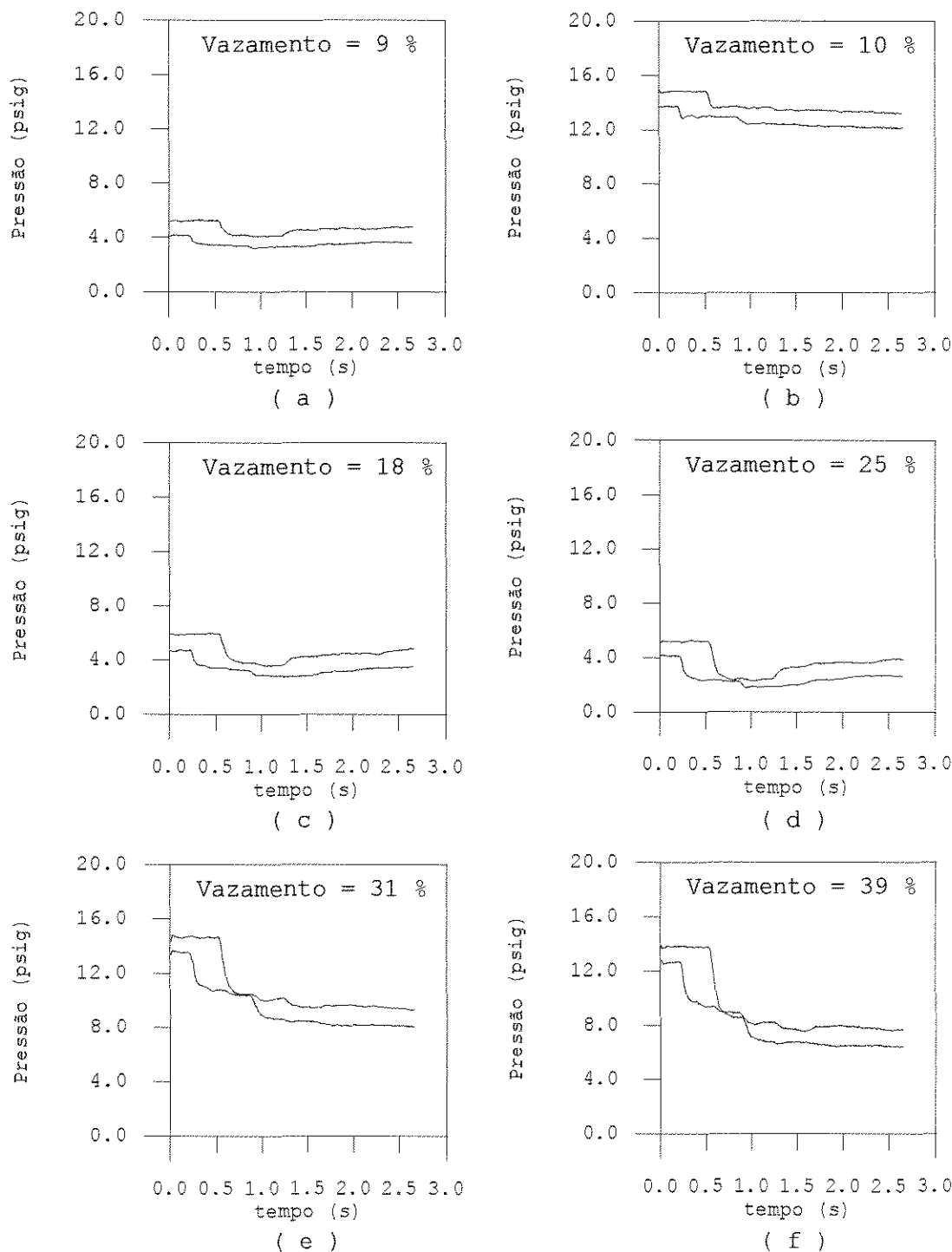


Figura 6.1.24 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 5000 e configuração 5.

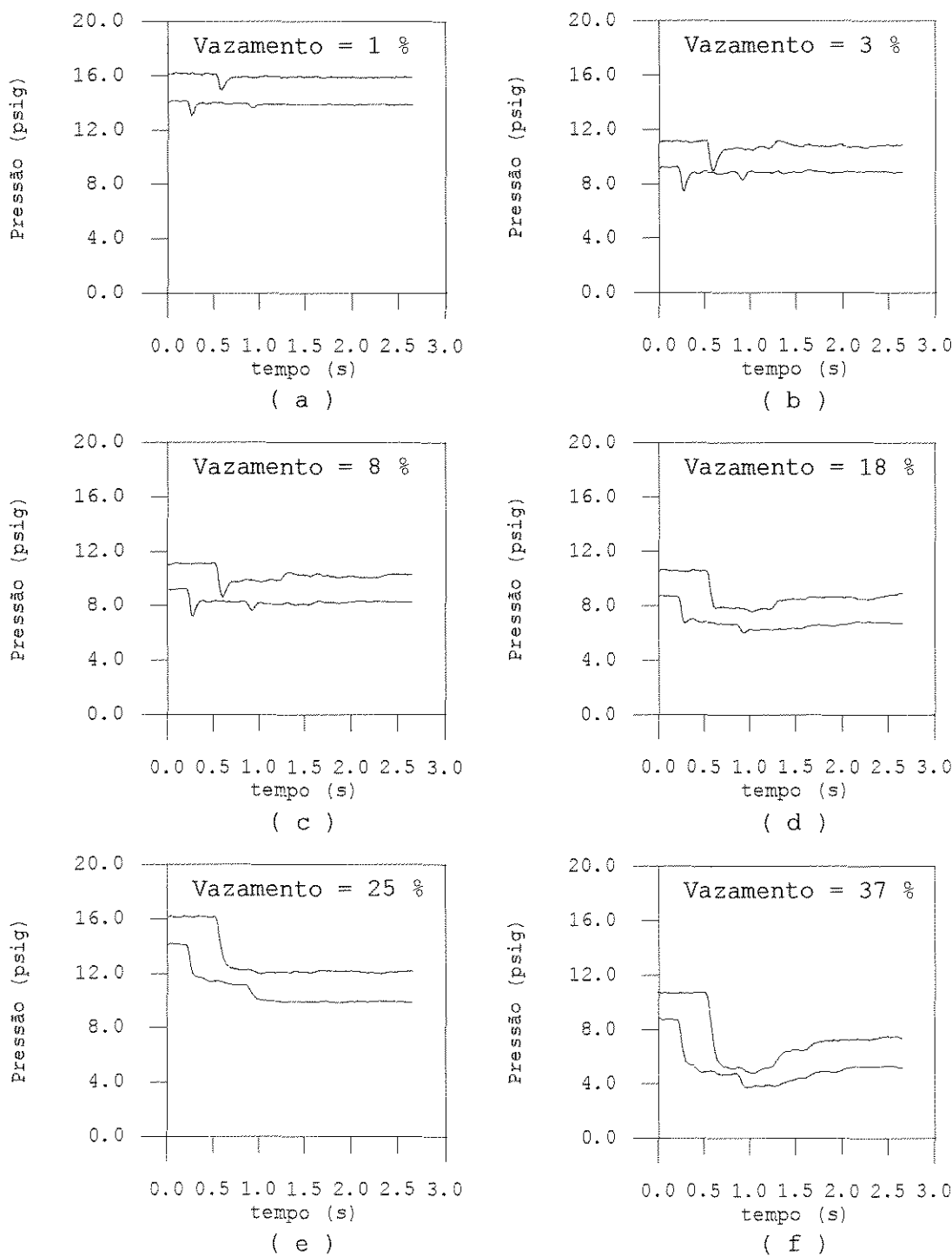


Figura 6.1.25 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 7000 e configuração 5.

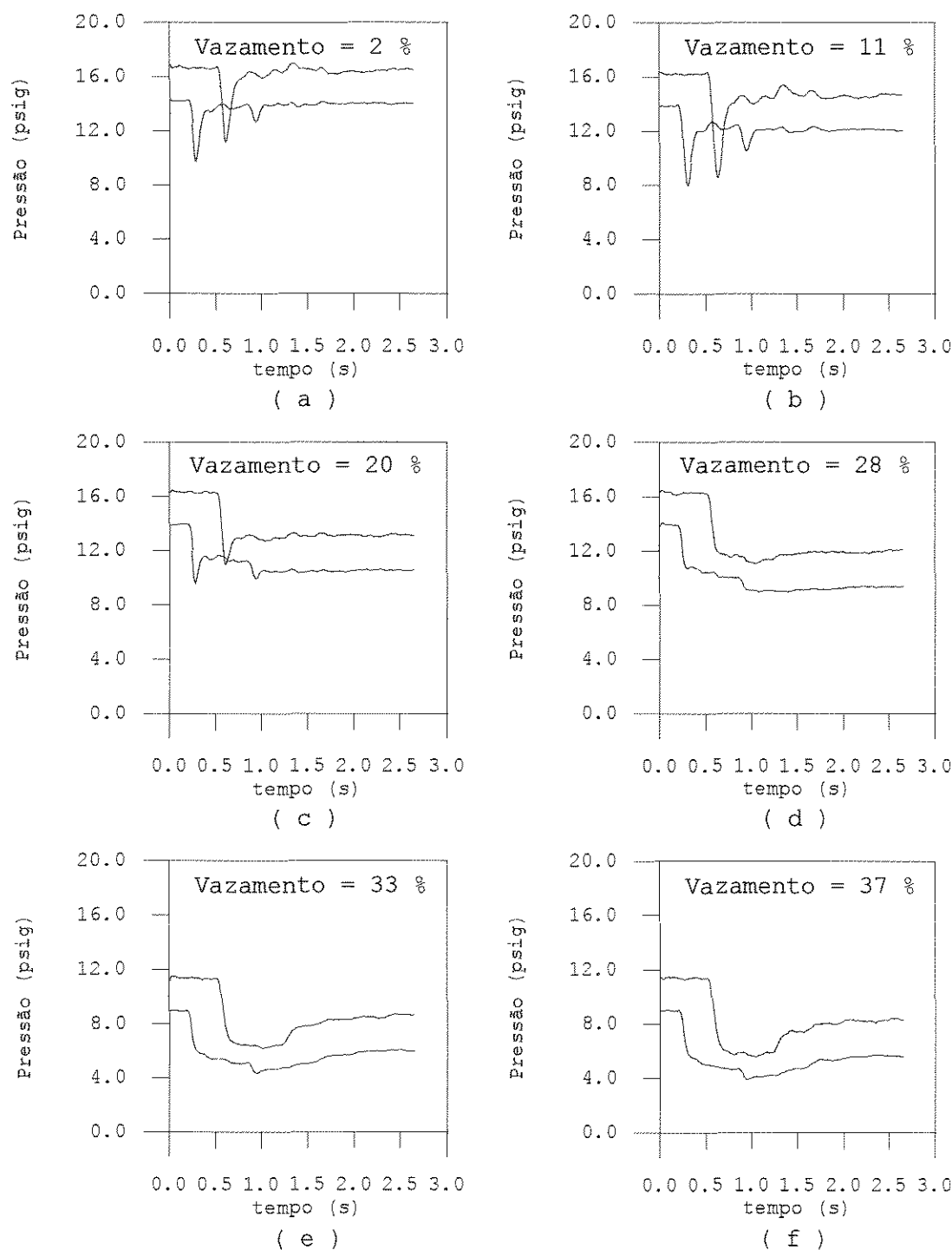


Figura 6.1.26 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 8000 e configuração 5.

