



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
Sistemas de Processos Químicos e Informática

“Supervisão de Tubulações por Computador On-line”

Autor: Reinaldo Alves da Silva

Orientador: Prof. Dr. João Alexandre F. R. Pereira

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Química, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

Campinas-Agosto/1996

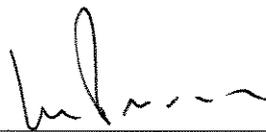


Esta versão corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado
apresentada e defendida por Reinaldo Alves da Silva e aprovada
pela Comissão Julgadora em 30 de agosto de 1996



Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira
Orientador

Dissertação defendida e aprovada em 30 de agosto de 1996 pela banca
examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira



Profa. Dra. Ana Maria Frattini Fileti



Prof. Dr. Sergio Persio Ravagnani

**“Se você não puder ser um pinheiro no topo da colina
seja um arbusto no vale.
Se não puder ser uma estrada real,
seja uma vereda.
Se não puder ser o sol,
seja uma pequena estrela.
Não é pelo tamanho que se ganha ou que se perde...
Seja o melhor possível naquilo que você é!”**

Confucio

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. João Alexandre F. Rocha Pereira, pela orientação, apoio, confiança e incentivo que me deu durante a realização deste trabalho ;

A CAPES pelo apoio financeiro ;

A Cláudio M. Buiatti, pela grande ajuda e sugestões, as quais foram de grande valia para a concretização deste trabalho;

A minha turma: César Carvalho, Daniele Casarin, Kelly Cohen, Marco Fraga, Marta e Paulo Reis, Ricardo Torres e Sérgio Faria pela amizade e pelos bons e inesquecíveis momentos em que passamos juntos ;

A todos os amigos que de alguma forma me ajudaram ;

Aos meus pais Rosalvo e Maria de Lourdes, e meus irmãos Rogério e Astéria. Agradeço pelo amor, carinho, apoio e dedicação durante todos os momentos de minha vida. Por isso, a eles dedico este trabalho .

E em especial a minha amiga e namorada Kelly de Oliveira Cohen, que depois de tantos contratempos, finalmente estamos juntos e espero que esta união possa ser duradoura.

Ao meu avô, em memória, Laurindo que esteja ele onde estiver, tenho certeza que está orgulhoso por ver o neto querido chegar até aqui e que com toda certeza, progredirá muito mais.

A está cidade, Campinas, que apesar de todos os problemas de ordem pessoal que passei, tenho muito o que agradecer, pois tenho certeza que aprendi bastante por aqui.

E, finalmente, agradeço a Deus, que apesar de não seguir a risca os seus ensinamentos, sempre foi muito generoso comigo.

RESUMO

Este trabalho estuda o comportamento da variação da perda de carga com o tempo obtido por um sistema de aquisição de dados em tempo real por microcomputador, interfaceado a sensores de medição da diferença de pressão ao longo da tubulação.

O método escolhido para a realização deste trabalho foi o monitoramento de sinais característicos gerados por ondas negativas de pressão, que se propagam à velocidade do som no sentido a montante e a jusante do local do vazamento. Os experimentos foram realizados para diversas faixas do número de Reynolds, desde Reynolds 1000 até 12000, ou seja, o experimento cobriu do regime laminar até o turbulento.

O sistema de aquisição de dados consta de quatro transdutores-transmissores de pressão, os quais medem a diferença de pressão em quatro diferentes pontos da tubulação, um multiplexador, que tem a função de escolher quais transdutores terão seus sinais transmitidos ao microcomputador, uma placa analógica-digital que converte o sinal analógico em digital, uma placa digital-digital, que, através do conversor D/D, atua na válvula solenóide, simulando o vazamento em estudo e um microcomputador que recebe os dados do programa de aquisição de dados e os processam.

Foi elaborado um software de filtragem dos dados amostrados, o qual minimiza ruídos provocados por operações normais em um processo de transporte de fluidos.

Para o estudo do fenômeno, variou-se os principais parâmetros que afetam diretamente o vazamento, como a razão de vazamento, o número de Reynolds, e a posição do vazamento. Este estudo possibilitou tirarmos conclusões a respeito da detecção, dimensão e localização do vazamento em uma tubulação.

PALAVRAS-CHAVES: Tubulações, detecção de vazamentos, transiente hidráulico, aquisição de dados.

NOMENCLATURA

- a - velocidade de propagação da onda no transiente hidráulico [m/s]
- A - área da seção transversal, [cm²]
- C_d - coeficiente de vazão
- D - diâmetro do tubo, [cm]
- e - espessura da parede do tubo, [cm]
- E - módulo de elasticidade do tubo, [Gpa/cm²]
- g - aceleração devida à gravidade, [9,81 m/s²]
- h₁ - perda de carga devido ao atrito, [cmH₂O]
- H - carga piezométrica, [cmH₂O]
- H_{res} - carga piezométrica do reservatório, [cmH₂O]
- H_o - carga piezométrica na tubulação, [cmH₂O]
- K - módulo de elasticidade do fluido, [Gpa/cm²]
- r - raio do tubo, [cm]
- Re - Número de Reynolds
- SA - sinal analógico enviado pelo transdutor-transmissor de pressão, [volts]
- SD - sinal digital convertido pela placa analógica-digital, [bits]
- t - tempo, [s]
- V - velocidade do fluido na seção transversal da tubulação, [m/s]
- V_o - velocidade inicial do fluido na seção transversal da tubulação [m/s]
- y - valor filtrado
- \bar{y} - valor filtrado resultante do filtro exponencial duplo
- α - constante do filtro simples, $\alpha = 1/(\tau_f/\Delta t + 1)$, ou constante, função da razão de Poisson e de dimensões do tubo, $\alpha = \frac{2e}{D}(1 + \mu) + \frac{D}{D + e}$
- ΔH - acréscimo ou decréscimo de pressão quando da presença do transiente hidráulico, [cmH₂O]
- Δt - incremento de tempo, [s]
- γ - peso específico do fluido, [(g/cm³)/g], ou

constante do filtro exponencial duplo

ε - rugosidade relativa do tubo

ρ - densidade do fluido, [g/cm³]

SUMÁRIO

CONTEÚDO	pag.
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 - INTRODUÇÃO	5
2.2 - TÉCNICAS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS	5
2.2.1 - Balanço de massa	6
2.2.2 - Análise de medidas de pressão e vazão	6
2.2.3 - Simulação paralela	7
2.2.4 - Monitoramento de sinais característicos emitidos por vazamentos	8
a) Detecção de ondas negativas de pressão	8
b) Detecção de sinais ultra-sônicos	8
2.3 - Descrição do fenômeno do transiente hidráulico	9
2.3.1 - Classificação dos transientes hidráulicos	12
2.3.2 - Causas de transiente	12
2.3.3 - Equações do transiente hidráulico	13
CAPÍTULO 3 - MONTAGEM EXPERIMENTAL	
3.1 - INTRODUÇÃO	20
3.2 - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	20
3.3 - DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO EQUIPAMENTO	22
3.3.1 - Bomba centrífuga	22
3.3.2 - Transdutores de pressão	23
3.3.3 - Placa analógica-digital-analógica (Placa ADA)	24
3.3.3.1 - O Multiplexador	25
3.3.3.2 - O conversor analógico-digital (CAD)	25
3.3.3.3 - A placa Digital-Digital (D/D)	26
3.3.4 - O Micro-computador	26
CAPÍTULO 4 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	
4.1 - INTRODUÇÃO	29
4.2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	29
4.3 - CONVERSÃO DO SINAL ANALÓGICO EM DIGITAL	30
4.4 - TEMPORIZAÇÃO DOS PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS	31
4.5 - FILTRAGEM DOS DADOS	33
4.5.1 - Média aritmética	33
4.5.2 - Filtros analógicos	34
4.5.3 - Filtros digitais	34
4.5.3.1 - Filtro exponencial simples	34
4.5.3.2 - Filtro exponencial duplo	36
4.6 - PROGRAMAS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	37

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

5.1 - INTRODUÇÃO	44
5.2 - CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO	44
5.3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO	45
5.4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	48
5.4.1 - Transiente hidráulico	48
5.5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	69
5.5.1 - Queda de pressão na tubulação	69
5.5.2 - Vazamento mínimo detectado	71
5.5.3 - Velocidade de propagação do transiente hidráulico	71
5.5.4 - Localização do vazamento	75
5.5.4.1 - Vazamento provocado pelo micro-computador ...	76
5.5.4.2 - Vazamento provocado em um instante qualquer .	77

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 - CONCLUSÕES	82
6.2 - SUGESTÕES	83

APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO

A.1 - CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO	85
---	----

APÊNDICE B - LISTAGENS DOS PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO

B.1 - LISTAGEM DO PROGRAMA DE AQUISIÇÃO AQU12.C	88
B.2 - LISTAGEM DO PROGRAMA DE LOCALIZAÇÃO - LOCAL3-0.C	95

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 - INTRODUÇÃO

Transportes através de redes de tubulações é uma parte essencial da infraestrutura da sociedade moderna. Matérias-primas são frequentemente transportadas através de tubulações com centenas de quilômetros de extensão.

As tubulações, como qualquer outro equipamento na indústria química, estão sujeitas a defeitos, os quais podem ser decorrentes de diversos fatores, tais como, mudança brusca de pressão, falta de manutenção, corrosão, falha de operação, entre outros fatores. Estes vazamentos, ocorrendo próximos a zonas residências, podem ter conseqüências desastrosas, caso tais tubulações estejam transportando fluidos tóxicos ou inflamáveis.

Sendo assim, é necessário que o surgimento de vazamentos, por menor que sejam, possam ser detectados e localizados o mais rapidamente e com a melhor precisão possível.

Os vazamentos que aparecem em redes de tubulações podem ser divididos em duas classes [3]:

- 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 produto 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.

O presente trabalho tem por objetivo propor um método para detecção e localização de vazamentos em tubulações que transportam líquidos através do

desenvolvimento de métodos computacionais on-line de análise de transientes hidráulicos em tubulações.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - INTRODUÇÃO

Os transtornos que um vazamento em uma tubulação pode acarretar é motivo de preocupação intensa. Por isso, este assunto é pesquisado em diversas áreas de engenharia, tentando-se unir os vários conhecimentos para que cada vez mais sejam aperfeiçoados os métodos já existentes e introduzidas novas técnicas de detecção e localização de vazamentos.

O objetivo deste capítulo é apresentar as técnicas nas quais se baseiam os diversos métodos de detecção de vazamentos citados na literatura. E ainda, descrever o fenômeno do transiente hidráulico.

2.2 - Técnicas para detecção de vazamentos

O advento do computador e das técnicas de computação em tempo real e sua conseqüente utilização no controle e supervisão de processos industriais, tem fornecido subsídios para o desenvolvimento de sistemas de detecção e localização de vazamentos em tubulações que transportam produtos através de grandes distâncias.

Várias técnicas computacionais, capazes de detectar o aparecimento de um vazamento, são encontrados na literatura. Tais técnicas baseiam-se em um dos princípios abaixo [4]:

- a) balanço de massa;
- 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 ultrasônicos.

2.2.1 - Balanço de massa

Considerando constantes a densidade, viscosidade, temperatura e pressão de um produto que escoa 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, na prática estes parâmetros estão sujeitos a sofrer variações, o que ocasiona falsas deduções de diferenças na taxa de fluxo do produto. Dessa forma, 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, sendo extremamente difícil, através desta técnica, a identificação de pequenos vazamentos (vazamentos ocultos).

2.2.2 - 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. Pequenas variações nas condições medidas podem ser resultantes de fontes diferentes de um orifício no tubo. Com isso, a precisão com que uma falha é identificada é função do tamanho do vazamento.

2.2.3 - Simulação paralela

O modelo de simulação paralela é conduzido por um conjunto limitado de medições reais da tubulação, tipicamente medidas de pressão e vazão nas extremidades de uma tubulação. Disto, o modelo estima as condições de escoamento do fluido, pressão, velocidade, densidade e outras variáveis, em posições intermediárias ao longo da tubulação. De posse das estimativas fornecidas pela simulação, é feita uma comparação com os valores experimentais medidos em diversos pontos da tubulação. Divergências observadas nesta comparação são indícios de defeito na linha.

Métodos baseados neste princípio têm fornecido bons resultados para sistemas de tubulações com poucas ramificações e que operam fluidos incompressíveis.

Baghdadi e Mansy (1988) elaboraram um modelo matemático para localização de vazamentos em tubulação, baseado na análise de fluxo unidimensional. O modelo desenvolvido é válido para regimes de escoamento laminar e turbulento e para fluidos incompressíveis. Através da análise da equação da continuidade, da perda de carga devido ao atrito ao longo da tubulação na posição a jusante e a montante do vazamento em estado estacionário, da descarga do fluido através do vazamento, obtida pela equação que descreve o fluxo através de um orifício, e do balanço de energia global do sistema, foi formulado uma expressão capaz de prever a posição do vazamento em termos das quantidades medidas das taxas de fluxo e das pressões nas extremidades da tubulação em regime estacionário.

2.2.4 - Monitoramento de sinais característicos emitidos por vazamentos

a) Detecção de ondas negativas de pressão:

Quando se sucede um vazamento numa linha, uma rápida queda de pressão ocorre na posição do mesmo originando uma onda de pressão negativa que se propaga a uma velocidade superior a do som no meio, tanto no sentido a jusante como a montante do local do vazamento. 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 mesmo.

A onda de pressão negativa pode ser causada por operações normais na tubulação, como parada e partida de bombas, fechamento de válvulas, e outros procedimentos normais. A filtragem cuidadosa de dados e correlação de possíveis ondas de pressão induzidas por vazamento são necessárias para minimizar falsos alarmes.

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. Com a instalação de microfones na tubulação, um na entrada e outro na saída, é possível detectar e medir as ondas de pressão (Watanabe e Koyama - 1991). Estas ondas possuem forma de pulso e o instante em que elas aparecem e

a sua amplitude indicam, respectivamente, a posição e o tamanho do vazamento.

2.3 - Descrição do fenômeno do transiente hidráulico

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 transiente hidráulico pode ser provocado por vários motivos: abertura ou fechamento de válvulas; partida ou parada de bombas; rompimento de um tubo.

Antes das deduções das equações do transiente hidráulico é apresentado um exemplo ilustrativo do fenômeno do transiente hidráulico.

Consideremos o sistema mostrado na figura 2.1, o qual encontra-se em condições de escoamento estacionárias. Um líquido qualquer escoar 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 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 2.1) que são descritas a seguir:

a) $0 < t \leq L/a$ (figuras 2.1.a e 2.1.b)

No momento em que a válvula se fecha, a velocidade de escoamento do líquido através da mesma é

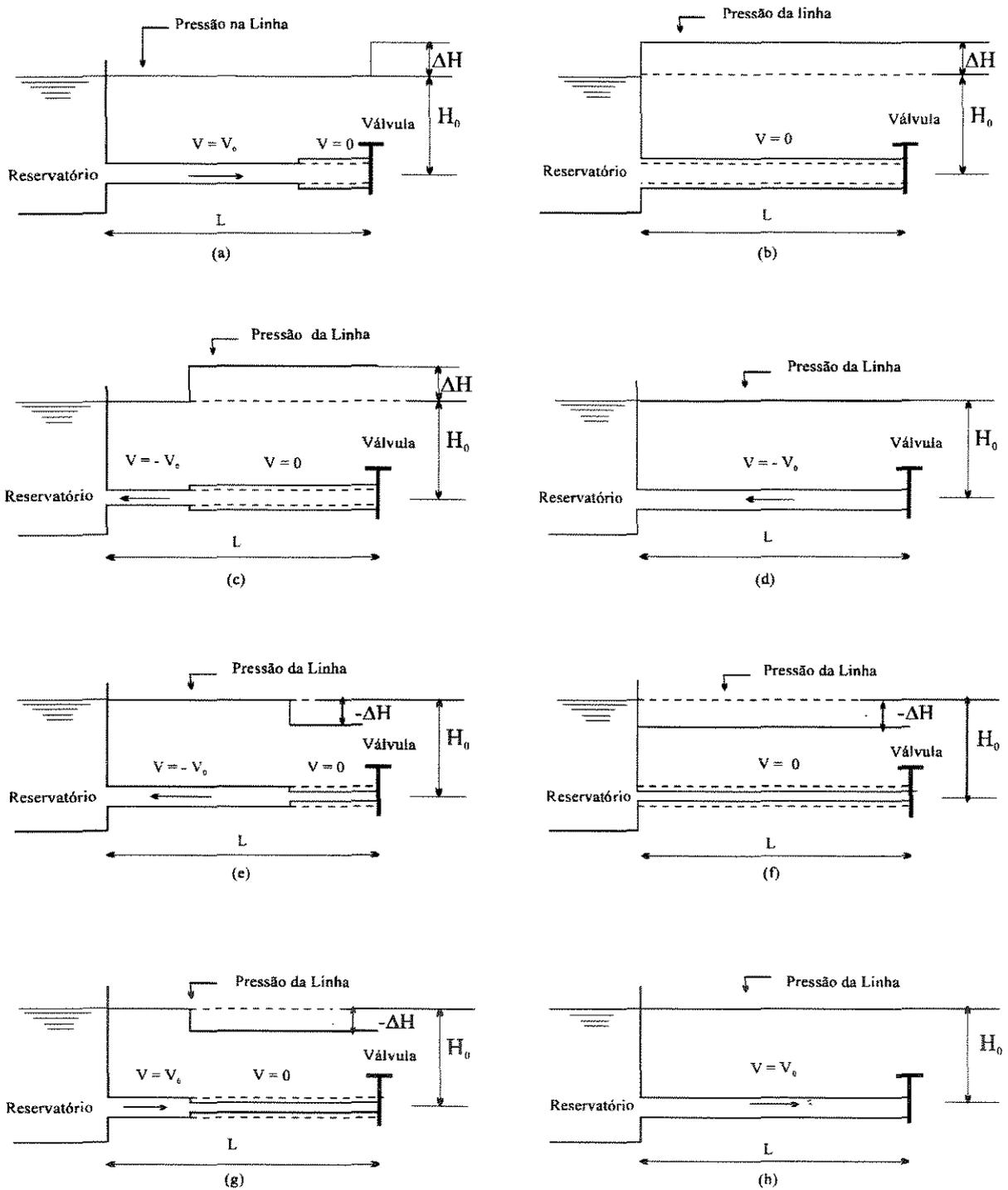


Figura 2.1: Representação gráfica da propagação de um transiente hidráulico no interior de uma tubulação devido ao fechamento de uma válvula no fim da linha.

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 2.1.a, o estado inicial do tubo está representado por linhas pontilhadas). 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 2.1.c e 2.1.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 2.1.e e 2.1.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 da tubulação está com velocidade de escoamento igual a zero e pressão $H_0 - \Delta H$.

d) $3L/a < t \leq 4L/a$ (figuras 2.1.g e 2.1.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.

2.3.1 - Classificação dos transientes hidráulicos

Os transientes hidráulicos podem ser classificados em três categorias diversas dependendo da tubulação 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).

2.3.2 - 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 através do fechamento de um portão de controle;
- e) falha ou colapso de uma tubulação, de um tanque, etc.;
- f) aumentos súbitos de alimentação em um rio devido a tempestades.

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.

2.3.3 - 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 estacionário durante o regime transiente;
- b) escoamento unidimensional e velocidade uniforme;

c) as paredes do tubo e o líquido são linearmente elásticos.

Consideremos o exemplo do fechamento da válvula anteriormente descrito e representado pela figura 2.1.

No instante em que a válvula é fechada, o líquido imediatamente adjacente à mesma tem sua velocidade de escoamento mudada de V_0 a 0 devido ao impulso de uma maior pressão desenvolvida na face da válvula. Tão logo a primeira camada encontra-se em repouso a mesma ação ocorre com a camada de líquido vizinha. Dessa maneira, uma onda de pressão positiva é visualizada propagando-se no sentido do tanque com velocidade a e pressão suficiente para trazer o líquido ao repouso.

A equação do movimento é aplicada a um volume de controle (figura 2.2) onde a onda de pressão move-se para a esquerda a uma velocidade absoluta $(a - V_0)$. A mudança na altura de carga ΔH na válvula é acompanhada por uma mudança de velocidade ΔV . A equação do movimento na direção X pode ser escrita como:

$$-\gamma \cdot \Delta H \cdot A = \rho \cdot A \cdot (a - V_0) \cdot \Delta V + \rho \cdot A \cdot (V_0 + \Delta V)^2 - \rho \cdot A \cdot V_0^2 \quad (2.1)$$

onde: γ - peso específico do líquido

ρ - densidade do líquido (γ/g)

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 de carga da tubulação

Como a variação da abertura da válvula é muito pequena, a variação de velocidade ΔV também é pequena. Assim

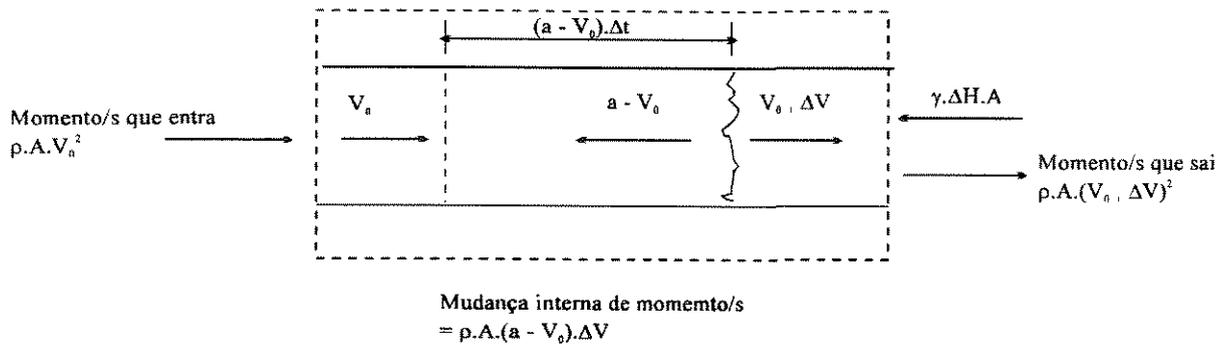


Figura 2.2: Equação do movimento aplicada a um volume de controle.

o termo ΔV^2 na equação 2.1 pode ser desprezado. Dividindo ainda a equação por $\rho.A$ tem-se:

$$\Delta H = -a \cdot \frac{\Delta V}{g} \cdot \left(1 + \frac{V_0}{a}\right) \quad (2.2)$$

Para líquidos escoando em tubos de metal ou de plástico, $V_0/a \ll 1$ [5]. Então:

$$\Delta H = -a \cdot \frac{\Delta V}{g} \quad (2.3)$$

Da equação 2.3 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 2.3.