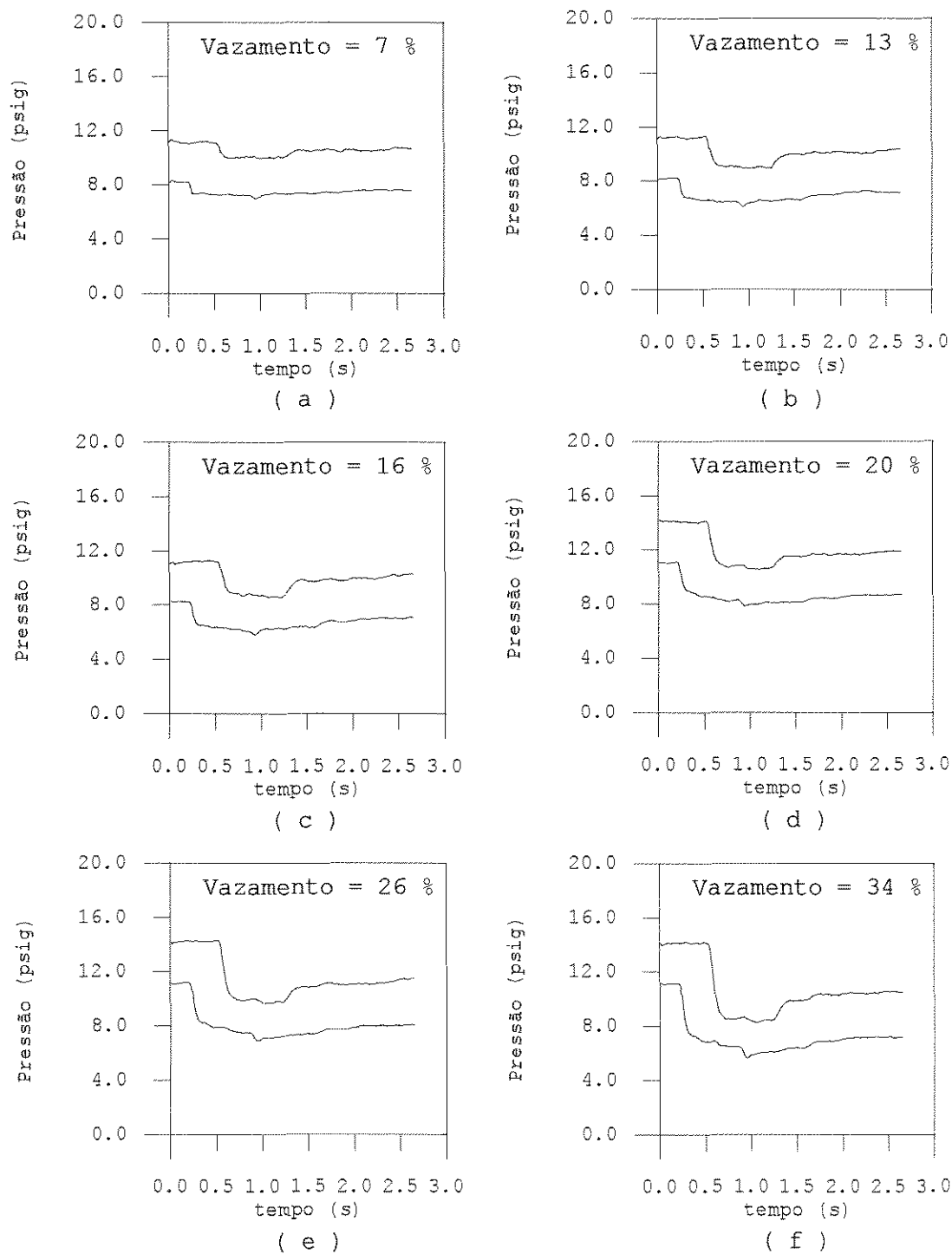


Figura 6.1.27 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 9000 e configuração 5.

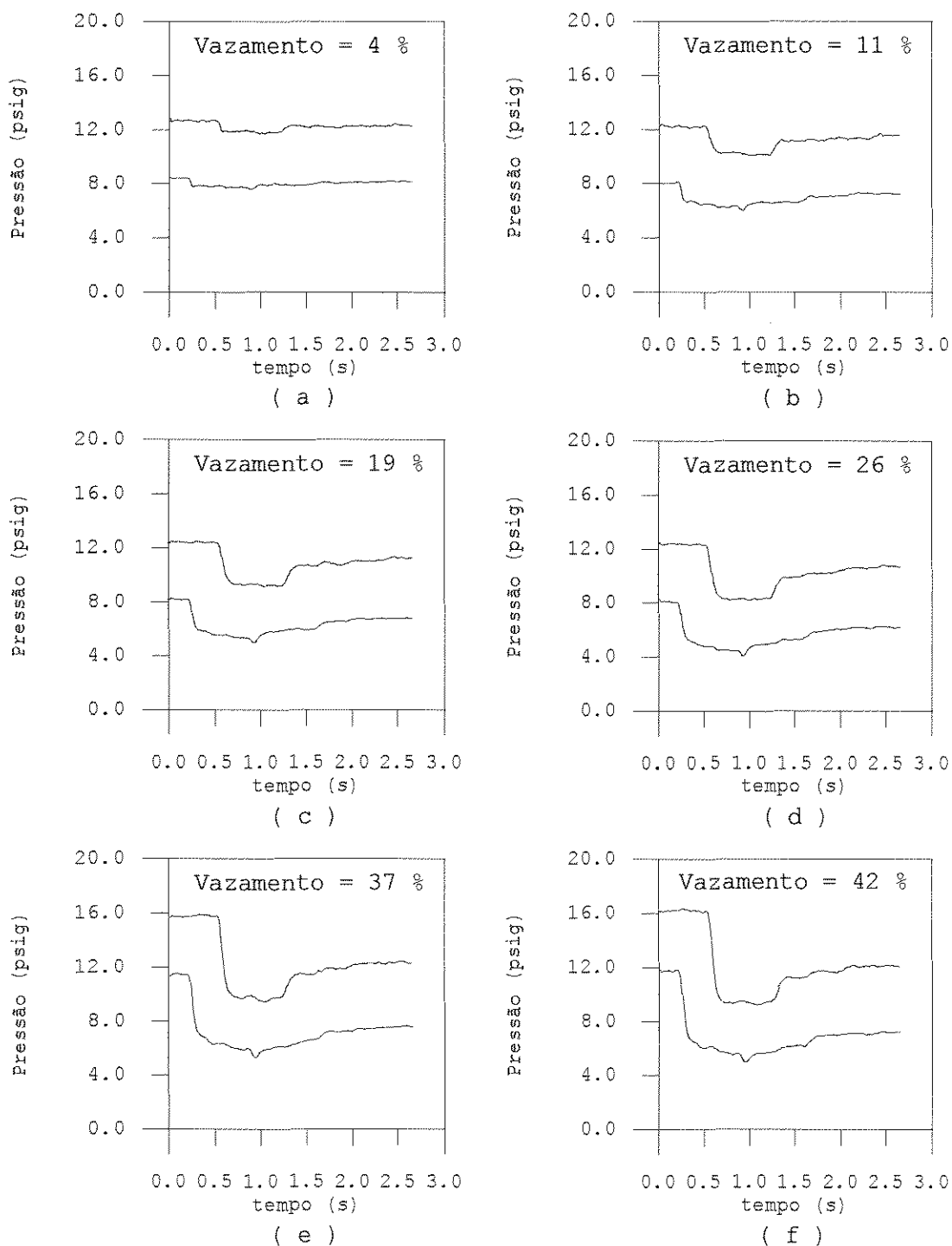


Figura 6.1.28 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 11000 e configuração 5.

6.4 - Análise dos resultados experimentais

A partir dos perfis transientes de pressão obtidos experimentalmente, calculou-se a velocidade de propagação do transiente hidráulico e a queda de pressão na tubulação para todos os experimentos realizados. De posse destes cálculos, procurou-se analisar a influência de diversos parâmetros hidráulicos (pressão na tubulação, posição do vazamento, ordem de grandeza do vazamento, vazão de escoamento da água) sobre as variáveis calculadas, possibilitando assim, uma melhor compreensão dos fenômenos ocasionados pelo aparecimento de um vazamento em uma tubulação.

6.4.1 - Queda de pressão na tubulação

O surgimento de um vazamento em uma tubulação qualquer, faz com que a pressão no interior da mesma decresça de um certo valor, ΔP_1 . Este decréscimo na pressão ocasiona uma aceleração da bomba centrífuga de modo que a vazão de água entrando na tubulação aumenta. Como consequência ocorre um aumento na pressão no interior da tubulação, inferior a ΔP_1 . Com a dissipação do transiente hidráulico a pressão nos tubos estabiliza-se em um novo estado estacionário. A diferença de pressão entre os dois estados estacionários é ΔP_2 . Este comportamento é confirmado pelos perfis de pressão apresentados nas figuras 6.1.i. Entretanto, para alguns dos experimentos realizados, ΔP_1 não pode ser visualizada. Esse fato ocorre devido à presença de ar em excesso no interior da tubulação, sendo que o ar entrava na tubulação no instante que a válvula solenóide era aberta.

As figuras 6.2.i e 6.3.i mostram a influência da vazão do vazamento, do número de Reynolds e da distância do vazamento aos transdutores sobre os valores de ΔP_1 e ΔP_2 , respectivamente.

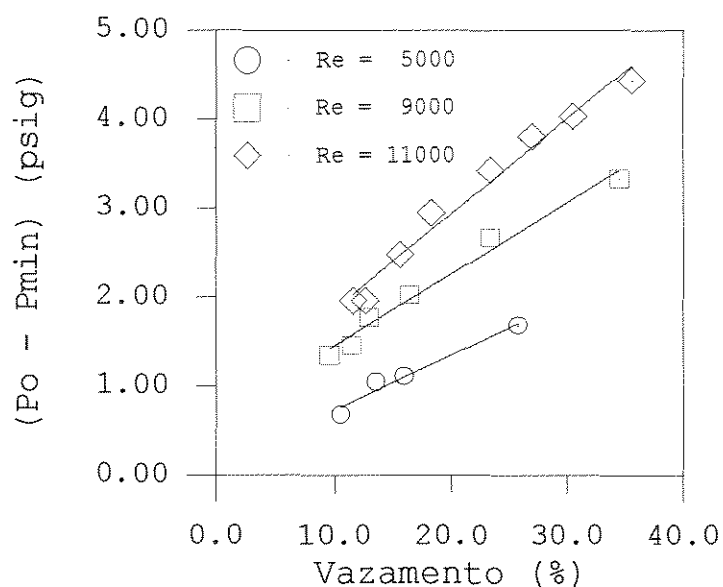


Figura 6.2.1 - Influência da magnitude do vazamento e da vazão de líquido sobre a queda de pressão máxima no interior da tubulação. Resultados obtidos para a configuração 4.