A equação 2.3 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:

$$\Delta H = a \cdot \frac{\Delta V}{g} \quad (2.4)$$

Portanto:

$$\Delta H = \pm a \frac{\Delta V}{g} \quad (2.5)$$

A equação 2.5 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 2.1.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, o tubo representado na figura 2.1.a deve sofrer uma extensão em seu comprimento, ΔS , e em seu diâmetro, ΔA , enquanto o líquido sofre compressão, $\Delta \rho$. Considerando que esta extensão ocorre em L/a segundos, para esse intervalo de tempo a equação da continuidade pode ser escrita como:

$$\rho \cdot A \cdot V_0 \cdot \frac{L}{a} = \rho \cdot L \cdot \Delta A + \rho \cdot A \cdot \Delta S + L \cdot A \cdot \Delta \rho \quad (2.6)$$

A variação de velocidade do líquido pode ser escrita como:

$$\Delta V = \Delta S \cdot \frac{a}{L} - V_0 \quad (2.7)$$

Substituindo a equação acima em 2.6 de modo a eliminar V_0 temos:

$$-\frac{\Delta V}{a} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.8)$$

Definindo o módulo de elasticidade do líquido, K:

$$K = \frac{\rho \cdot \Delta P}{\Delta \rho} \quad (2.9)$$

Substituindo as equações 2.3 e 2.9 na equação 2.8 obtém-se:

$$a^2 = \frac{K}{\rho \left[1 + \left(\frac{K}{A} \right) \left(\frac{\Delta A}{\Delta P} \right) \right]} \quad (2.10)$$

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 Streeter e Wylie [5], para tubos elásticos e com parede espessa ($D/e < 25$), tem-se as seguintes expressões para o termo em questão:

$$a) \quad \frac{\Delta A}{A \cdot \Delta P} = \frac{D}{E \cdot e} \left[\frac{2 \cdot e}{D} \right] (1 + \mu) + \frac{D}{D + e} \cdot \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) \quad (2.11)$$

$$b) \quad \frac{\Delta A}{A \cdot \Delta P} = \frac{D}{E \cdot e} \left[\frac{2 \cdot e}{D} \cdot (1 + \mu) + \frac{D}{D + e} \cdot (1 - \mu^2) \right] \quad (2.12)$$

$$c) \quad \frac{\Delta A}{A \cdot \Delta P} = \frac{D}{E \cdot e} \left[\frac{2 \cdot e}{D} \cdot (1 + \mu) + \frac{D}{D + e} \cdot (1 - \mu^2) \right] \quad (2.13)$$

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:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho \cdot [1 + (K \cdot D / E \cdot e) \cdot C_1]}} \quad (2.14)$$

sendo C_1 :

$$C_1 = \frac{2 \cdot e}{D} \cdot (1 + \mu) + \frac{D}{D + e} \cdot (1 - \mu^2) \quad (2.15)$$

Streeter Wylie [5] obtiveram a equação da velocidade da onda para vários outros casos.

CAPÍTULO 3 - MONTAGEM EXPERIMENTAL

3.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada a aparelhagem experimental construída para o desenvolvimento do trabalho. Abaixo encontram-se especificados todos os equipamentos que constituem a montagem.

3.2 - Descrição do equipamento

A figura 3.1 mostra o esquema de montagem experimental, constituído de uma tubulação de 1248m de extensão, uma bomba centrífuga, transdutores-transmissores de pressão, conjunto válvulas solenóides-válvulas gavetas, medidor de vazão e acessórios.

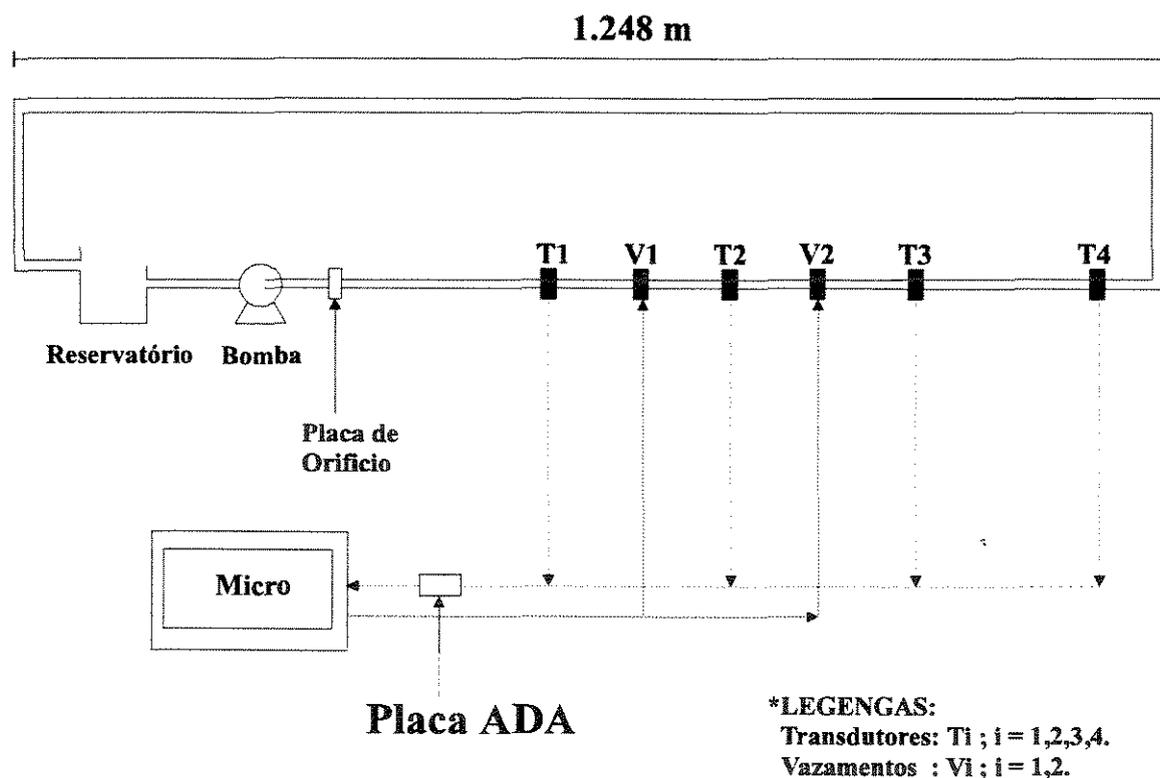


Figura 3.1 - Esquema da montagem experimental.

O sistema hidráulico é constituído por trechos de tubos de PVC de, aproximadamente, 18 metros de comprimento

(três tubos de 6 metros acoplados um ao outro), 2,53 cm de diâmetro e 0,44 mm de espessura, interligados por joelhos padrão de 90°. A tubulação, desde a descarga da bomba até o seu final, tem um comprimento total de 1.248 metros.

Ao longo da tubulação existem várias tomadas laterais de amostragem, nestas podem ser instalados tanto transdutores de pressão, responsáveis pelo monitoramento da tubulação, quanto conjuntos válvula solenóide-válvula gaveta, responsáveis por simular o rompimento da tubulação.

Na tubulação foram fixados dois conjuntos válvula solenóide-válvula gaveta e 4 transdutores de pressão, sendo que um deles foi depois relocado, daí a denominação de *transdutor 5* (tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Posições de instalação dos transdutores de pressão e dos conjuntos válvula solenóide - válvula gaveta.

Equipamento	Distância da saída da bomba (m)
Transdutor 1	6,5
Transdutor 2	493,0
Transdutor 3	992,0
Transdutor 4	1242,0
Transdutor 5	742,0
Conjunto de Válvulas 1	249,0
Conjunto de Válvulas 2	749,0

Os conjuntos de válvula solenóide-válvula gaveta são utilizados para gerar e controlar o tamanho do vazamento. A vazão da abertura lateral (vazamento) é controlada manualmente pela válvula gaveta instalada após a válvula solenóide. A medição do fluxo do vazamento é feita utilizando-se proveta e cronômetro.

A queda de pressão é medida através de transdutores-transmissores de pressão, os quais enviam, continuamente, suas leituras de pressão a um micro-computador PC-XT.

O micro computador é responsável por abrir a válvula solenóide de modo a simular o vazamento, receber os dados emitidos pelos transdutores, arquivá-los e apresentar os resultados em forma gráfica ao usuário.

O fluido de trabalho é água. A água circula na tubulação em circuito fechado, ficando armazenada num reservatório de 50 litros de capacidade sendo succionada por uma bomba centrífuga. A vazão de água na tubulação é medida por uma placa de orifício, construída no laboratório. A placa foi previamente calibrada e instalada na saída da bomba. Os dados e cálculos de calibração desta placa estão apresentados no apêndice A.

3.3 - Descrição dos componentes do equipamento

A aparelhagem experimental é dividida nos seguintes elementos:

- Bomba centrífuga;
- Transdutores-transmissores de pressão;
- Placa analógica-digital-analógica (Placa ADA);
 - Multiplexador;
 - Conversor analógico-digital (CAD);
 - Placa Digital-Digital (D/D);
- Micro computador.

3.3.1 - Bomba centrífuga

A bomba centrífuga utilizada para a realização deste trabalho é da marca Weg, modelo D568692, 1,5 cv de

potência, permite obter uma vazão máxima de $220 \text{ cm}^3/\text{s}$ (792 l/h). Após a bomba foram instaladas duas válvulas gavetas sendo que a primeira logo após a bomba tem o objetivo de regular a vazão de água que escoar pelos tubos e a outra fixar a vazão máxima à saída da bomba.

3.3.2 - Transdutores de pressão

Transdutores podem ser definidos como dispositivos que convertem uma forma de energia em outra, transformando um tipo de impulso num sinal mais fácil ou conveniente de transmitir ou manipular.

Os transdutores mais utilizados em controle digital de processos são aqueles que transformam uma energia física (Ex.: pressão, temperatura, nível, entre outros.) em voltagem ou corrente equivalente. No caso em estudo, medidas de pressão foram transformadas em voltagem. O transdutor utilizado para o presente trabalho é do tipo piezoelétrico.

Um transdutor é denominado *piezoelétrico* quando é construído a partir de um material sólido que tem a propriedade de gerar uma corrente elétrica ao ser submetido a deformação, compressão, expansão ou torção, sendo este um efeito reversível.

Ao transdutor são acoplados eletrodos metálicos. Quando ocorre a deformação do material transdutor, a carga gerada, q , produz uma diferença de potencial entre o eletrodos, sendo esta carga proporcional à deformação do material, x_1 . A diferença de potencial gerada é então, transmitida a um amplificador, que amplia este sinal e o envia até o micro-computador. Estes sinais são então condicionados de modo a eliminar ruídos e compatibilizá-los com o micro-computador utilizado na aquisição de dados. Este assunto é melhor discutido no capítulo seguinte.

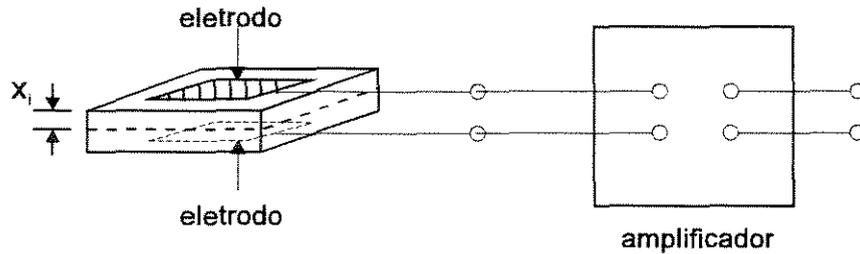


Figura 3.2 - Representação de um transdutor piezoelétrico.

Para este trabalho foram utilizados 4 transdutores de pressão da marca COLE PARMER, modelo K1. Os dois primeiros transdutores, T1 e T2 (tabela 3.1), são especificados para medirem valores máximos equivalentes a 60 psig e os outros dois, transdutores T3 e T4, são capazes de realizar leituras até 30 psig e 15 psig, respectivamente. O sinal elétrico emitido por eles está na faixa de 1 a 5 volts.

3.3.3 - Placa analógica-digital-analógica (Placa ADA)

Como os sinais medidos no processo são de natureza analógicas, os mesmos não podem ser utilizados diretamente pelo microcomputador, o qual requer que os dados estejam na forma digital (informações codificadas em palavras de 16 bits), sendo assim, a interface entre o computador e o processo deve ser feita com um conversor analógico-digital, compatível com o microcomputador PC/XT. A placa ADA versão 2.2 utilizada é da marca TAURUS ELETRÔNICA - Brasil e a mesma 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.

3.3.3.1 - O Multiplexador

O multiplexador pode ser descrito como um interruptor eletrônico com várias portas, ou canais, o qual é controlado pelo microcomputador. Sua grande vantagem é permitir a utilização de um único conversor analógico-digital (CAD) acessar várias linhas de sinais analógicos. A utilização de um multiplexador em nossa montagem experimental implicou na não utilização de 4 CAD'S para receber os sinais analógicos emitidos pelos 4 transdutores de pressão. A figura 3.3 ilustra a função do multiplexador.

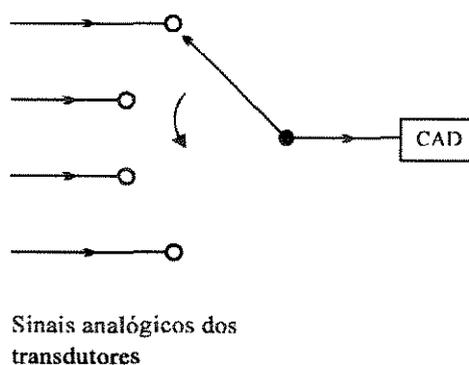


Figura 3.3 - O multiplexador em um sistema de aquisição de dados.

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.

3.3.3.2 - O conversor analógico-digital (CAD)

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

O sampler é simplesmente um interruptor que abre e fecha em intervalos discretos de tempo. Em outras palavras, um *sampler*, permite que o microcomputador efetue a leitura de valores de um sinal analógico contínuo e produza uma sequência de valores amostrados em determinados instantes. Isso se faz necessário porque o microcomputador gasta um intervalo de tempo finito para ler o sinal enviado pelo transdutor. Se a variável medida sofrer alguma modificação durante este intervalo de tempo, esta mudança não é percebida pelo computador.

O princípio de operação do conversor analógico digital (CAD) consiste na conversão de um sinal analógico em um sinal digital expresso como um número inteiro na forma binária.

3.3.3.3 - A placa Digital-Digital (D/D)

No nosso experimento a simulação de um vazamento na tubulação é feito através da abertura da válvula solenóide. Com esta finalidade foi instalada uma saída digital em uma placa digital-digital (D/D) e acoplada à válvula solenóide para atuar na abertura ou fechamento da mesma. O sinal é recebido pelo acionamento de qualquer tecla através da chamada de uma subrotina em conjunto com o programa de aquisição de dados. A saída digital tem capacidade para comandar até oito relés.

Os sinais digitais são totalmente compatíveis com o microcomputador sem necessidade de conversores especiais em interface.

3.3.4 - O Micro-computador

O micro-computador usado para este trabalho é um PC/XT da marca HENGESYSYSTEM, modelo HSTURBO.

É muito importante, para a aquisição de dados em tempo real, que se conheça o período de tempo gasto pelo microcomputador para receber um sinal dos transdutores, processá-lo e mostrá-lo ao usuário. O computador digital utilizado para a aquisição de dados em tempo real, possui um relógio interno que permite a correta correspondência entre o tempo e as variáveis do processo analisado.

A grande vantagem de se usar o micro-computador neste trabalho está no fato de que a aquisição dos dados (monitoramento da tubulação) é feito em tempo real e com isso os problemas que porventura aconteçam podem ser sanados o mais rápido possível.

CAPÍTULO 4 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

4.1 - INTRODUÇÃO

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 do processo monitorado, com base nas informações medidas [3].

O sistema de aquisição de dados é de suma importância tanto no controle quanto na análise de processos no que se refere a obtenção de dados em maior grau de rapidez e confiabilidade.

Este capítulo tem por objetivo apresentar a técnica de aquisição de dados em tempo real via microcomputador, desenvolvida para obtenção do perfil de pressão em função do tempo, gerado pelo surgimento de um vazamento em uma tubulação.

4.2 - Descrição do sistema de aquisição de dados

No presente trabalho o sistema de aquisição de dados é constituído pelos seguintes instrumentos:

- Quatro (4) transdutores de pressão. Sua função é medir e transmitir os valores de pressão no interior da tubulação ao microcomputador;
- Multiplexador. Sua função é escolher quais transdutores terão seus sinais transmitidos ao microcomputador;
- Conversor analógico-digital. Tem a função de converter as medidas do processo em sinais digitais, que serão reconhecidos pelo microcomputador;
- Microcomputador. Tem a função de 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. Têm por funções enviar instruções aos instrumentos componentes do sistema de aquisição de dados, são os responsáveis pelo funcionamento de todo o sistema de aquisição de dados.

4.3 - Conversão do sinal analógico em digital

Os transdutores de pressão utilizados em nosso sistema de aquisição de dados transmite um sinal analógico à placa A/D, a qual encontra-se na faixa de 1 a 5 volts. A placa ADA por sua vez converte este em sinal digital, número decimal equivalente na faixa de 819 a 4095. Esta conversão é feita conforme a equação 4.1.

$$\frac{(SD - 819)}{(4095 - 819)} = \frac{(SA - 1)}{(5 - 1)} \quad (4.1)$$

onde SA é o sinal analógico de voltagem enviado pelo transdutor-transmissor de pressão e SD o sinal digital (número decimal equivalente).

Este sinal digital será manipulado pelo microcomputador com a finalidade de ser convertido em unidades de pressão. Esta conversão é feita nas subrotinas LEITURA dos programas de aquisição de dados (AQU12.C, AQUJ23.C, AQUJ24.C, AQUJ34.C, LOCAL3-0.C e LOCAL4-0.C).

Para pressões de 0 psig, o transdutor transmite um sinal de 1 volt que corresponde a um sinal digital, em número decimal equivalente, a 819. Para pressões de 30 psig, no caso de se estar usando o transdutor até 30 psig, o sinal emitido será de 5 volts que corresponde a um sinal digital, em número decimal equivalente, a 4095.

Da mesma forma é feita a conversão para os transdutores de pressão até 60 psig.

Assim, para uma dada leitura de V volts, utilizando-se o transdutor de 30 psig, tem-se:

$$P = 30. \frac{(SD - 819)}{(4095 - 819)} \quad (4.2)$$

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 60 psig:

$$P = 60. \frac{(SD - 819)}{(4095 - 819)} \quad (4.3)$$

4.4 - Temporização dos programas de aquisição de dados

Para que se possa ter uma correta correspondência entre o tempo e as leituras de pressão, foi necessário determinar o intervalo de tempo gasto pelo micro para efetuar a execução do laço de leitura nos programas de aquisição de dados. Isto foi possível utilizando-se o relógio interno do microcomputador.

Na subrotina leitura, além da aquisição de dados, são feitos a conversão dos sinais, a transformação dos sinais em unidades de pressão, a filtragem dos dados e, para os programas LOCAL3-0.C e LOCAL4-0.C, a localização do vazamento.

O sinal recebido dos transdutores apresenta oscilações devida a pulsações da bomba centrífuga. Com o intuito de minimizar este efeito é realizado na subrotina *leitura*, o cálculo da média de um determinado número de amostras, 20 para os programas AQU12.C, AQUJ23.C, AQUJ24.C, AQUJ34.C e 15 para os programas LOCAL3-0.C e LOCAL4-0.C. Estes valores foram conseguidos depois de vários testes, onde nestes comparou-se precisão e amortização dos ruídos. O valor médio obtido é considerado como sendo o sinal transmitido pelo transdutor piezoelétrico, ou seja, um

ponto exposto na tela do vídeo representa uma média de 20 dados de leitura do processo, para os programas de aquisição, e 15 para os programas de localização.

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

A temporização dos programas de aquisição de dados foi feita introduzindo-se a biblioteca *time.h* e a subrotina *clock()* no programa principal. Esta subrotina faz uso do relógio interno do computador para medir o tempo consumido na realização do programa de aquisição de dados. Dessa forma, ao inicializar o programa, a subrotina *clock()* ativa o relógio interno do micro, e desliga-o ao final do programa.

Com a utilização dessa subrotina, pode-se saber o exato instante em que a subrotina leitura é inicializada e finalizada. Ao chamar 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 o intervalo de tempo consumido entre duas leituras sucessivas para um dado transdutor. Dentro da subrotina, são feitas 250 leituras para cada transdutor quando utiliza-se os programas de aquisição de dados (2 transdutores de pressão), e 125 leituras para cada transdutor quando utiliza-se os programas de localização (4 transdutores de pressão), totalizando 500 leituras. Esta é mais uma forma de tentar reduzir as perturbações geradas por outros fatores, que não um vazamento.

4.5 - Filtragem dos dados

Quando se faz a aquisição de dados de um processo qualquer, ruídos podem ser gerados por várias fontes como, por exemplo, parada e partida de bombas, fechamento de válvulas, ou até mesmo pequenas oscilações de vazão do processo. 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, é necessário reduzir ao máximo estes ruídos.

Para minimizar oscilações nos sinais recebidos em um processo qualquer, é necessário a adoção de um método de filtragem de dados acoplados ao sistema de aquisição de dados. A seguir são discutidos alguns tipos de filtros usados em controle de processos.

4.5.1 - Média aritmética

Como já discutido na seção 4.4, o sinal emitido pelos transdutores de pressão apresenta oscilações devido, entre outros fatores, a pulsação da bomba centrífuga.

Para minimizar este efeito é realizado na subrotina leitura, o cálculo da média de um determinado número de medidas sucessivas e considera-a como sendo o valor filtrado.

Para os programas de aquisição de dados AQU12.C, AQUJ23.C, AQUJ24.C e AQUJ34.C, 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.

Em um sistema de aquisição de dados, a média aritmética geralmente é utilizada como um pré-filtro, pois

para ruídos de alta frequência a redução dos mesmos não é considerada satisfatória.

4.5.2 - Filtros analógicos

Filtros analógicos são usados tradicionalmente para suavizar flutuações de dados experimentais. Sua operação pode ser feita por uma função de transferência de primeira ordem ou equivalente a uma equação diferencial de primeira ordem. A equação a seguir representa um filtro analógico:

$$\tau_F \cdot \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = X(t) \quad (4.4)$$

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

4.5.3 - Filtros digitais

Nesta seção será apresentado os principais tipos de filtros digitais que se utilizam para condicionar os sinais digitais enviados por sensores analógicos. São eles: o filtro exponencial simples e o exponencial duplo. A diferença básica entre estes dois tipos de filtros é que o filtro exponencial duplo equivale a dois exponenciais simples, ou seja, um filtro exponencial simples atua no sinal de saída de outro exponencial simples.

4.5.3.1 - Filtro exponencial simples

Vamos representar uma seqüência de medidas de pressão 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 4.4 pode ser rescrita utilizando-se diferenças finitas:

$$\frac{dY}{dt} \cong \frac{Y_n - Y_{n-1}}{\Delta t} \quad (4.5)$$

Substituindo 4.4 em 4.5 e modificando $Y(t)$ por Y_n e $X(t)$ por X_n temos:

$$\tau_F \cdot \frac{(Y_n - Y_{n-1})}{\Delta t} + Y_n = X_n \quad (4.6)$$

Rearranjando:

$$Y_n = \frac{\Delta t}{\tau_F + \Delta t} Y_n + \frac{\tau_F}{\tau_F + \Delta t} Y_{n-1} \quad (4.7)$$

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

$$\alpha = \frac{1}{\frac{\tau_F}{\Delta t} + 1} \quad (4.8)$$

sendo $0 < \alpha \leq 1$.

Da equação 4.6 e da definição de α temos:

$$Y_n = \alpha \cdot X_n + (1 - \alpha) \cdot Y_{n-1} \quad (4.9)$$

A equação 4.9 nos diz 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.

4.5.3.2 - Filtro exponencial duplo

Outro filtro digital muito utilizado é o filtro exponencial duplo ou de segunda ordem, que oferece vantagens em relação ao filtro exponencial simples pela eliminação de ruídos de maiores frequências.