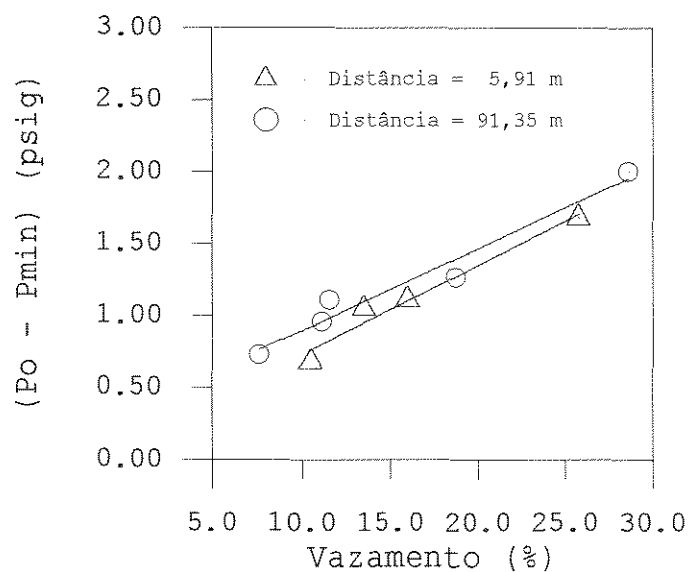


Figura 6.2.2 - Influência da distância transdutor-vazamento sobre a queda de pressão máxima no interior da tubulação. Resultados obtidos para Reynolds 5000.

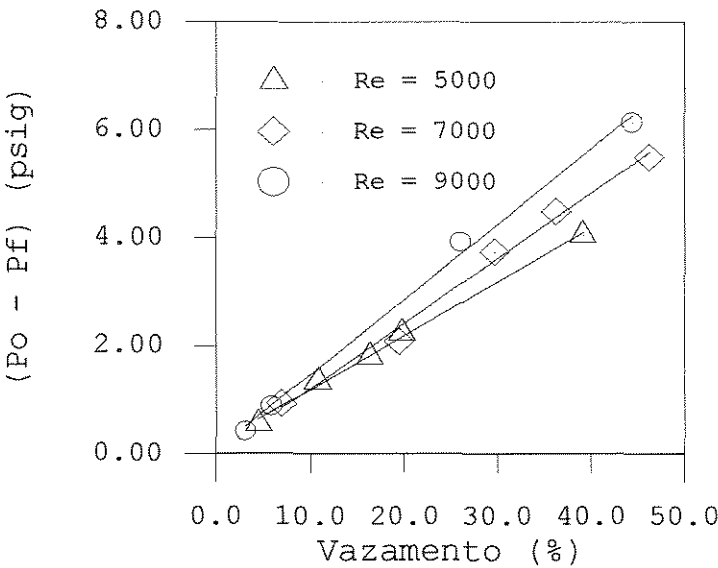


Figura 6.3.1: Influência da magnitude do vazamento e da vazão de líquido sobre a queda de pressão entre os estados estacionários (ΔP_2). Resultados obtidos para configuração 2.

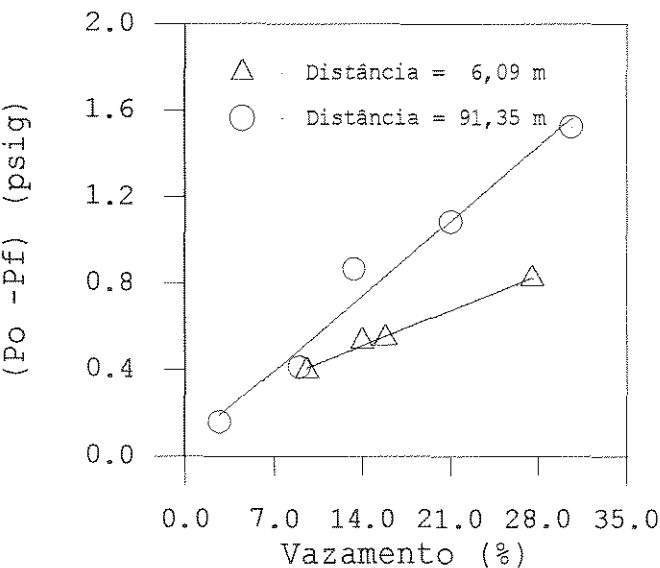


Figura 6.3.2 - Influência da distância transdutor-vazamento sobre a queda de pressão entre os estados estacionários(ΔP_2). Resultados obtidos para Reynolds 8000.

A figura 6.2.1 mostra que quanto maior o vazamento, maior a perda de carga máxima (ΔP_1). A figura 6.3.1 mostra que a perda de carga entre os estados estacionários (ΔP_2) também aumenta com o tamanho do vazamento. Este aumento na perda de carga ocorre porque o vazamento de líquido provoca turbulência no interior da tubulação. Quanto maior a turbulência, maior a perda de carga no interior da tubulação. Observa-se também, que ΔP_1 e ΔP_2 variam linearmente com a vazão de líquido através da falha na tubulação, o que possibilita o cálculo da ordem de grandeza de um vazamento utilizando o perfil de pressão gerado.

As figuras 6.2.1 e 6.3.1 mostram ainda que, ΔP_1 e ΔP_2 aumentam com o aumento da vazão de escoamento de líquido. Já nas figuras 6.2.2 e 6.3.2, pode-se ver que ΔP_1 e ΔP_2 são maiores para os transdutores mais distantes do vazamento. Estes fenômenos são devidos à dissipação de energia provocada pelo atrito entre a onda de pressão e as paredes do tubo, sendo que quanto maior a velocidade de escoamento e a distância entre os transdutores e o vazamento, maior será a dissipação de energia.

Estes resultados podem ser confirmado ainda, comparando-se as figuras 6.2.i e 6.3.i, com os resultados experimentais e com a simulação teórica de um vazamento ocorrendo em uma tubulação semelhante, mas de comprimento bem menor apresentados em [8].

6.4.2 - Vazamento mínimo detectado

O sistema de detecção de vazamento mostrou ser de ótima qualidade, detectando facilmente vazamentos na faixa de 1 a 150% da vazão de escoamento de água. Em alguns casos, quando não havia ar em excesso no interior da tubulação, vazamentos da ordem de 0,5% foram detectados.

6.4.3 - Velocidade de propagação do transiente hidráulico

Através da equação de Streeter e Wylie (eq. 3.16) e das propriedades da água e da tubulação (tabela 6.3), obtém-se o valor teórico da velocidade de propagação do transiente hidráulico. Assim:

$$a = 552,5 \text{ m/s}$$

Tabela 6.3: Propriedades físicas da água e do PVC (Dados encontrados em [8] exceto diâmetro interno e espessura do tubo).

Características do tubo	Características da água
Módulo de elasticidade	Módulo de Elasticidade
$E = 3,00 \times 10^9 \text{ Pa}$	$K = 2,19 \times 10^9 \text{ Pa}$
Módulo de Poisson	Densidade da água
$\mu = 0,40$	$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$
Diâmetro interno do tubo	
$D = 1,905 \times 10^{-2} \text{ m}$	
Espessura do tubo	
$e = 0,25 \times 10^{-2} \text{ m}$	

Este valor teórico da velocidade de propagação da onda de pressão, não leva em consideração a influência de parâmetros hidráulicos tais como pressão, vazão de escoamento, vazão do vazamento.

O valor experimental da velocidade da onda de pressão pode ser calculada a partir dos perfis transientes de pressão obtidos por dois transdutores quaisquer. A figura 6.4 mostra como esta velocidade pode ser calculada experimentalmente:

Atendendo à figura 6.4, em um instante t qualquer, a válvula solenóide responsável por simular o vazamento é aberta, o que provoca o surgimento de ondas de pressão negativas que se propagam nos sentidos a jusante e a montante da posição da válvula, com velocidade $\pm a$, passando

pelos quatro transdutores nos instantes t_1 , t_2 , t_3 e t_4 respectivamente, como pode ser verificado pela figura 6.5.

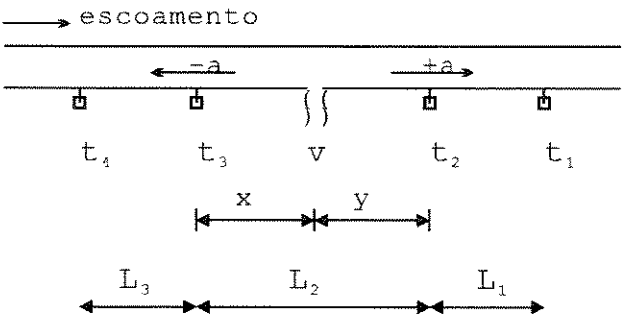


Figura 6.4 - Esquema utilizado para cálculo da velocidade experimental.

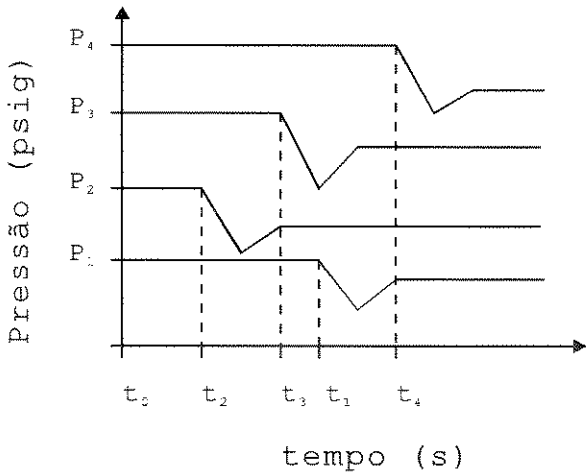


Figura 6.5 - Representação gráfica das ondas de pressão propagando-se nos sentidos a montante e a jusante de um vazamento situado entre os trasndutores 2 e 3.

Consideremos a onda de pressão que propaga-se a jusante do vazamento, ou seja, na direção dos transdutores 1 e 2, sendo a distância entre os transdutores L_1 . A onda de pressão demora um intervalo de tempo $(t_1 - t_2)$ para percorrer esta distância (Ver figuras 6.4 e 6.5). Sendo assim, a velocidade experimental da onda é dada por:

$$V = \frac{L_1}{(t_1 - t_2)} \quad (6.1)$$

Através de raciocínio semelhante a velocidade de propagação da onda de pressão a montante do local do vazamento é dada por:

$$V = -\frac{L_3}{(t_4 - t_3)} \quad (6.2)$$

A figura 6.6 representam o comportamento da velocidade da onda em função do número de Reynolds e da posição do vazamento.

Esta figura mostra que a velocidade do transiente hidráulico diminui com o aumento do número de Reynolds. Isso ocorre pois quanto maior a velocidade de escoamento do líquido, maior a perda de carga devido ao atrito entre a água e as paredes do tubo. Outro fator que contribui para esta diminuição da velocidade é a vibração a que está sujeita a tubulação. Segundo Watters, Jeppson e Hammer [11], a velocidade de propagação do transiente hidráulico em uma tubulação enterrada sob o solo (a tubulação não está sujeita a vibrações) é maior que a velocidade com que a onda se propaga em uma tubulação apoiada sobre o solo (sujeita a vibrações no sentido axial e radial). Portanto, para maiores valores do número de Reynolds, maior será a vibração da tubulação, o que provoca redução na velocidade de propagação da onda de pressão.

Os resultados obtidos a partir da figura 6.6 mostram ainda, que quanto maior a distância entre os transdutores e o vazamento, menor é o valor determinado da velocidade de propagação do transiente hidráulico. A explicação para este fato reside na relação de proporcionalidade entre a perda de carga por atrito e distância. Além disso, para maiores distâncias o número de cotovelos entre os transdutores e o vazamento aumenta. Wiggert, Otwell e Hatfield [12] observaram que a presença de cotovelos sujeitos a vibrações prejudicam a propagação do transiente hidráulico através da tubulação, reduzindo assim, a velocidade com a qual o transiente se propaga.

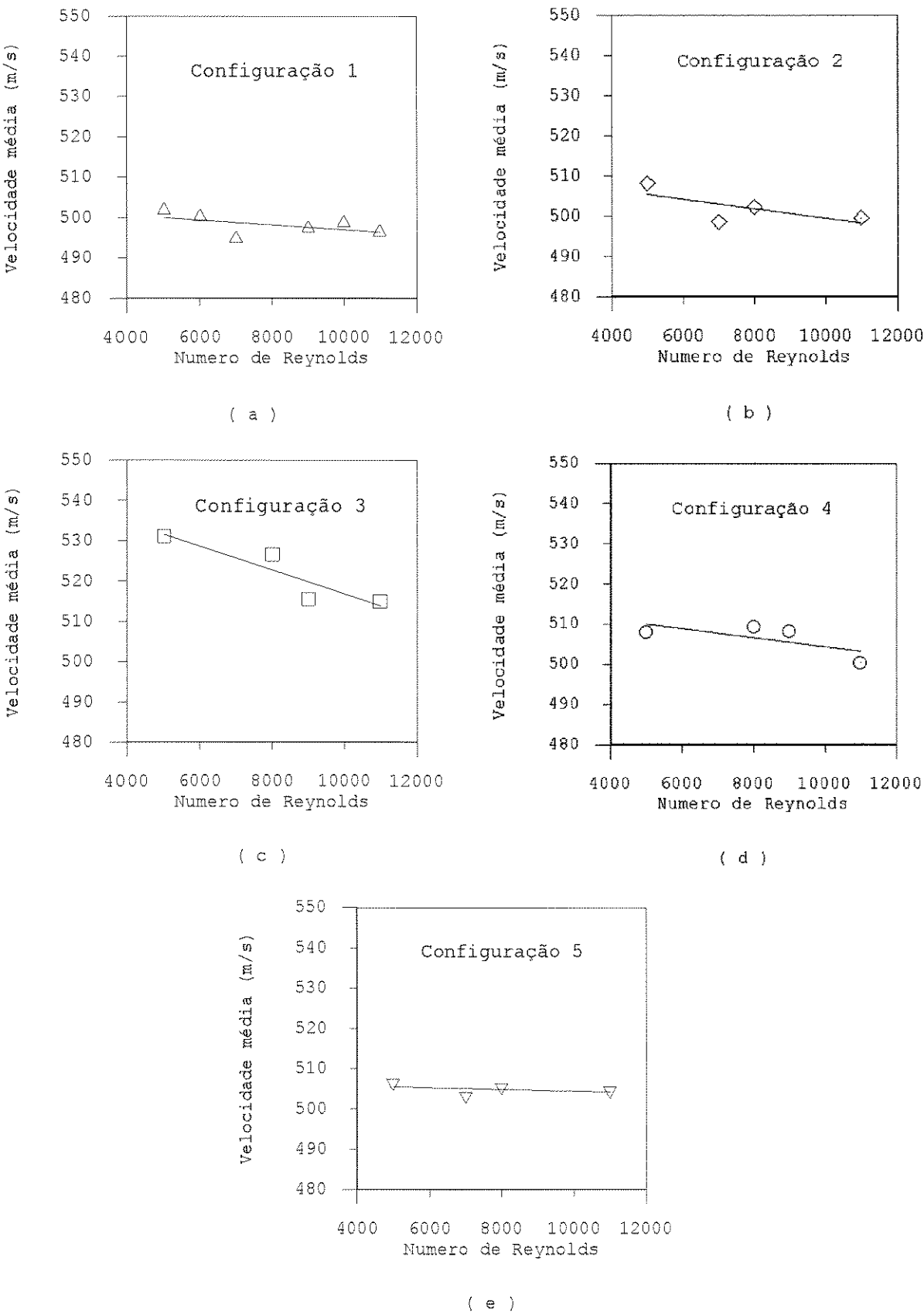


Figura 6.6 - Influência do número de Reynolds e da posição do vazamento sobre a velocidade do transiente hidráulico.

Podemos observar ainda, que para distâncias semelhantes (figuras 6.6.b e 6.6.e e figuras 6.6.c e 6.6.d), existe uma diferença nos valores da velocidade de propagação da onda. Uma explicação para este comportamento pode ser o fato de que as ondas de pressão são identificadas por transdutores em regiões de pressão diferentes.

Quando ocorre o rompimento de uma tubulação, haverá entrada de ar para o interior da tubulação. Em regiões da tubulação em que a pressão é menor, existirá maior acúmulo de ar no interior da tubulação, o que provoca redução na velocidade de propagação do transiente hidráulico [14].

As figuras 6.6.b e 6.6.d apresentam medidas feitas pelos transdutores 1 e 2, enquanto as figuras 6.6.c e 6.6.e apresentam medidas de pressão feitas pelos transdutores 3 e 4. Sendo assim, para as regiões da tubulação a maior pressão (região dos transdutores 3 e 4), a velocidade de propagação das ondas de pressão é maior (figuras 6.6.c e 6.6.e).

6.4.4 - Localização do vazamento

A localização de um vazamento pode ser obtida experimentalmente, conforme mostra o esquema da figura 6.4, de duas maneiras:

- quando o micro-computador provoca o vazamento (programas PEVALV01 e PEVALV23). Para este caso, o instante em que o vazamento surge é conhecido;
- quando o vazamento é provocado por meios externos ao computador (programas LOCALJ15 e LOCALM15). Para este caso não se conhece o instante em que o vazamento surgiu.

A seguir descreve-se como se obtém a localização do vazamento na tubulação para os dois casos citados acima:

6.4.4.1 - Vazamento provocado pelo micro-computador:

Através dos programas de aquisição de dados PEVALV01 e PEVALV23, o micro-computador envia um sinal à válvula solenóide para que esta se abra iniciando o vazamento. O instante em que a válvula é aberta é $t_0 = 0$.

Assim, o intervalo de tempo gasto pela onda de pressão para alcançar o transdutor 1, por exemplo, é:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 = t_1 \quad (6.3)$$

Considerando que a velocidade de propagação do transiente hidráulico obtida pela equação 6.1 é constante ao longo da tubulação, a distância entre a posição do vazamento e o transdutor 1 pode ser calculada como se segue:

$$d_1 = V \cdot \Delta t_1 \quad (6.4)$$

Comparando-se d_1 a L_1 sabemos com que precisão o vazamento é localizado.

Outro fator que deve ser analisado para que se obtenha a correta localização do vazamento é a determinação do intervalo de tempo gasto pela válvula solenóide para responder ao comando enviado pelo programa de aquisição de dados para que se abra. Na seção 6.4.5, encontram-se os experimentos realizados para determinação do atraso na abertura da válvula. Sendo assim, o exato instante em que a onda de pressão alcança os transdutores é o valor arquivado menos o atraso da válvula.

A tabela 6.4 mostra a influência da vazão de escoamento da água e da posição do vazamento sobre o erro de localização do vazamento.

Tabela 6.4 - Precisão de localização do vazamento.

Configuração Distância do vazam ao transdutor mais próximo (m)	Número de Reynolds	Erro médio de localização (m)
1 (176,61)	5000	8,57
	7000	8,36
	8000	7,74
	9000	6,38
	11000	9,08
2 (91,35)	5000	7,20
	7000	7,29
	8000	6,55
	9000	6,16
	11000	6,67
3 (5,81)	5000	2,13
	7000	2,11
	8000	2,96
	9000	2,80
	11000	3,03
4 (6,09)	5000	2,12
	7000	2,57
	8000	1,98
	9000	3,04
	11000	2,34
5 (91,07)	5000	8,74
	7000	8,98
	8000	5,91
	9000	7,51
	11000	9,96

6.4.4.2 - Vazamento provocado em um instante qualquer

Quando um vazamento é provocado por um fator externo ao programa de aquisição de dados, não é possível definir o instante em que o mesmo surgiu. Dessa forma torna-se necessária a utilização de um terceiro transdutor de pressão para localizar o vazamento. Assim, o instante em que a onda de pressão é detectada pelo transdutor de pressão mais próximo ao vazamento, é utilizado como tempo de referência para os demais transdutores.

Do esquema mostrado na figura 6.4 podemos escrever as seguintes equações:

$$Y + X = L_2 \quad (6.6)$$

$$Y - X = V \cdot (t_2 - t_3) \quad (6.7)$$

onde V é definida pela equação 6.1, se a localização é feita utilizando-se os transdutores a jusante do vazamento, ou equação 6.2, se são usados os transdutores a montante.

Tem-se então, um sistema de 3 equações (6.1, 6.6 e 6.7) e 3 incógnitas (V , X e Y). A resolução deste sistema fornece a localização do vazamento.

Os programas LOCALJ15 e LOCALM15 foram desenvolvidos para obtenção da localização de um vazamento quando este é provocado aleatoriamente. No apêndice B encontra-se as listagens destes programas. As tabelas 6.5 e 6.6 trazem os resultados de velocidade de propagação do transiente e localização do vazamento obtidos através dos programas LOCALJ15 (velocidade da onda obtida utilizando os transdutores 1 e 2) e LOCALM15 (velocidade da onda obtida utilizando os transdutores 3 e 4) respectivamente.

Os resultados apresentados nas tabelas foram realizados mantendo-se constante a vazão de escoamento da água ($Re = 8000$) e a magnitude do vazamento (8% da vazão de escoamento), variando-se o instante em que ocorre a abertura da válvula solenóide e a posição do vazamento. A fixação da vazão de escoamento foi feita através da leitura da

altura de mercúrio no manômetro em U acoplado à placa de orifício, enquanto a magnitude do vazamento foi fixada utilizando-se um tanque e cronômetro. O acionamento do relé que abre a válvula solenóide foi feito manualmente através de um interruptor.

Podemos observar nas tabelas 6.4 a 6.6, que para pequenas distâncias entre o vazamento e o transdutor mais próximo, que o erro absoluto na localização do vazamento é menor pois a energia dissipada por atrito é menor, o número de cotovelos entre o transdutor e o vazamento também é menor, e por isso as ondas de pressão são analisadas com maior precisão pelos programas de aquisição de dados.

Tabela 6.5: Resultados obtidos pelo programa LOCALJ15 e vazamento a 170 metros da entrada da tubulação (91 metros do transdutor 2).

Experimento	Posição do vazamento (m)	Erro de localização (m)
01	94,39	3,32
02	93,26	2,19
03	89,92	1,15
04	94,39	3,32
05	87,71	3,36
06	94,39	3,32
07	94,39	3,32
08	93,77	2,70
09	94,39	3,32
10	89,75	1,32
11	98,86	7,79
12	91,59	0,52
13	97,12	6,06
Valor médio	93,38	3,21

Como o intervalo de tempo entre duas leituras de um mesmo transdutor é da ordem de 0,01 segundos para os programas PEVALV01 e

PEVALV23, e 0,025 segundos para os programas LOCALM15 e LOCALJ15 (ver tabela 5.1), e as velocidades de propagação do transiente hidráulico obtida experimentalmente são da ordem de 500 m/s, erros de até 5 metros para o primeiro caso e até 12 metros para o segundo caso são aceitáveis. Podemos observar na tabela 6.4 que para os casos em que o vazamento está mais distante dos transdutores, o erro absoluto médio é superior a 5 metros. Isso ocorre pois ao calcularmos a velocidade experimentalmente consideramos que a velocidade da onda de pressão não varia entre os dois transdutores.

Tabela 6.6: Resultados obtidos pelo programa LOCALM15 e vazamento a 256 metros da entrada da tubulação (91 metros do transdutor 3).