O filtro exponencial duplo 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 4.9 e ao sinal filtrado no instante anterior, temos:

$$\bar{Y}_n = \gamma \cdot Y_n + (1-\gamma) \cdot \bar{Y}_{n-1} \quad (4.10)$$

$$\bar{Y}_{n-1} = \gamma \cdot Y_{n-1} + (1-\gamma) \cdot \bar{Y}_{n-2} \quad (4.11)$$

Substituindo 4.9 em 4.10:

$$\bar{Y}_n = \gamma \cdot \alpha \cdot X_n + \gamma \cdot (1-\alpha) \cdot Y_{n-1} + (1-\gamma) \cdot \bar{Y}_{n-1} \quad (4.12)$$

Isolando Y_{n-1} em 4.12 e substituindo, em 4.11 temos:

$$\bar{Y}_n = \gamma \cdot \alpha \cdot X_n + (2-\gamma-\alpha) \cdot \bar{Y}_{n-1} - (1-\alpha) \cdot (1-\gamma) \cdot \bar{Y}_{n-2} \quad (4.13)$$

Considerando $\gamma = \alpha$, podemos simplificar a equação 4.13:

$$\bar{Y}_n = \alpha^2 \cdot X_n + 2 \cdot (1-\alpha) \cdot \bar{Y}_{n-1} - (1-\alpha)^2 \cdot \bar{Y}_{n-2} \quad (4.14)$$

A equação 4.14 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 oferece vantagens sobre o filtro exponencial simples e sobre o filtro analógico por fornecer melhores resultados de filtragem para ruídos de maiores frequências, especialmente se $\gamma = \alpha$, por isso foi o escolhido para ser utilizado neste trabalho. Estudos realizados por Naves[5] 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.

4.6 - Programas para aquisição de dados

Dos seis programas desenvolvidos para aquisição de dados, quatro deles (AQU12.C, AQUJ23.C, AQUJ24.C e AQUJ34.C) são responsáveis por abrirem a válvula solenóide e simular o vazamento, enquanto nos outros dois (LOCAL3-0.C e LOCAL4-0.C), a válvula solenóide é aberta manualmente. Os programas LOCAL3-0.C e LOCAL4-0.C indicam, ainda, a localização do vazamento na tela do micro, o que não acontece nos outros programas, sendo necessário que o usuário leia os arquivos de dados para saber a posição do vazamento.

Os programas foram escritos em linguagem de programação turbo C versão 2.0 e apresentam as seguintes etapas:

- Programas AQU12, AQUJ23, AQUJ24 e AQUJ34
 - 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 do estado estacionário em unidades de pressão;
 - 5) Filtragem dos dados do estado estacionário;

- 6) Impressão no vídeo, do perfil de pressão obtido para o estado estacionário;
- 7) Limpeza da tela;
- 8) Abertura da válvula solenóide, iniciando desta forma o estado transiente;
- 9) Leitura do estado transiente;
- 10) Conversão dos dados do estado transiente em unidade de pressão;
- 11) Filtragem dos dados do estado transiente;
- 12) Impressão no vídeo do perfil de pressão obtido para o estado transiente;
- 13) Fechamento da válvula solenóide;
- 14) Escolha de uma entre as três opções: início do processo, arquivo de resultados e retorno ao programa de aquisição de dados.

Os programas AQU12, AQUJ23, AQUJ24 e AQUJ34 têm como diferença básica a utilização de diferentes portas do multiplexador para a aquisição de dados.

Nos programas de aquisição de dados, a numeração 1, 2, 3 e 4 referem-se as portas 3, 2, 1 e 0 do multiplexador, ou seja, o programa AQU12 acessa as portas 3 e 2 e recebem os sinais transmitidos pelos transdutores de pressão 1 e 2. O mesmo raciocínio é estendido aos outros programas (ver posição dos transdutores na tabela 3.1).

• Programas LOCAL3-0 e LOCAL4-0.C.

- 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) Quando do surgimento de um vazamento na tubulação, o programa interrompe a aquisição de dados;
- 6) Cálculo da posição do vazamento através da subrotina LOCAL, identificando entre quais transdutores e a que distância dos mesmos encontra-se o vazamento;
- 7) Impressão na tela da posição em que apareceu o vazamento.

Nos programas LOCAL3-0.C e LOCAL4-0.C, os quatro transdutores são utilizados, o que aumenta o intervalo de tempo entre duas leituras de um mesmo transdutor. Os programas, identificam 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. Tais tarefas, são realizadas nas subrotinas leitural 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. Fluxogramas representativos dos programas de aquisição de dados são mostrados a seguir (a listagem dos programas são apresentadas no Apêndice A).

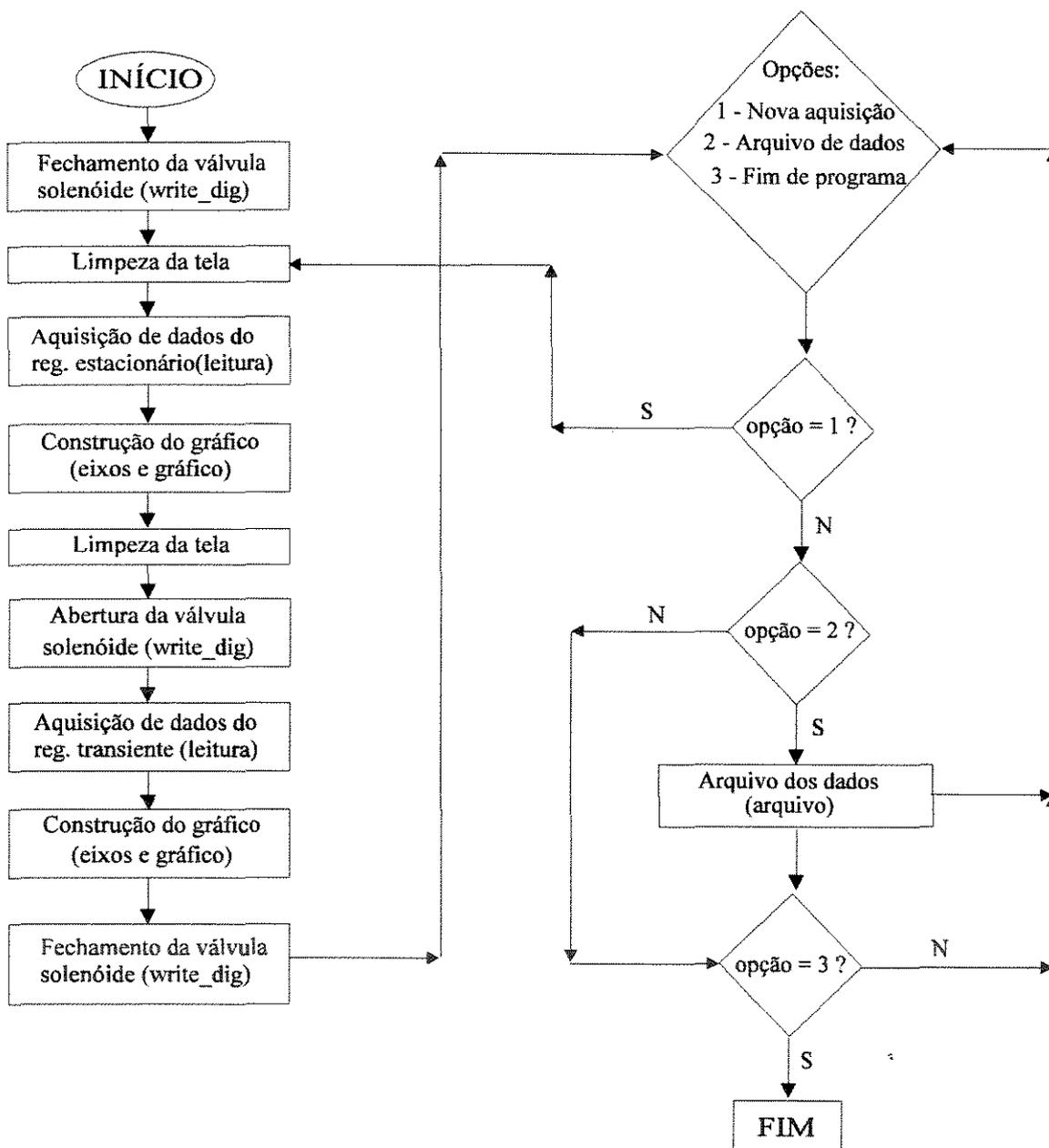


Figura 4.1: Fluxograma do programa principal de AQU12, AQUJ23, AQUJ24 e AQUJ34.C. As subrotinas utilizadas são citadas entre parênteses.

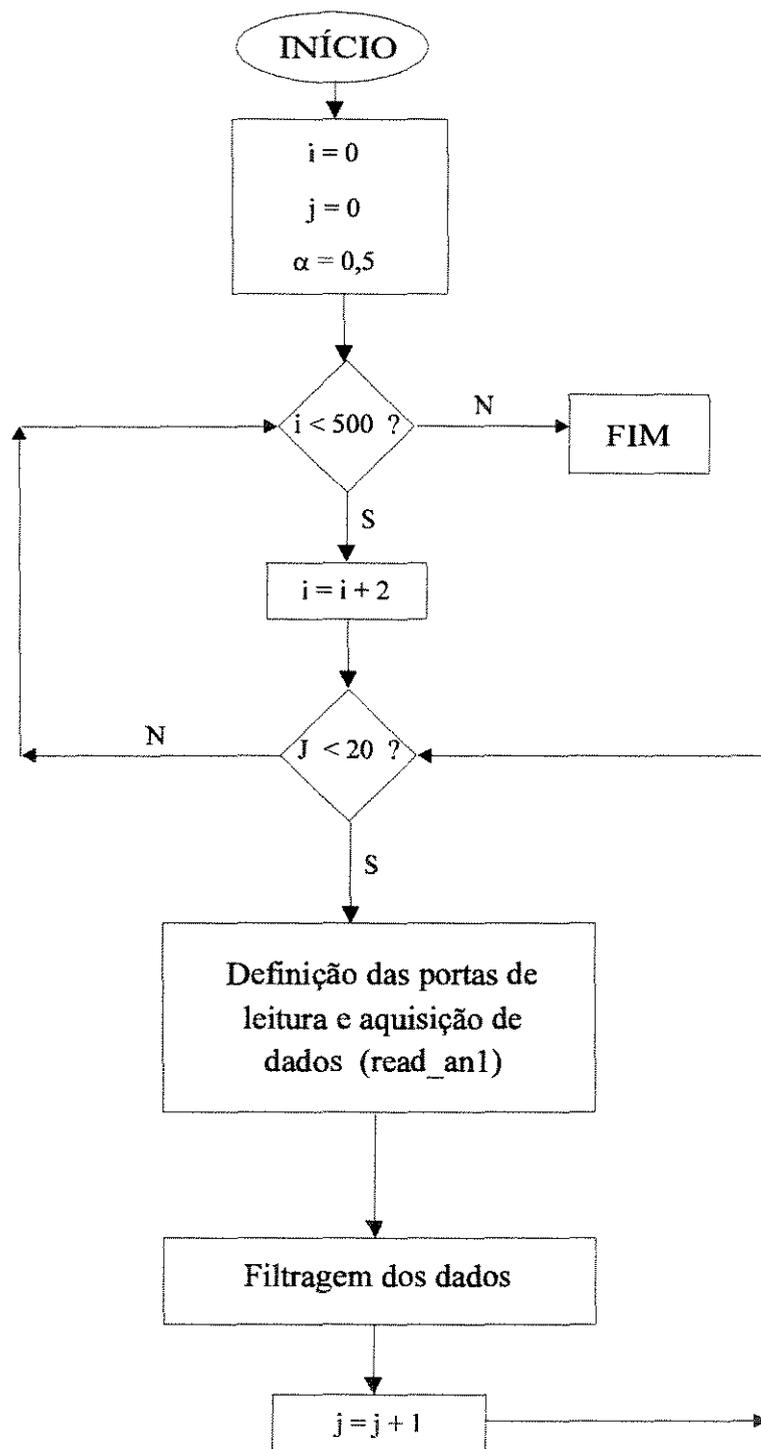


Figura 4.2: Fluxograma representativo da subrotina leitura dos programas AQU12, AQUJ23, AQUJ24 e AQUJ34.C. Os nomes entre parênteses indicam as subrotinas utilizadas na realização das tarefas.