Experimento	Posição do vazamento (m)	Erro de localização (m)
01	95,71	4,64
02	99,05	7,98
03	98,61	7,54
04	94,93	3,86
05	95,71	4,64
06	90,81	0,26
07	95,71	4,64
08	95,71	4,64
09	84,81	6,26
10	95,71	4,64
Valor médio	94,68	4,91

6.4.5 - Determinação do atraso na abertura da válvula solenóide

Para que exista uma correta correspondência entre o instante em que um transdutor detecta a onda negativa de pressão e o tempo, é necessário

determinar o intervalo do tempo gasto pela válvula solenóide para atender ao comando do microcomputador para que esta se abra, simulando o vazamento.

Para a determinação do atraso de resposta da válvula foram realizados vários testes nos quais a válvula solenóide estava ligada ao micro através de uma das portas do multiplexador existente na placa ADA. Esta ligação foi feita de modo que, quando a válvula encontra-se fechada, a placa ADA recebe sinais analógicos de 0 volts, e quando a válvula é aberta os sinais recebidos são da ordem de 5 volts. Assim, no instante em que a válvula se abre ocorre uma perturbação degrau no sinal recebido pelo micro.

A ligação da válvula ao micro foi feita instalando-se dois fios, ligados à placa através de um estabilizador de tensão, na saída da válvula. Quando a válvula está fechada, o circuito está aberto e o sinal recebido pelo micro é igual a zero. No momento em que a válvula se abre, o circuito é fechado e o sinal enviado ao micro é de 5 volts. A figura 6.7 ilustra como foi feita esta montagem.

As figuras 6.8 a 6.12 mostram o instante exato em que a válvula se abre. Através destas figuras determina-se o intervalo de tempo gasto pela válvula para responder ao comando do microcomputador.

Através dos resultados apresentados nas figuras 6.8 a 6.12 chegou-se à conclusão que o atraso médio da abertura da válvula é 0,011148 segundos.

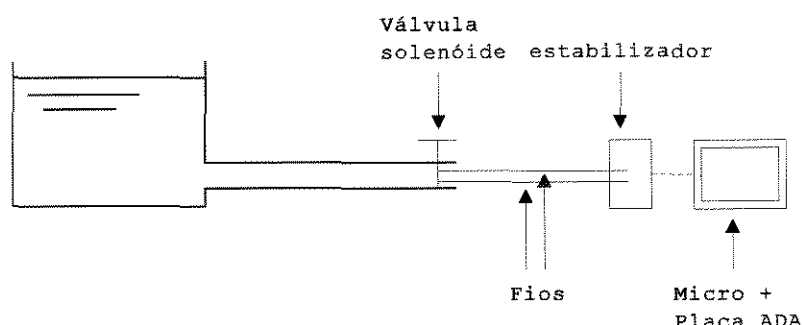


Figura 6.7: Representação esquemática da montagem experimental para determinação do atraso de abertura da válvula.

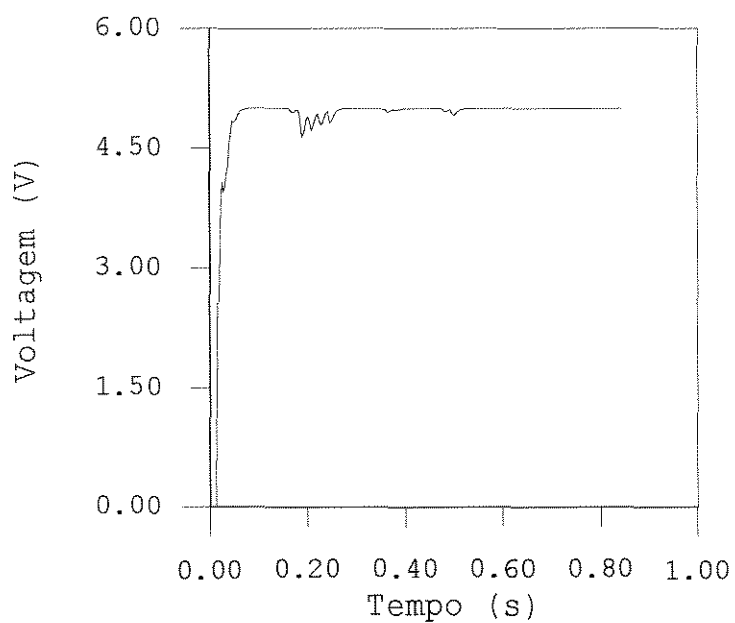


Figura 6.8: Primeiro teste realizado para determinação do atraso da válvula.

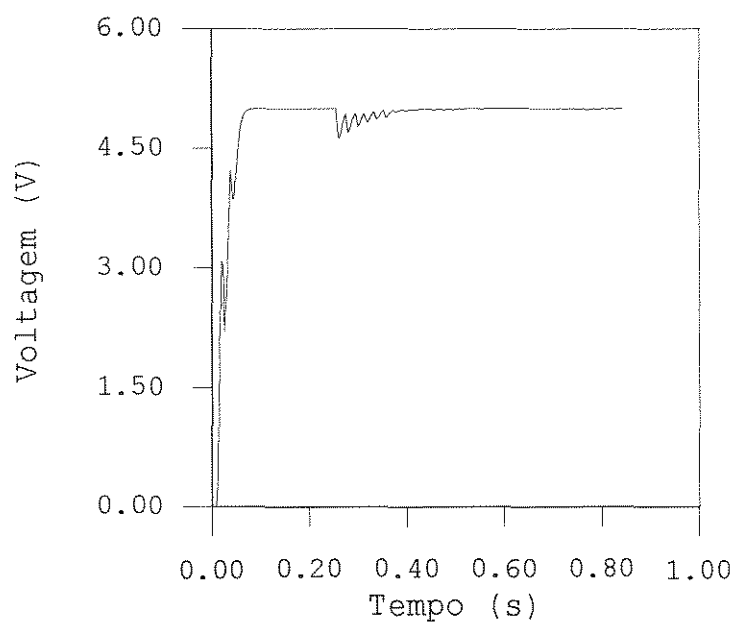


Figura 6.9: Segundo teste para determinação do atraso na abertura da válvula.

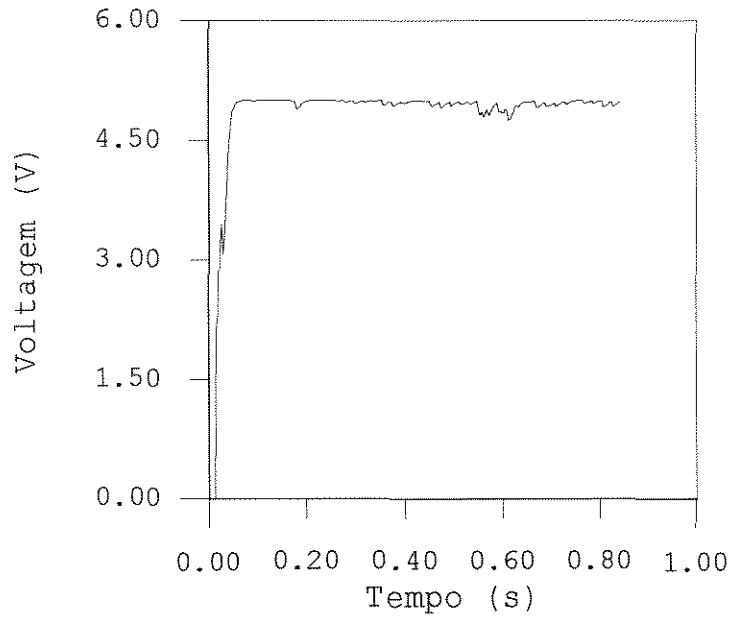


Figura 6.10: Terceiro teste para determinação do atraso na abertura da válvula.

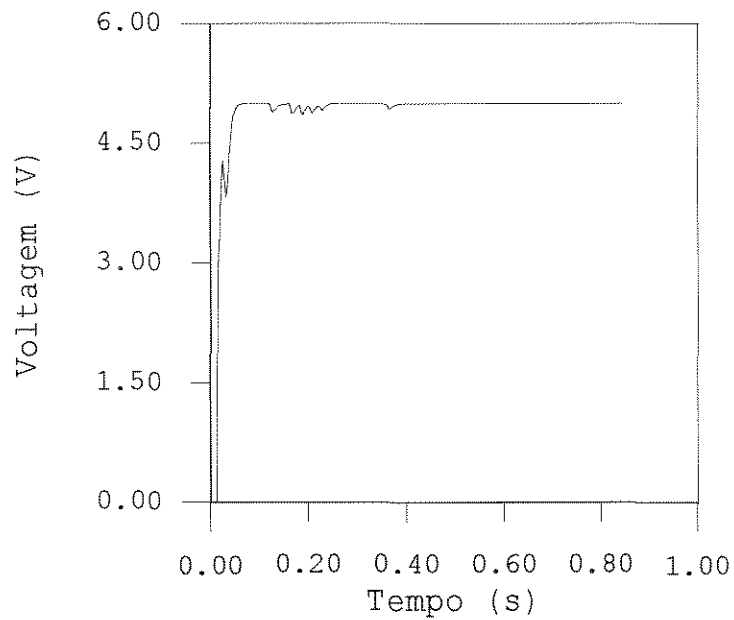


Figura 6.11: Quarto teste para determinação do atraso na abertura da válvula.

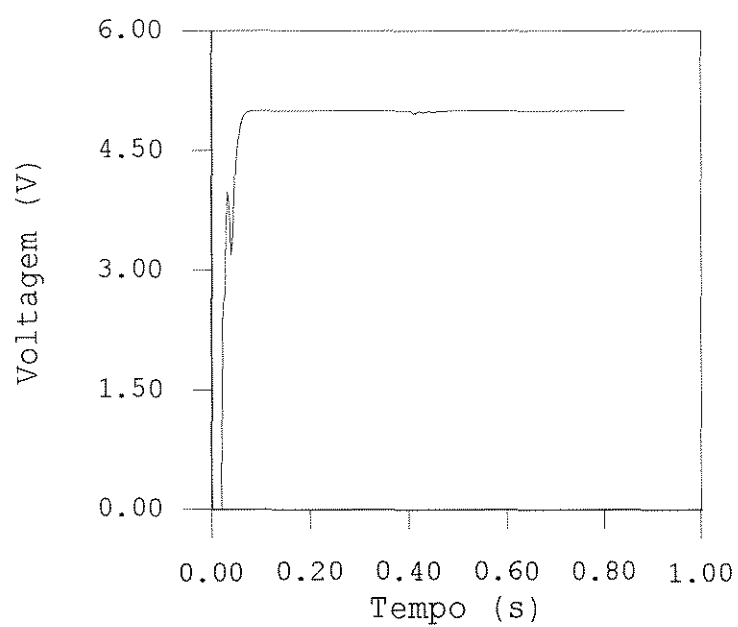


Figura 6.12: Quinto teste para determinação do atraso na abertura da válvula.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 - Conclusões

Os experimentos realizados durante o desenvolvimento deste trabalho permitiu-nos obter as seguintes informações a respeito da eficiência do método e do comportamento do transiente hidráulico frente a diversos parâmetros hidráulicos:

- A velocidade de propagação da onda de pressão gerada por um vazamento, decresce com o aumento da vazão de líquido e da distância entre o vazamento e os transdutores;
- a velocidade de propagação da onda de pressão é maior nas regiões de maior pressão no interior da tubulação;
- a queda de pressão máxima (ΔP_1), aumenta com a magnitude do vazamento e com a vazão de líquido;
- a queda de pressão entre os estados estacionários (ΔP_2), aumenta com a magnitude do vazamento e com a vazão de líquido;
- o método provou ser eficaz na detecção de vazamentos da ordem de até 0,5 % da vazão de escoamento de líquido;
- o método provou ser capaz de localizar vazamentos com precisão, sendo que quanto menor a distância entre os transdutores e o local do vazamento, menor o erro de localização.

7.2 - Sugestões

De modo a dar prosseguimento a este trabalho, algumas sugestões são citadas a seguir:

- Como grande parte das tubulações industriais utilizadas para transporte de produtos possuem ramificações, estações de bombeamento e são construídas sobre irregularidades do terreno, seria interessante estudar o comportamento do transiente hidráulicos em tais situações, de modo a verificar a versatilidade do método;
- como foi visto no capítulo 3, o transiente hidráulico possui várias causas diferentes de um vazamento. Assim, deve-se estudar situações que geram ondas negativas de pressão e como estas se comportam, de modo a possibilitar que um vazamento seja reconhecido corretamente;
- verificar se o método possibilita o reconhecimento de dois ou mais vazamentos ocorrendo simultaneamente ou em intervalo de tempo muito pequeno;
- verificar se o método fornece bons resultados para tubulações transportando gases.

APÊNDICE A

APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO

A calibração da placa de orifício foi feita utilizando-se um tanque e um cronômetro para medir a vazão de água que escoava através da tubulação para uma dada altura de mercúrio fixada no manômetro em U acoplado à placa.

Para uma dada altura de mercúrio fixada antes de cada experimento, media-se a vazão de água correspondente usando um processo batelada, no qual, para um dado intervalo de tempo, recolhia-se a água que deixa a tubulação em um tanque.

A figura A.1 mostra a curva de calibração obtida para o medidor de orifício.

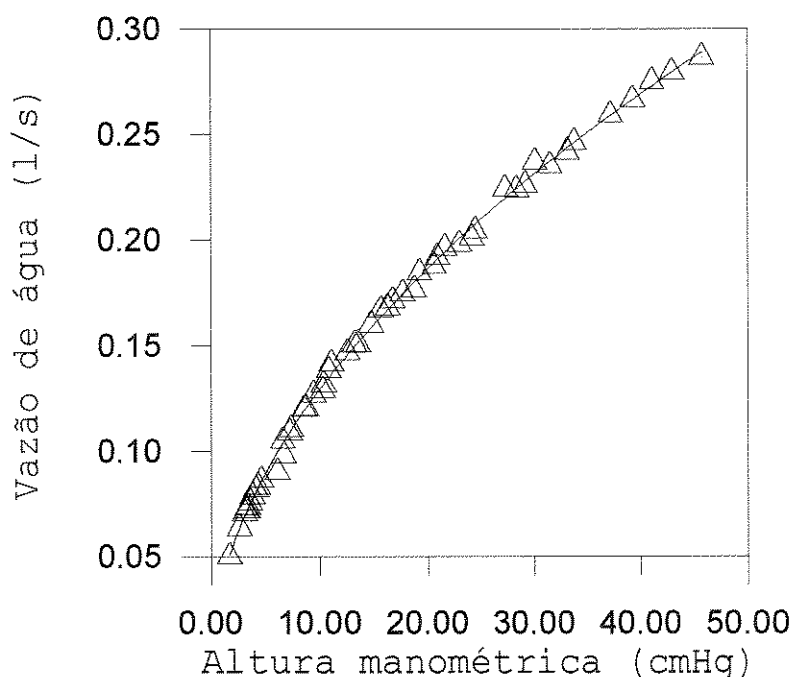


Figura A.1 - Curva de calibração da placa de orifício.

A equação que descreve a curva representada na figura A.1 é:

$$Q = 0,0382466 \cdot \Delta H^{0,528805} \quad (\text{A.1})$$

onde: Q = vazão volumétrica de água que escoar
pela tubulação (litros/segundo)

ΔH = altura de mercúrio no manômetro em
U (cmHg)

APÊNDICE B

APÊNDICE B - LISTAGENS DOS PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Neste apêndice encontram-se listados os programas apresentados no capítulo 5 (Sistema de aquisição de dados). São apresentados em separado os programas principais e as subrotinas leitura(), leitura1(), grafico(), eixos(), arquivo() e local(). As demais subrotinas foram fornecidas pelo fabricante da placa ADA e não sofreram modificações de um programa para o outro e portanto são apresentadas somente uma vez.

C.1 - Programa principal de PEVALV01 e PEVALV23

```
/* ----- */
/*  PROGRAMA DE AQUISICAO DE DADOS - VERSAO 2.0  */
/* ----- */

#include "conio.h"
#include "dos.h"
#include "stdlib.h"
#include "stdio.h"
#include "graphics.h"
#include "ctype.h"
#include "math.h"
/*#include "mcalc.h"*/
#include <bios.h>

/* ----- */
/*  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();
/* ----- */
/*          PROGRAMA PRINCIPAL          */
/* ----- */
void main()
{
    char loop,inicio,input;
    int i;
    float volt_estac[500],volt_trans[500];
    int graphdriver = DETECT,graphmode;
    offset = adj_offset();

    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:\\cp\\tc2");
    leitura(volt_estac); /* leitura dos dados do estacionario */
    cleardevice();
    eixos();      /* construcao dos eixos x e y do grafico */
    outtextxy(250,190,"ESTADO ESTACIONARIO");
    grafico(volt_estac); /* construcao do grafico reg.estac.*/
    outtextxy(350,10,"Para continuar aperte uma tecla");
    getch();
    cleardevice();
    outtextxy(300,80,"Processo em regime estacionario - Aperte uma tecla");
    outtextxy(300,90,"para iniciar regime transiente");
    getch();
    cleardevice();
    write_dig(1);      /* abertura da valvula solenoide */
    leitura(volt_trans); /* leitura dos dados do transiente */
    eixos();
```

```
outtextxy(250,185,"ESTADO TRANSIENTE");
grafico(volt_trans); /* construcao do grafico reg.trans. */
outtextxy(350,10,"Para continuar aperte uma tecla");
getch();

opcao:

cleardevice();
write_dig(0);      /* fechamento da valvula solenoide */
outtextxy(320,80,"1 - INICIO DO PROCESSO");
outtextxy(320,90,"2 - ARQUIVO DE RESULTADOS");
outtextxy(320,100,"3 - RETORNO AO PROGRAMA");

loop:

input = get_key();      /* selecao da tecla acionada */
switch(input)
{
    case '1':
        goto inicio;
    case '2':
        arquivo(volt_trans);
        goto opcao;
    case '3':
        goto final;
}
if((input != 1) & (input != 2) & (input != 3))
{
    outtextxy(320,110,"-----");
    outtextxy(320,120,"Entre de novo com a opcao");
    goto loop;
}

final:

closegraph();      /* finalizacao do modulo grafico */
}
```

C.1.1 - Subrotinas de PEVALV01

C.1.1.1 - Subrotina leitura()

```
/* ----- */
/*   SUBROTINA DE LEITURA E FILTRAGEM DE DADOS   */
/* ----- */

void leitura(float y[500])
{
    int i,j;
    float alfa,soma1,soma2;
    alfa = 0.5;

/* LEITURA DOS DADOS */

    for(i=0;i<500;i=i+2)
    {
        soma1 = 0.0;
        soma2 = 0.0;
        for(j=0;j<40;j=j+2)
        {
            soma1 = soma1 + read_anl(0,offset);
            soma2 = soma2 + read_anl(1,offset);
        }
        y[i] = 15.0*((soma1/20.0)-819.0)/(4095.0-819.0);
        y[i+1]=15.0*((soma2/20.0)-819.0)/(4095.0-819.0);
    }

/* FILTRAGEM DOS DADOS */

    for(i=0;i<500;i=i+2)
    {
        if(i > 3)
        {
            y[i] = alfa*alfa*y[i] + 2.0*(1.0-alfa)*y[i-2]-
                (1.0-alfa)*(1.0-alfa)*y[i-4];
            y[i+1] = alfa*alfa*y[i+1] + 2.0*(1.0-alfa)*y[i-1]-
```

```

        (1.0-alfa)*(1.0-alfa)*y[i-3];
    }
}
}

```

C.1.1.2 - Subrotina grafico()

```

/* ----- */
/*      SUBROTINA DE CONSTRUCAO DO GRAFICO      */
/* ----- */
void grafico(float y[500])
{
    int i,ix,ponto[600];
    float dP;
    for(i=0;i<500;i++)
    {
        ix = i + 80;          /* coordenada x */
        dP = y[i];
        ponto[ix] = 160.0 - 10.0*dP;    /* coordenada y */
        putpixel(ix,ponto[ix],1);    /* introducao do ponto */
    }
}

```

C.1.1.3 - Subrotina eixos()

```

/* ----- */
/*      CONSTRUCAO DOS EIXOS X E Y      */
/* ----- */
void eixos()
{
    char buf;
    int ix,iy;
    double ticx,ticy;
    float i;
    settextjustify(1,0);
    settextstyle(0,0,1);
    line(80,10,80,160);          /* linha vertical */
    line(80,160,606,160);        /* linha horizontal */
    for(i=0.0;i<=530.00;i=i+47.81943) /* divisoes do eixo x */
    {

```

```

    ix = i + 80;
    line(ix,160,ix,163);
    ticx = 0.010456*i/2.0;
    gcvrt(ticx,3,&buf);
    outtextxy(ix+2,175,&buf);
}
ticy = 16.0;
for(i=0;i<=150;i=i+10)      /* divisoes do eixo y */
{
    iy = i + 10;
    line(75,iy,80,iy);
    ticy = ticy - 1.0;
    gcvrt(ticy,3,&buf);
    outtextxy(50,iy+4,&buf);
}
settextjustify(1,0);
settextstyle(0,0,1);
outtextxy(540,185,"tempo(s)");    /* titulo do eixo X */
settextjustify(1,1);
settextstyle(0,1,1);
outtextxy(15,85,"alt.manometrica(PSI)");    /* titulo do
                                              eixo Y */

settextstyle(0,0,1);
}

```

C.1.1.4 - Subrotina arquivo()

```

/* ----- */
/*      ARQUIVO DE RESULTADOS      */
/* ----- */
void arquivo(float y[500])
{
    FILE *arq1;
    char arq[15],esco;
    int i;
    float P1,P2;
    clrscr();
    do
    {
        delline();

```

```
printf("\n    De o nome do arquivo de dados : ");
scanf("%s",&arq);
if((arq1 = fopen(arq,"rt")) != NULL)
{
    printf("\n Arquivo ja existente. Destruir (S/N) ? ");
    esco = tolower(getche());
    fclose(arq1);
}
}
while(esco == 'n' );
arq1 = fopen(arq,"wt");
clrscr();
for(i=0;i<250;i++)
{
    P1=y[i*2];
    P2=y[i*2+1];
    fprintf(arq1,"%f ",0.010456*(i+1));
    fprintf(arq1,"%f ",P1);
    fprintf(arq1,"%f \n",P2);
}
fclose(arq1);
}
```

C.1.2 - Subrotinas de PEVALV23

C.1.2.1 - Subrotina leitura()

```
/* ----- */
/*    SUBROTINA DE LEITURA E FILTRAGEM DE DADOS    */
/* ----- */

void leitura(float y[500])
{
    int i,j;
    float alfa,soma1,soma2;
    alfa = 0.5;

/* LEITURA DOS DADOS */
```

```

for(i=0;i<500;i=i+2)
{
    soma1 = 0.0;
    soma2 = 0.0;
    for(j=0;j<40;j=j+2)
    {
        soma1 = soma1 + read_anl(2,offset);
        soma2 = soma2 + read_anl(3,offset);
    }
    y[i] = 30.0*((soma1/20.0)-819.0)/(4095.0-819.0);
    y[i+1]=30.0*((soma2/20.0)-819.0)/(4095.0-819.0);
}