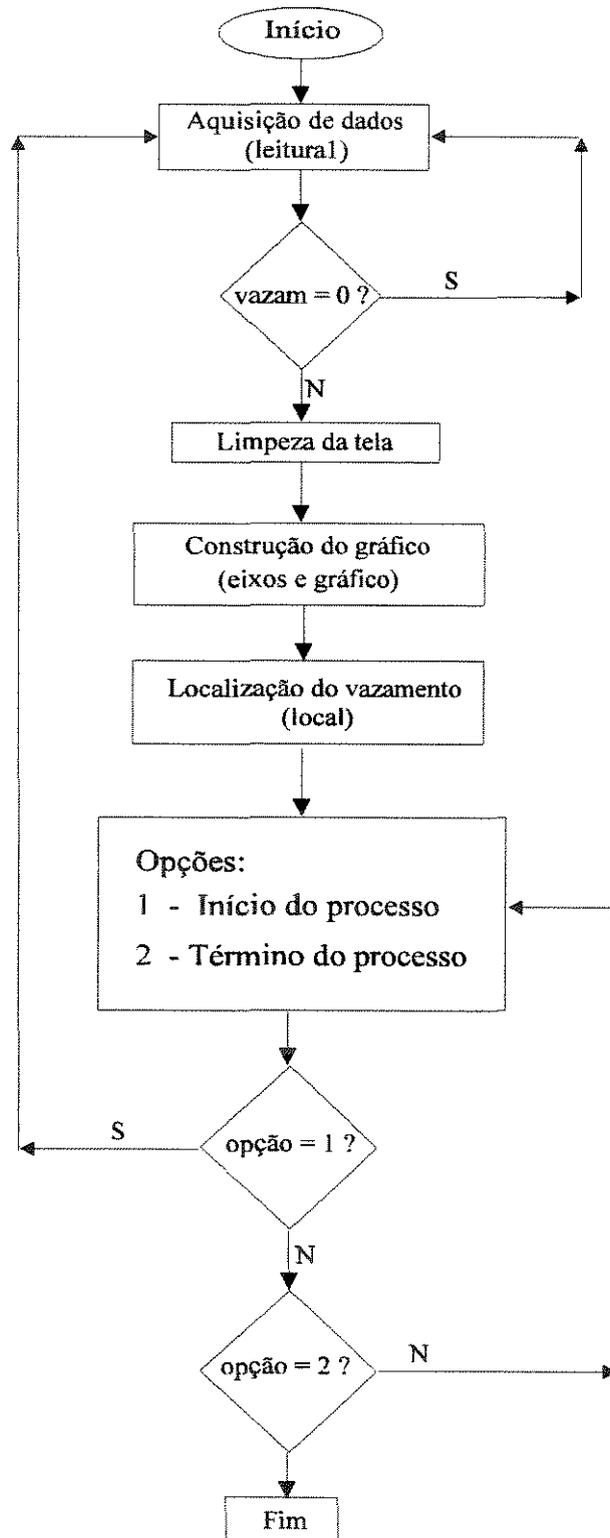


Figura 4.3: Fluxograma representativo do programa principal de LOCAL3-0.C e LOCAL4-0.C. Os nomes entre parênteses indicam as subrotinas utilizadas na realização das tarefas.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos através dos programas de aquisição de dados em tempo real (AQU12.C, AQUJ23.C, AQUJ24.C e AQUJ34.C) para as várias configurações da montagem experimental. Analisou-se as variáveis que afetam diretamente o fenômeno do vazamento, tais como: 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 dos vazamentos obtidos pelos programas de identificação e localização de vazamentos (LOCAL3-0.C e LOCAL4-0.C).

O objetivo da análise dos resultados obtidos, é procurar esclarecer a influência dos vários parâmetros hidráulicos sobre o estado transiente ocasionado por um vazamento, a fim de buscar uma solução para os problemas de detecção e localização do vazamento em uma tubulação.

5.2 - 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 encontram-se na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Condições de operação da montagem experimental.

Parâmetro Hidráulico	Valor mínimo	Valor máximo
Pressão no transdutor 4 (psig)	2,0	15,0
Número de Reynolds	2000	12000
Ordem de grandeza do vazamento (%)	9,0	100,0

5.3 - Procedimento experimental para operação do equipamento

Com os programas de aquisição de dados (AQU12.C, AQUJ23.C, AQUJ24.C e AQUJ34.C), obteve-se os perfis transientes de pressão a partir do instante em que a válvula solenóide é aberta.

A sistemática experimental utilizada para a aquisição de dados pode ser descrita pelos seguintes passos:

- 1) Fixar uma vazão do fluido, ou número de Reynolds, 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, realizada 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 regulação da abertura da válvula gaveta acoplada à válvula solenóide na posição em que se estima o vazamento. A

medição da vazão através das válvulas é feita no início de cada experimento, utilizando-se tanque e cronômetro;

- 4) Regime transiente. O programa de aquisição de dados, envia um sinal à válvula solenóide para que esta possa ser aberta. Tal sinal é emitido ao apertar-se qualquer tecla 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, obtidos por programas de aquisição de dados de pressão x tempo;
- 6) Arquivo dos dados obtidos;
- 7) Variação da vazão do vazamento;
- 8) Repete-se os passos 3 a 7 até atingir vazamentos de até 90% 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.

Após esses experimentos, o conjunto válvula solenóide-válvula gaveta é transferido para outra saída lateral, e os passos destacados anteriormente na realização dos experimentos são repetidos.

Neste trabalho foram estudadas duas posições de vazamento diferentes, com a onda de pressão sendo detectada pelos quatro(4) transdutores disponíveis, sendo que um deles foi mudado de posição, totalizando assim seis(6) configurações diferentes. A tabela 5.2 fornece as distâncias do vazamento aos transdutores para as seis(6) configurações.

Tabela 5.2 : 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	—	243	742	—
2	—	243	—	992
3	—	—	742	992
4	-742	-256	—	—
5	—	—	243	492

Tabela 5.2.1 : Tabela com configuração adicional.

Configuração	Distância vazamento-transd. 2 (m)	Distância vazamento-transd. 5 (m)	Distância vazamento-transd. 3 (m)	Distância vazamento-transd. 4 (m)
6	243	492	742	992

Na tabela 5.2, os números negativos significam que os transdutores estão a jusante do vazamento. Foi testada, ainda, uma configuração diferente das demais (tabela 5.2.1), na qual todos os transdutores estão a jusante do vazamento. Esta configuração teve como objetivo, descobrir a distância máxima que um transdutor pode estar do vazamento para que possa “sentir” a onda de pressão. Na nova configuração o transdutor 1 foi mudado de posição, encontrando-se agora entre os transdutores 2 e 3, sendo denominado de transdutor 5.

Os testes foram mais intensos para as três primeiras configurações, pois, para as mesmas os

transdutores se encontram a uma posição mais afastada do vazamento (ver tabela 5.2 e 5.2.1).

5.4 - Resultados experimentais

5.4.1 - Transiente hidráulico

As figuras a seguir mostram os perfis de pressão gerados pelo vazamento, e que foram obtidos pelos programas de aquisição de dados. Tais 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 5.1. Para a primeira, segunda e terceira configuração estudada, obteve-se perfis de pressão para vazamentos de até 100% da vazão de escoamento da água anterior ao aparecimento do vazamento, provando que o método utilizado apresenta bons resultados para vazamentos de grandeza variadas.

Para todas as configurações, estudou-se vazamentos de pequena magnitude, pois o maior interesse deste trabalho é identificá-los e localizá-los por menores que sejam.

Através dos perfis de pressão aqui apresentados, observa-se que vazamentos da ordem de 9% a 100% da vazão inicial de escoamento de água são identificados.

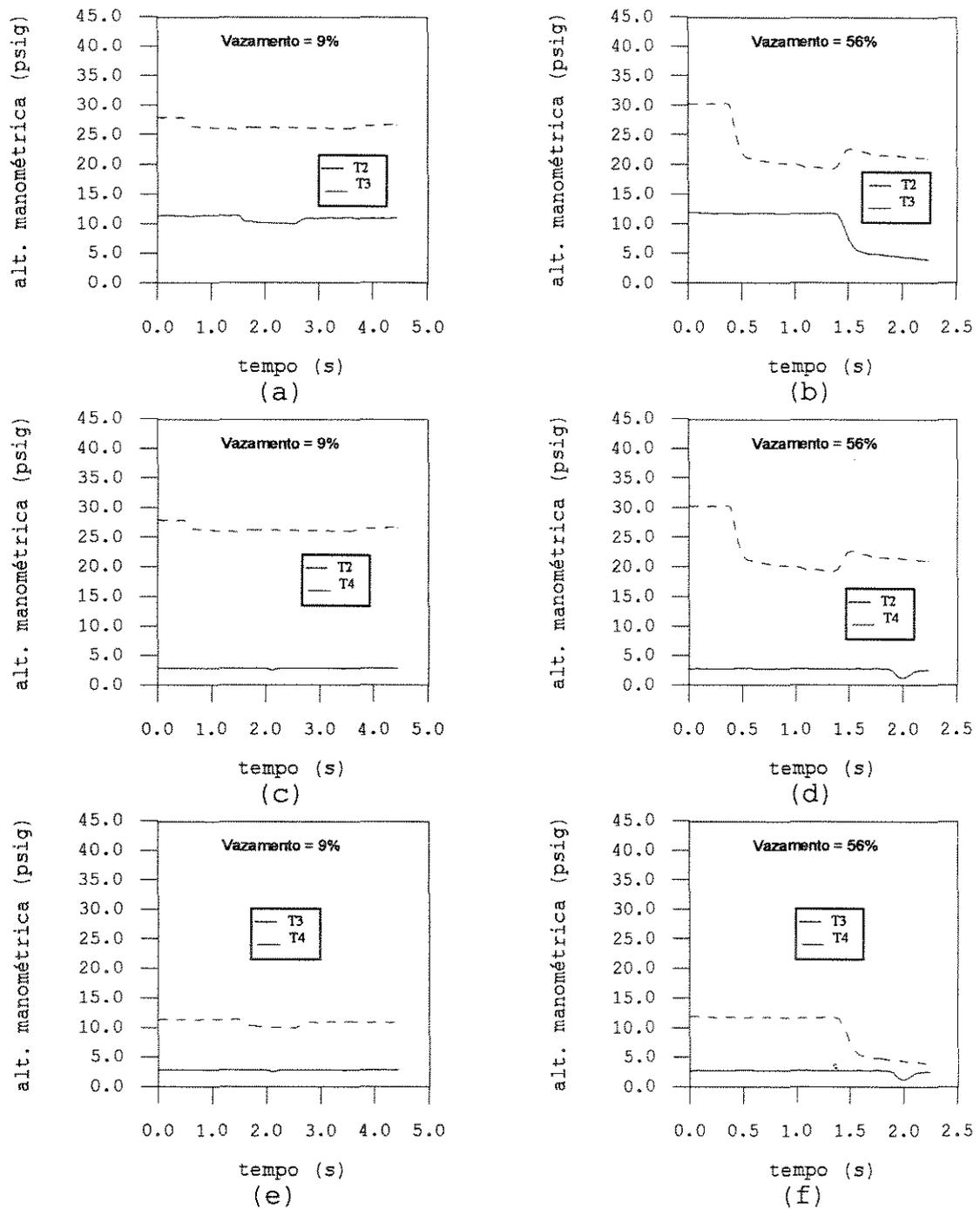


Figura 5.1.1 - Comparação entre os transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 12000 e configuração 1(a) e (b), configuração 2(c) e (d) e configuração 3(e) e (f).