```

/* FILTRAGEM DOS DADOS */

```

for(i=0;i<500;i=i+2)
{
    if(i > 3)
    {
        y[i] = alfa*alfa*y[i] + 2.0*(1.0-alfa)*y[i-2]-
            (1.0-alfa)*(1.0-alfa)*y[i-4];
        y[i+1] = alfa*alfa*y[i+1] + 2.0*(1.0-alfa)*y[i-1]-
            (1.0-alfa)*(1.0-alfa)*y[i-3];
    }
}
}

```

C.1.2.2 - Subrotina grafico()

```

/* ----- */
/*      SUBROTINA DE CONSTRUCAO DO GRAFICO      */
/* ----- */
void grafico(float y[500])
{
    int i,ix,ponto[600];
    float dP;
    for(i=0;i<500;i++)
    {
        ix = i + 80;          /* coordenada x */
        dP = y[i];
    }
}

```

```

    ponto[ix] = 160.0 - 5.0*dP;      /* coordenada y */
    putpixel(ix,ponto[ix],1);      /* introducao do ponto */
}
}

```

C.1.2.3 - Subrotina eixos()

```

/* ----- */
/*      CONSTRUCAO DOS EIXOS X E Y      */
/* ----- */
void eixos()
{
    char buf;
    int ix,iy;
    double ticx,ticy;
    float i;
    settxtjustify(1,0);
    settxtstyle(0,0,1);
    line(80,10,80,160);      /* linha vertical */
    line(80,160,600,160);    /* linha horizontal */
    for(i=0.0;i<=530.00;i=i+47.29832) /* divisoes do eixo x */
    {
        /* obs: 0.25*2/t(=.0105712)=47.29832 */
        ix = i + 80;
        line(ix,160,ix,163);
        ticx = 0.0105712*i/2.0;
        gcvrt(ticx,3,&buf);
        outtextxy(ix+2,175,&buf);
    }
    ticy = 32.0;
    for(i=0;i<=150;i=i+10)    /* divisoes do eixo y */
    {
        iy = i + 10;
        line(75,iy,80,iy);
        ticy = ticy - 2.0;
        gcvrt(ticy,3,&buf);
        outtextxy(50,iy+4,&buf);
    }
    settxtjustify(1,0);
    settxtstyle(0,0,1);
    outtextxy(540,185,"tempo(s)"); /* titulo do eixo X */
}

```

```
settextjustify(1,1);
settextstyle(0,1,1);
outtextxy(15,85,"alt.manometrica(PSI)");    /* titulo do
                                             eixo Y */
settextstyle(0,0,1);
}
```

C.1.2.4 - Subrotina arquivo()

```
/* ----- */
/*      ARQUIVO DE RESULTADOS      */
/* ----- */
void arquivo(float y[500])
{
    FILE *arq1;
    char arq[15],esco;
    int i;
    float P1,P2;
    clrscr();
    do
    {
        delline();
        printf("\n      De o nome do arquivo de dados : ");
        scanf("%s",&arq);
        if((arq1 = fopen(arq,"rt")) != NULL)
        {
            printf("\n Arquivo ja existente. Destruir (S/N) ? ");
            esco = tolower(getche());
            fclose(arq1);
        }
    }
    while(esco == 'n');
    arq1 = fopen(arq,"wt");
    clrscr();
    for(i=0;i<250;i++)
    {
        P1=y[i*2];
        P2=y[i*2+1];
        fprintf(arq1,"%f ",0.0105712*(i+1));
```

```
fprintf(arq1,"%f ",P1);
fprintf(arq1,"%f \n",P2);
}
fclose(arq1);
}
```

C.2 - Programa principal e subrotina leitura1() de LOCALJ15 e LOCALM15

```
/* **** */
/*  PROGRAMA PARA LOCALIZACAO DE VAZAMENTOS - VERSAO 1.0  */
/* **** */
/*  Este programa localiza o vazamento a partir das leituras dos transdutores */
/*  de pressao 1, 2 e 3.  */
/* **** */

#include "conio.h"
#include "dos.h"
#include "stdlib.h"
#include "stdio.h"
#include "graphics.h"
#include "ctype.h"
#include "math.h"
#include <bios.h>

/* ----- */
/*  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 leitura1();
void grafico();
void eixos();
void arquivo();
```

```
void selchda();
```

```
void local();
```

```
/* ----- */
```

```
/*          PROGRAMA PRINCIPAL          */
```

```
/* ----- */
```

```
void main()
```

```
{
```

```
char laco,loop,inicio,input,CASO,fimcalc;
```

```
int i,vazam,m;
```

```
float volt_estac[500],volt_trans[500],t[4],e[4];
```

```
int graphdriver = DETECT,graphmode;
```

```
offset = adj_offset();
```

```
/* INICIO DO PROGRAMA */
```

```
inicio :
```

```
clrscr();
```

```
printf("\n\n  Aquisicao de dados experimentais  ");
```

```
printf("\n\n\n Tecle <ENTER> para iniciar aquisicao de dados\n");
```

```
getch();
```

```
clrscr();
```

```
vazam = 0;
```

```
m = 0;
```

```
initgraph(&graphdriver,&graphmode,"c:\\cp\\ltc2");
```

```
laco:
```

```
leitura1(volt_estac,&vazam,t);
```

```
if(vazam != 0) /* vazam = 1 => Vazamento identificado */
```

```
{
```

```
cleardevice();
```

```
eixos(m);
```

```
outtextxy(320,30,"VAZAMENTO IDENTIFICADO");
```

```
grafico(volt_estac);
```

```
outtextxy(20,100," Tecle <ENTER> para localizar vazamento\n");
```

```
getch();
```

```
cleardevice();
```

```
local(t);
outtextxy(20,100," Tecle <ENTER> para iniciar arquivo de
dados ");
getch();
arquivo(volt_estac,m);
goto opcao;
}
cleardevice();
eixos(m);
grafico(volt_estac);
if(vazam == 0)          /* vazam = 0 => Vazamento nao
                        identificado */
{
    m = m + 1;
    if(m > 99)
    {
        goto opcao;
    }
    goto laco;
}

opcao:

cleardevice();
outtextxy(320,80,"1 - INICIO DO PROCESSO");
outtextxy(320,90,"2 - TERMINO DO PROCESSO");

loop:

input = get_key();
switch(input)
{
    case '1':
        goto inicio;
    case '2':
        goto fim;
}
if((input != 1) & (input != 2))
{
    outtextxy(320,110,"-----");
    outtextxy(320,120,"Entre de novo com a opcao");
```

```
goto loop;
}

fim:

closegraph();      /* Finalizacao do modulo grafico */
}

/* ----- */
/*  SUBROTINA DE LEITURA E FILTRAGEM DE DADOS  */
/* ----- */

void leitura1(float y[500],int *x,float p[4])
{
    char proximo;
    int i,j,h,n,m,v[4],a[4];
    float alfa,soma1,soma2,soma3,soma4,queda[500],e[4];
    alfa = 0.5;
    *x = 0;      /* x = 0 ==> vazamento nao identificado */
    h = 0;
    for(m=0;m<4;m++)
    {
        a[m] = 0;
        e[m] = 0;
        v[m] = 0;
    }

/* LEITURA DOS DADOS */

    for(i=0;i<500;i=i+4)
    {
        soma1 = 0.0;
        soma2 = 0.0;
        soma3 = 0.0;
        soma4 = 0.0;
        for(n=0;n<60;n=n+4)
        {
            soma1 = soma1 + read_anl(0,offset);
            soma2 = soma2 + read_anl(1,offset);
            soma3 = soma3 + read_anl(2,offset);
            soma4 = soma4 + read_anl(3,offset);
        }
    }
}
```

```
y[i] = 15.0*((soma1/15.0)-819.0)/(4095.0-819.0);
y[i+1]=15.0*((soma2/15.0)-819.0)/(4095.0-819.0);
y[i+2]=30.0*((soma3/15.0)-819.0)/(4095.0-819.0);
y[i+3]=30.0*((soma4/15.0)-819.0)/(4095.0-819.0);
```

```
/* FILTRAGEM DOS DADOS */
```

```
if(i > 8)
{
    y[i] = alfa*alfa*y[i] + 2.0*(1.0-alfa)*y[i-4]-
           (1.0-alfa)*(1.0-alfa)*y[i-8];
    y[i+1] = alfa*alfa*y[i+1] + 2.0*(1.0-alfa)*y[i-3]-
            (1.0-alfa)*(1.0-alfa)*y[i-7];
    y[i+2] = alfa*alfa*y[i+2] + 2.0*(1.0-alfa)*y[i-2]-
            (1.0-alfa)*(1.0-alfa)*y[i-6];
    y[i+3] = alfa*alfa*y[i+3] + 2.0*(1.0-alfa)*y[i-1]-
            (1.0-alfa)*(1.0-alfa)*y[i-5];
```

```
/* CALCULO DA QUEDA DE PRESSAO NA LINHA */
```

```
queda[i] = y[i-4] - y[i];
queda[i+1] = y[i-3] - y[i+1];
queda[i+2] = y[i-2] - y[i+2];
queda[i+3] = y[i-1] - y[i+3];
```

```
for(j=0;j<4;j++)
{
    if(v[j] == 0)
    {
        if(queda[i+j] <= 0.0)
        {
            a[j] = 0;
            e[j] = 0;
            goto proximo;
        }
        e[j] = e[j] + queda[i+j];
        a[j] = a[j] + 1;
        if(a[j] == 1)
        {
            p[j] = 0.0239758*(i+j-3)/4;
        }
    }
}
```

```

        if(e[j] > 1.0)
        {
            *x = *x + 1;          /* vazam = 1 ==>
                                vazamento identificado */
            v[j] = v[j] + 1;
        }

        proximo:

        h = h + 1;
    }
}
}
}
}

```

C.2.1 - Subrotinas de LOCALJ15

C.2.1.1 - Subrotina local()

```

/* ----- */
/* SUBROTINA PARA CALCULO DA LOCALIZACAO DO VAZAMENTO */
/* ----- */
void local(float t[4])
{
    char CASO,fimcalc;
    int k;
    float l1,l2,l3,t21,t32,t43,v,y,x,i;

    for(k=0;k<4;k++)
    {
        printf("t = %f\n",t[k]);
    }
    l1 = 158.65;
    l2 = 97.16;
    l3 = 158.63;
    t21 = t[1] - t[0];

```

```
t32 = t[2] - t[1];
t43 = t[3] - t[2];
if(t[0] < t[1])
{
    goto CASO;
}
if(t[0] < t[2])
{
    /* CASO 1 */

    CASO:
    v = l2/t32;
    y = (l1+v*t21)/2;    /* Distancia ate o transdutor 2 */
    x = (l1-v*t21)/2;    /* Distancia ate o transdutor 1 */
    printf("V (m/s) = %f\n",v);
    printf("\nVAZAMENTO ENTRE OS TRANSDUTORES 1 E 2");
    printf("\nDISTANCIA DO VAZAMENTO AO TRANSDUTOR 1 (m) = %f",x);
    printf("\nDISTANCIA DO VAZAMENTO AO TRANSDUTOR 2 (m) = %f",y);
    goto fimcalc;
}
if(t[1] < t[3])
{
    /* CASO 2 */

    v = -l1/t21;
    y = (l2+v*t32)/2;    /* distancia ate o transdutor 3 */
    x = (l2-v*t32)/2;    /* distancia ate o transdutor 2 */
    printf("V (m/s) = %f\n",v);
    printf("\nVAZAMENTO ENTRE OS TRANSDUTORES 2 E 3");
    printf("\nDISTANCIA DO VAZAMENTO AO TRANSDUTOR 2 (m) = %f",x);
    printf("\nDISTANCIA DO VAZAMENTO AO TRANSDUTOR 3 (m) = %f",y);
    goto fimcalc;
}
/* CASO 3 */

v = -l2/t32;
y = (l3+v*t43)/2;    /* distancia ate o transdutor 4 */
```

```

x = (l3-v*t43)/2;    /* distancia ate o transdutor 3 */
printf("V (m/s) = %f\n",v);
printf("\nVAZAMENTO ENTRE OS TRANSDUTORES 3 E 4");
printf("\nDISTANCIA DO VAZAMENTO AO TRANSDUTOR 3 (m) =
%f",x);
printf("\nDISTANCIA DO VAZAMENTO AO TRANSDUTOR 4 (m) =
%f",y);

fimcalc:

printf("\n\n***** VAZAMENTO LOCALIZADO *****");
}