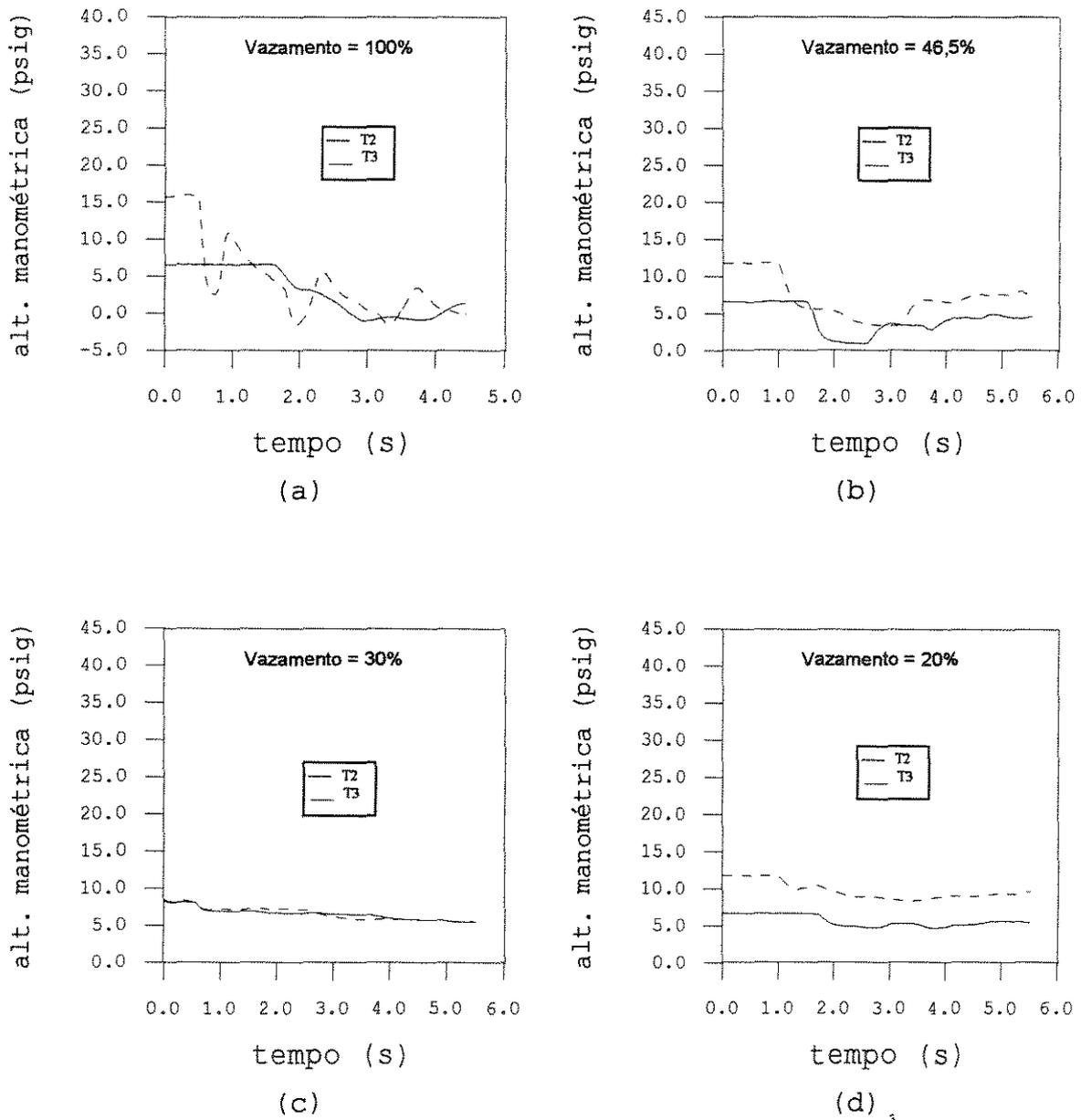


Figura 5.1.2 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 8000 e configuração 1.

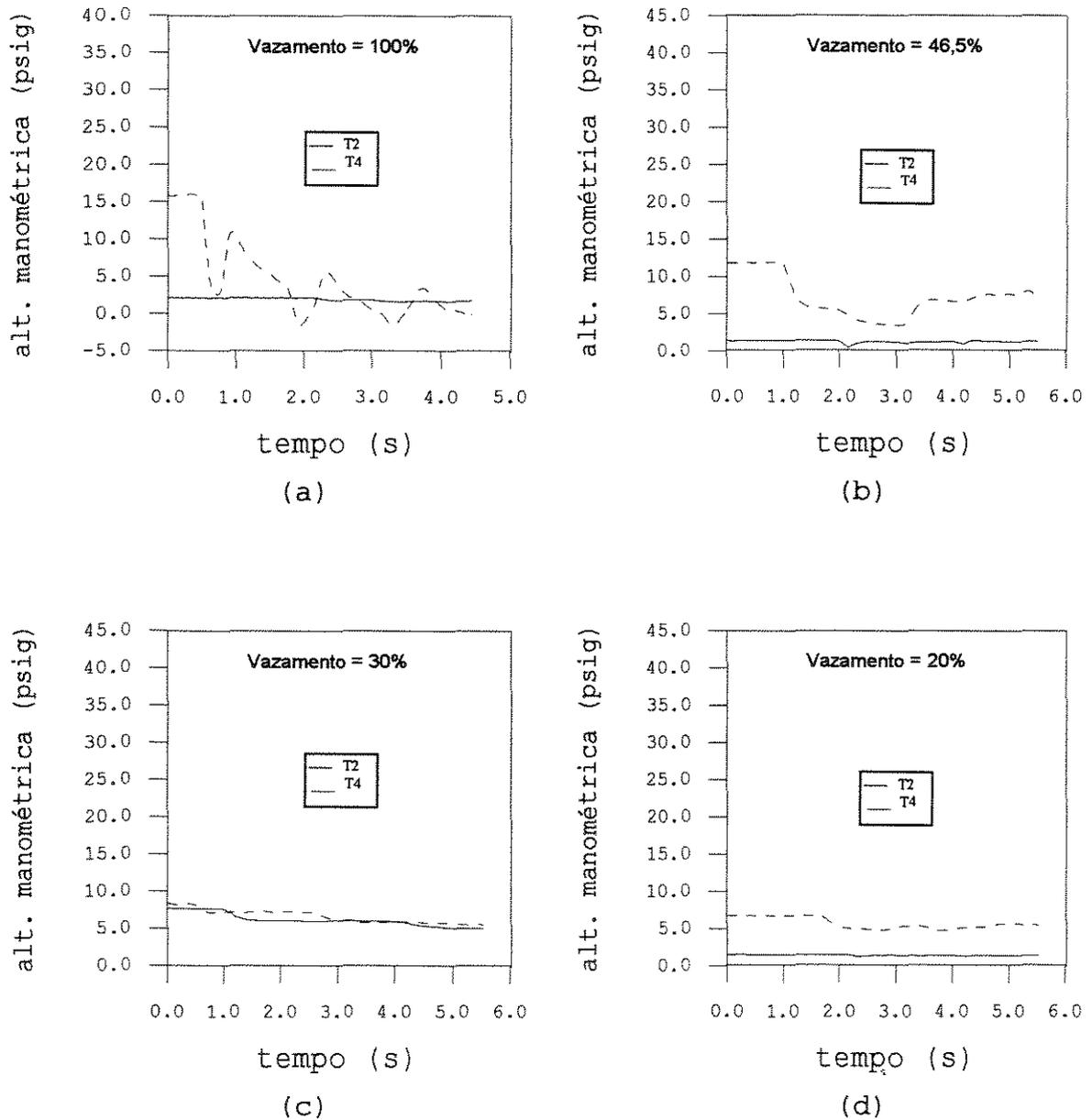


Figura 5.1.3 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 8000 e configuração 2.

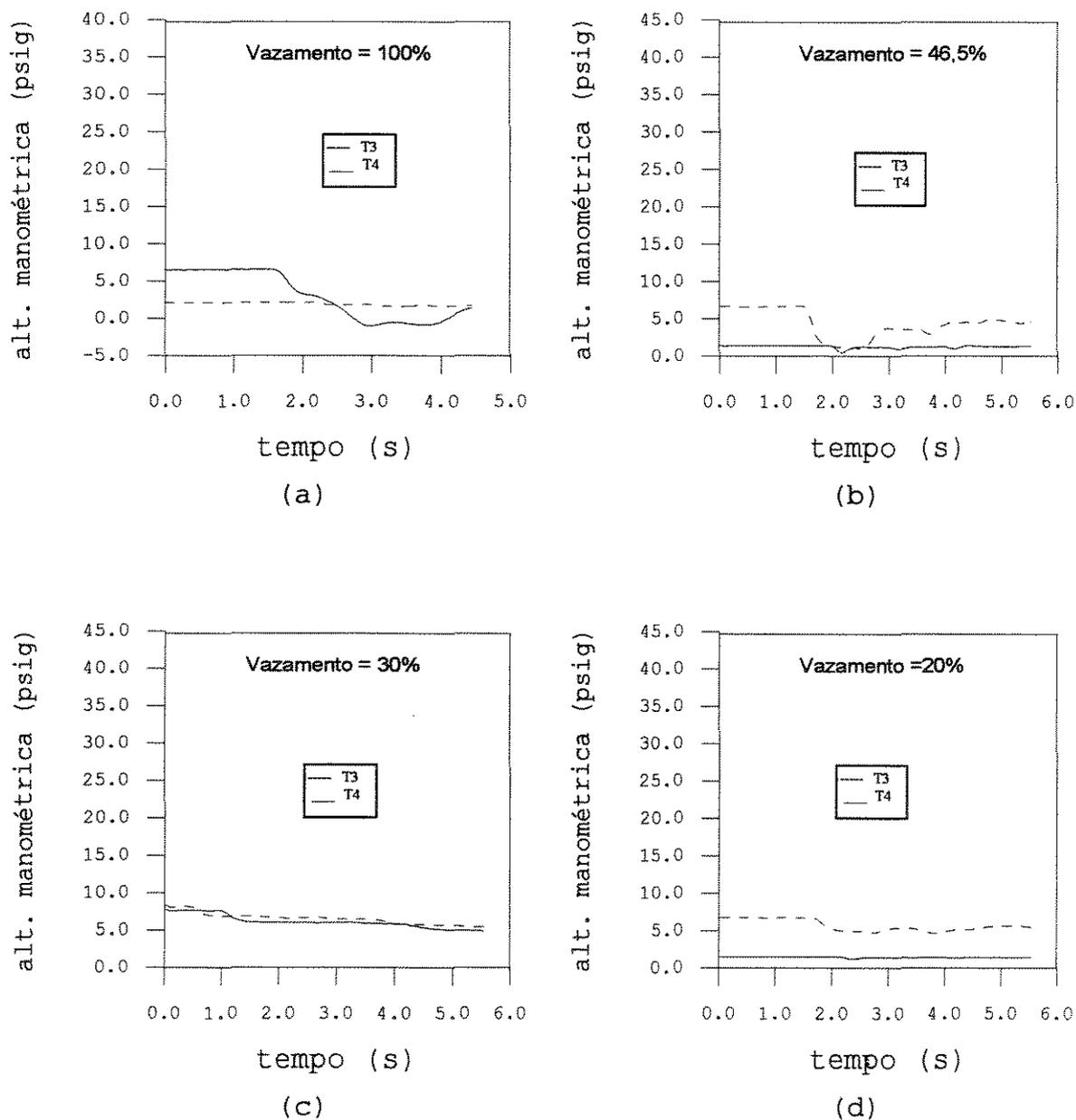


Figura 5.1.4 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 8000 e configuração3.