```

C.2.1.2 - Subrotina grafico()

```

/* ----- */
/*      SUBROTINA DE CONSTRUCAO DO GRAFICO      */
/* ----- */
void grafico(float y[500])
{
    int i,ix,ponto[600];
    float dP;

    for(i=0;i<500;i++)
    {
        ix = i + 80;          /* coordenada x */
        dP = y[i];
        ponto[ix] = 160.0 - 5.0*dP;    /* coordenada y */
        putpixel(ix,ponto[ix],1);    /* introducao do ponto */
    }
}

```

C.2.1.3 - Subrotina eixos()

```

/* ----- */
/*      CONSTRUCAO DOS EIXOS X E Y      */
/* ----- */

```

```
void eixos(int m)
{
    char buf;
    int ix,iy;
    double ticx,ticy;
    float i;
    settextjustify(1,0);
    settextstyle(0,0,1);
    line(80,10,80,160);          /* linha vertical */
    line(80,160,580,160)        /* linha horizontal */
    for(i=0.0;i<=530.00;i=i+45.45455) /* divisoes do eixo x */
    {
        ix = i + 80;
        line(ix,160,ix,163);
        ticx = 0.0239758*i/4.0 + 2.996968*m;
        gcvrt(ticx,3,&buf);
        outtextxy(ix+2,175,&buf);
    }
    ticy = 32.0;
    for(i=0;i<=150;i=i+10)      /* divisoes do eixo y */
    {
        iy = i + 10;
        line(75,iy,80,iy);
        ticy = ticy - 2.0;
        gcvrt(ticy,3,&buf);
        outtextxy(50,iy+4,&buf);
    }
    settextjustify(1,0);
    settextstyle(0,0,1);
    outtextxy(540,185,"tempo(s)"); /* titulo do eixo X */
    settextjustify(1,1);
    settextstyle(0,1,1);
    outtextxy(15,85,"alt.manometrica(PSI)"); /* titulo do
                                                eixo Y */
    settextstyle(0,0,1);
}
```

C.2.2 - Subrotinas de LOCALM15

C.2.2.1 - Subrotina local()

```
/* ----- */
/* SUBROTINA PARA CALCULO DA LOCALIZACAO DO VAZAMENTO */
/* ----- */

void local(float t[4])
{
    char CASO,fimcalc;
    int k;
    float l1,l2,l3,t21,t32,t43,v,y,x;

    l1 = 158.65;
    l2 = 97.16;
    l3 = 158.63;
    for(k=0;k<4;k++)
    {
        printf("t = %f\n",t[k]);
    }
    t21 = t[1] - t[0];
    t32 = t[2] - t[1];
    t43 = t[3] - t[2];
    if(t[0] < t[1])
    {
        goto CASO;
    }
    if(t[0] < t[2])
    {
        /* CASO 1 */

        CASO:
        v = l2/t32;
        y = (l1+v*t21)/2;    /* Distancia ate o transdutor 2 */
        x = (l1-v*t21)/2;    /* Distancia ate o transdutor 1 */
        printf("V (m/s) = %f\n",v);
        printf("\nVAZAMENTO ENTRE OS TRANSDUTORES 1 E 2");
        printf("\nDISTANCIA DO VAZAMENTO AO TRANSDUTOR 1 (m) = %f",x);
        printf("\nDISTANCIA DO VAZAMENTO AO TRANSDUTOR 2 (m) = %f",y);
        goto fimcalc;
    }
}
```

```

}
if(t[1] < t[3])
{
    /* CASO 2 */
    v = l3/t43;
    y = (l2+v*t32)/2;    /* distancia ate o transdutor 3 */
    x = (l2-v*t32)/2;    /* distancia ate o transdutor 2 */
    printf("V (m/s) = %f\n",v);
    printf("\nVAZAMENTO ENTRE OS TRANSDUTORES 2 E 3");
    printf("\nDISTANCIA DO VAZAMENTO AO TRANSDUTOR 2 (m) =
%f",x);
    printf("\nDISTANCIA DO VAZAMENTO AO TRANSDUTOR 3 (m) =
%f",y);
    goto fimcalc;
}
/* CASO 3 */
v = -l2/t32;
y = (l3+v*t43)/2;    /* distancia ate o transdutor 4 */
x = (l3-v*t43)/2;    /* distancia ate o transdutor 3 */
printf("V (m/s) = %f\n",v);
printf("\nVAZAMENTO ENTRE OS TRANSDUTORES 3 E 4");
printf("\nDISTANCIA DO VAZAMENTO AO TRANSDUTOR 3 (m) =
%f",x);
printf("\nDISTANCIA DO VAZAMENTO AO TRANSDUTOR 4 (m)=
%f",y);

fimcalc:

printf("\n\n\n\n\n***** VAZAMENTO LOCALIZADO *****");
}

```

C.2.2.2 - Subrotina grafico ()

```

/* ----- */
/*      SUBROTINA DE CONSTRUCAO DO GRAFICO      */
/* ----- */

void grafico(float y[500])
{
    int i,ix,ponto[500];

```

```

float dP;
for(i=0;i<500;i++)
{
    ix = i + 80;          /* coordenada x */
    dP = y[i];
    ponto[i] = 160.0 - 5.0*dP;    /* coordenada y */
    putpixel(ix,ponto[i],1);    /* introducao do ponto */
}
}

```

C.2.2.3 - Subrotina eixos()

```

/* ----- */
/*      CONSTRUCAO DOS EIXOS X E Y      */
/* ----- */
void eixos(int m)
{
    char buf;
    int ix,iy;
    double ticx,ticy;
    float i;
    settextjustify(1,0);
    settextstyle(0,0,1);
    line(80,10,80,160);    /* linha vertical */
    line(80,160,580,160);  /* linha horizontal */
    for(i=0.0;i<=530.00;i=i+45.45455 /* divisoes do eixo x */
    {
        ix = i + 80;
        line(ix,160,ix,163);
        ticx = 0.023842637*i/4.0 + 2.98033*m;
        gcvt(ticx,3,&buf);
        outtextxy(ix+2,175,&buf);
    }
    ticy = 32.0;
    for(i=0;i<=150;i=i+10)    /* divisoes do eixo y */
    {
        iy = i + 10;
        line(75,iy,80,iy);
        ticy = ticy - 2.0;
    }
}

```

```

    gcvt(ticy,3,&buf);
    outtextxy(50,iy+4,&buf);
}
settextjustify(1,0);
settextstyle(0,0,1);
outtextxy(540,185,"tempo(s)");    /* titulo do eixo X */
settextjustify(1,1);
settextstyle(0,1,1);
outtextxy(15,85,"alt.manometrica(Psi)");    /* titulo do
                                              eixo Y */
settextstyle(0,0,1);
}

```

C.3 - Subrotinas fornecidas pelo fabricante da placa ADA

```

#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 */

/* ----- */
/*  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);
}

/* ----- */
/* ESCRIBE 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;
}

/* ----- */
/*      ESCRIBE 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;
inatural = read_anl(7,140); /* le a entrada de refer
                           centrando o offset */
if(inatural < (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 */
{
    inatural = read_anl(7,(i&0xff)); /* tente com i valor de
                                     offset */
    for(delay=0;delay<50;++delay) /* rotina para atraso */
    if(inatural == 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;
}
```

ABSTRACT

This work has developed a computational method of hydraulic transient analysis in pipelines, with the objective of detecting and locating leaks. For this reason, a 427 metres long pipeline was constructed, in PVC pipes, 3/4" diameter. Along the pipeline were installed 4 pressure transducers that, coupled to a PC/XT microcomputer, are responsible for detecting the leak.

The method used to detect and locate leaks, is based at the negative pressure waves study. This method has the advantage of being easily implemented to a computer. When a leak occurs, it causes a rapid pressure drop at its location, generating a negative pressure wave that moves at the speed of sound in the downstream and upstream directions of its position. Monitoring the pipeline, it is possible to detect the propagation of the waves in both sides of the leak, to record the moment that the waves are detected by the transducers on the line, and to make an estimative of leak location.

Experiments were carried out to analyse the influence of many hydraulic parameters over the pressure wave velocity and the pressure drop at the pipeline.

KEY WORDS: Leak location, hydraulic transient, pipeline supervision

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] - BAGHDADI, A.H.A., MANSY, H.A. A mathematical model for leak location in pipelines. Applied Mathematical Modelling, vol.12, no.2, 1988.

[2] - BILLMANN, L., ISERMANN, R. Leak detection methods for pipelines. Automatica, vol.23, no.5, 1989.

[3] - BROWN, J.R., BIANCHINI, M., LIGHTART, M., NOEL DU PAYRAT, C., WHITMORE, J.B. Methods to detect and control spillages in european oil lines. Pipeline Industry, vol.67, no.6, 1987.

[4] - CHAUNDRY, M.H. - Applied hydraulic transients. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1979.

[5] - FUKUDA, T., MITSUOKA, T. Pipeline inspection and maintenance by applications of computer data processing and robotic technology. Computer in Industry, no.7, 1986

[6] - KIUCHI, T. A leak localization method of pipeline by means of fluid transient model. Journal of Energy Resources Technology, vol.115, no.9, 1993.

[7] - MURPHY, R.E., DEAN, P.D. Improved pipeline leak and rupture detection. Pipeline Industry, vol.63, no.4, 1985.

[8] - NAVES, G.J. Técnicas de computação em tempo real em controle e supervisão de tubulação. Tese de mestrado, Unicamp, Campinas, 1991.

[9] - SANDBERG, C., HOLMES, J., McCOY, K., KOPPITSCH, H. The Application of a continuous leak detection system to pipelines and associated equipment. IEEE Transactions on industry applications, vol.25, no.5, 1989.

[10] - WATANABE, K., KOYAMA, H., TANOGUCHI, H., OHMA, T., HIMMELBLAU, D.M. Location of pinholes in a pipeline. Computers in chemical engineering, vol.17, no.1, 1993.

[11] - WATTERS, G.Z., JEPPSON, R.W., FLAMMER, G.H. Waterhammer in PVC and reinforced plastic pipe. Journal of the hydraulics division, 1976.

[12] - WIGGERT, D.C., OTWELL, R.S., HATFIELD, F.J. The Effect of elbow restraint on pressure transients. Transactions of ASME, vol.107, no.9, 1985.

[13] - WIKE, A. Scada-based leak detection systems. Pipeline Gas Journal, vol.213, no.6, 1986.

[14] - WYLIE, E.B., STREETER, V.L. Fluid transients. FEB Press, Ann Harbor, Michigan, 1983.