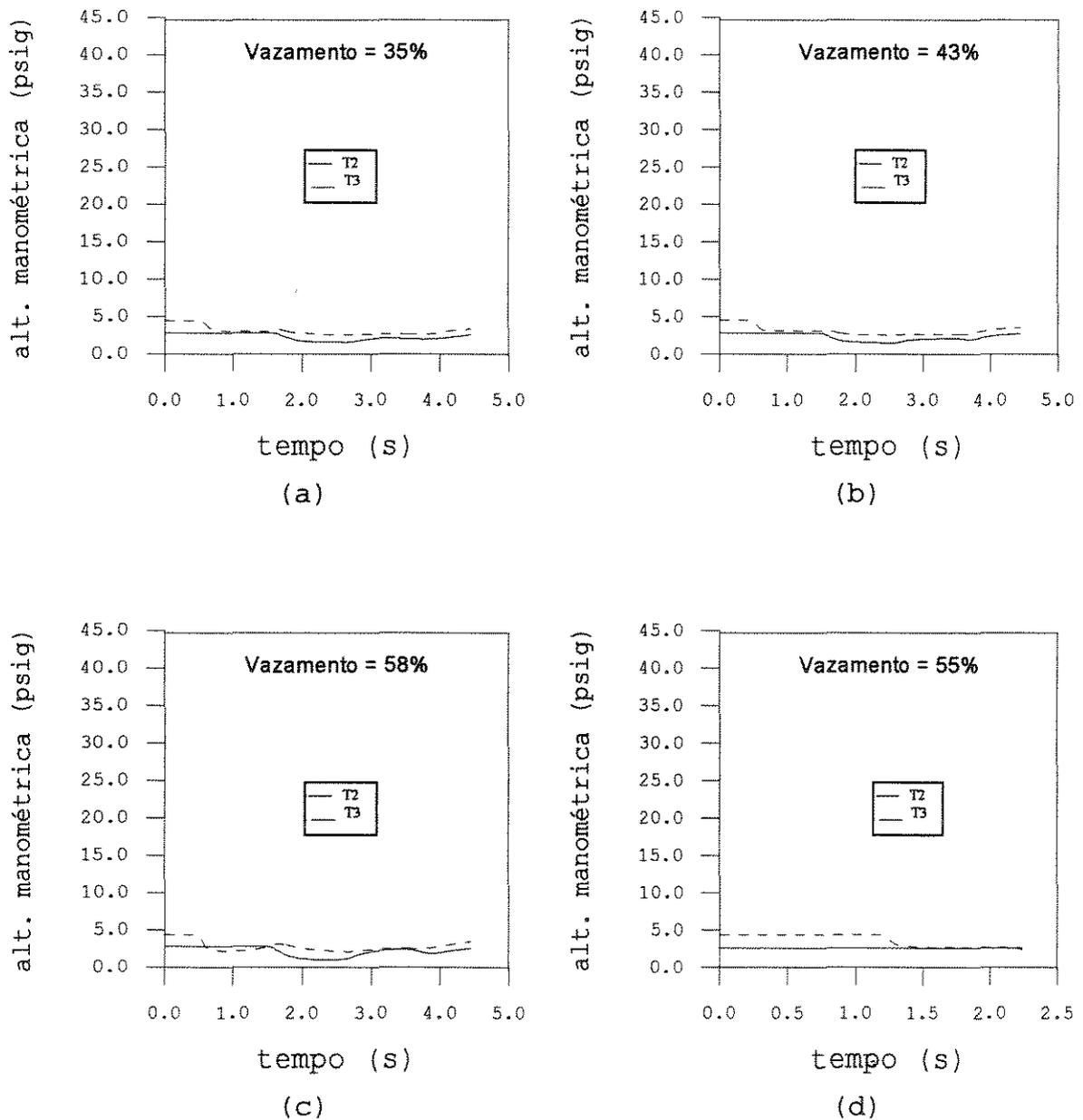


Figura 5.1.5 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 2000 e configuração1.

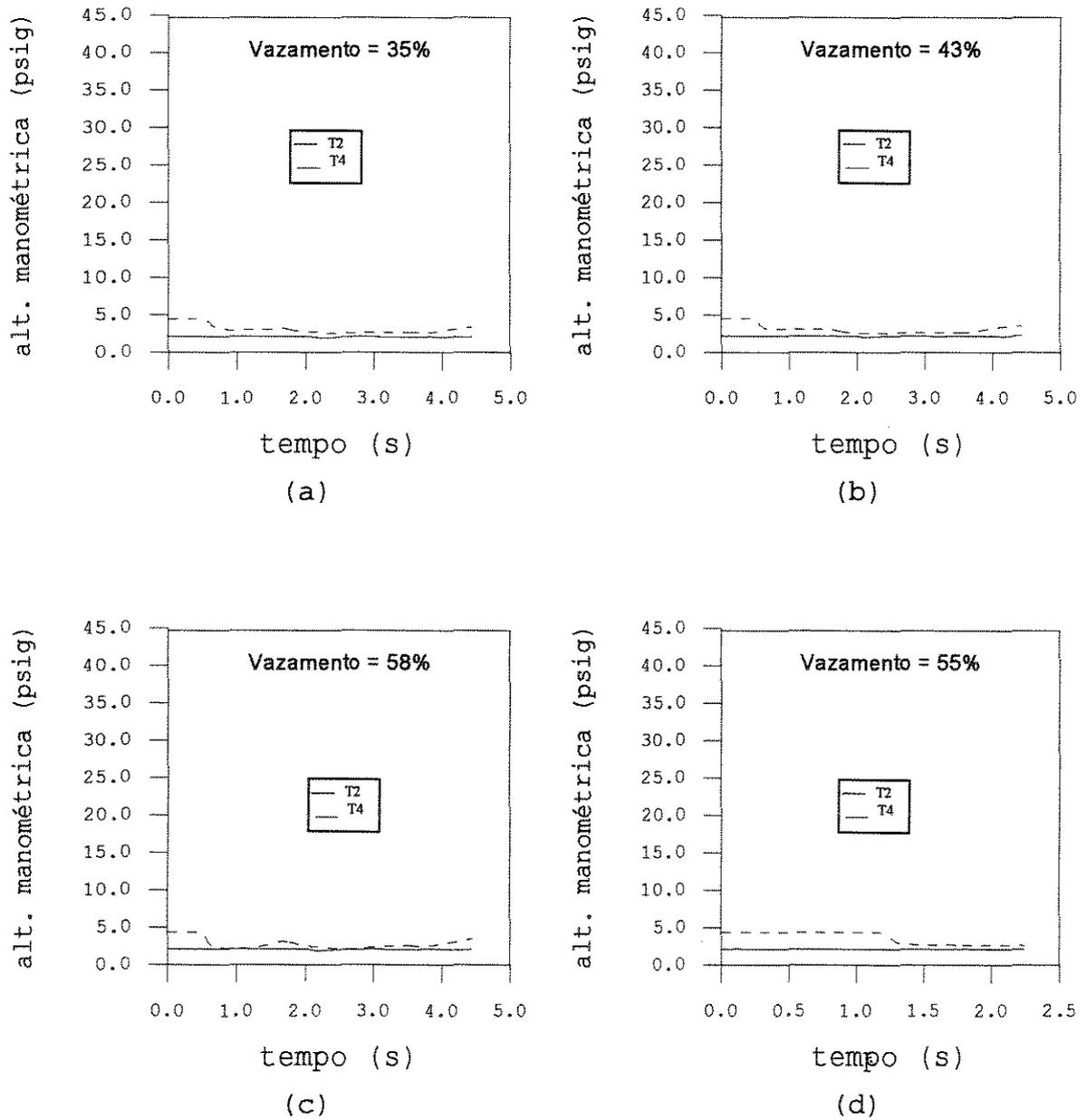


Figura 5.1.6 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 2000 e configuração 2.

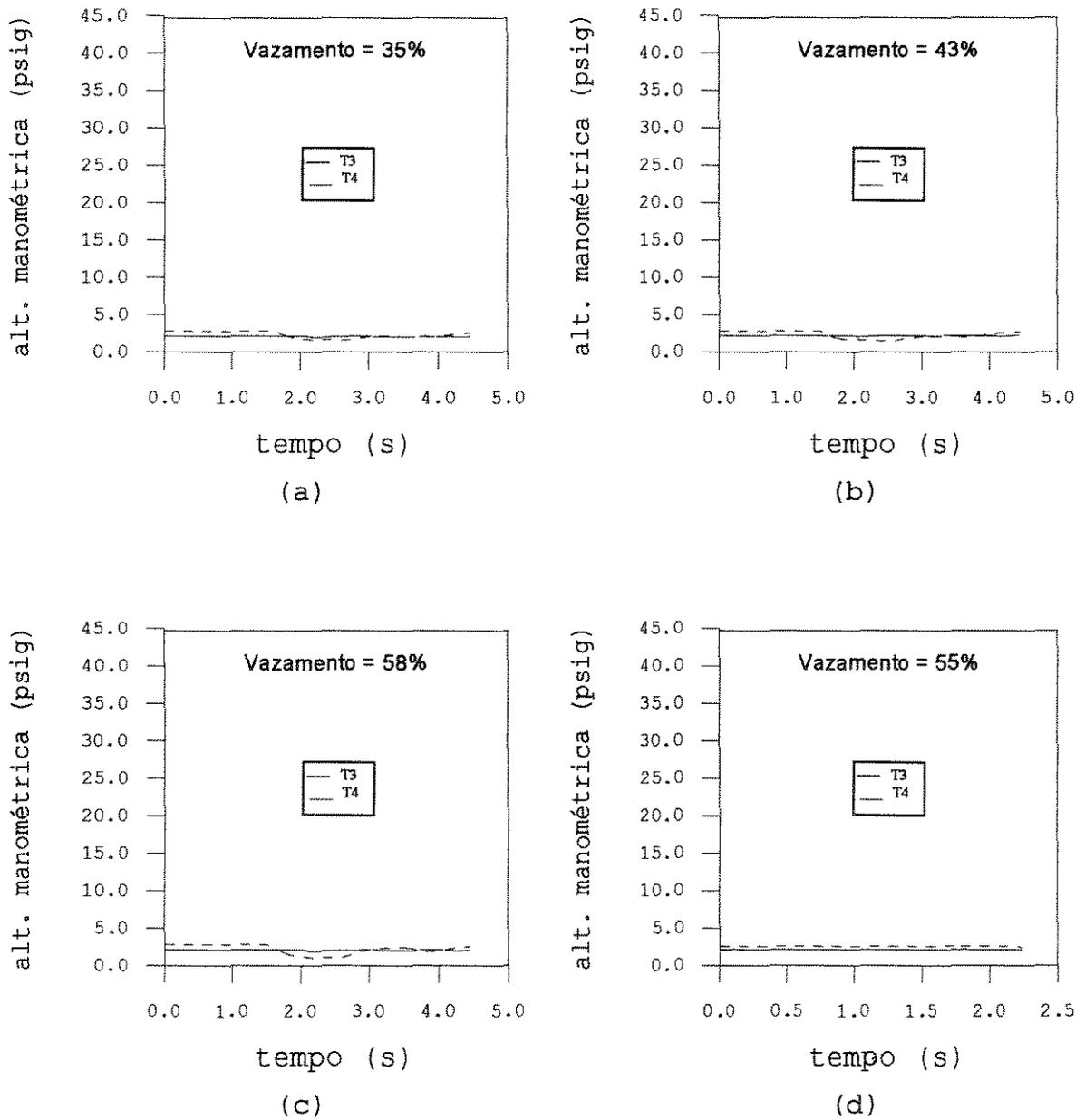


Figura 5.1.7 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 2000 e configuração 3.

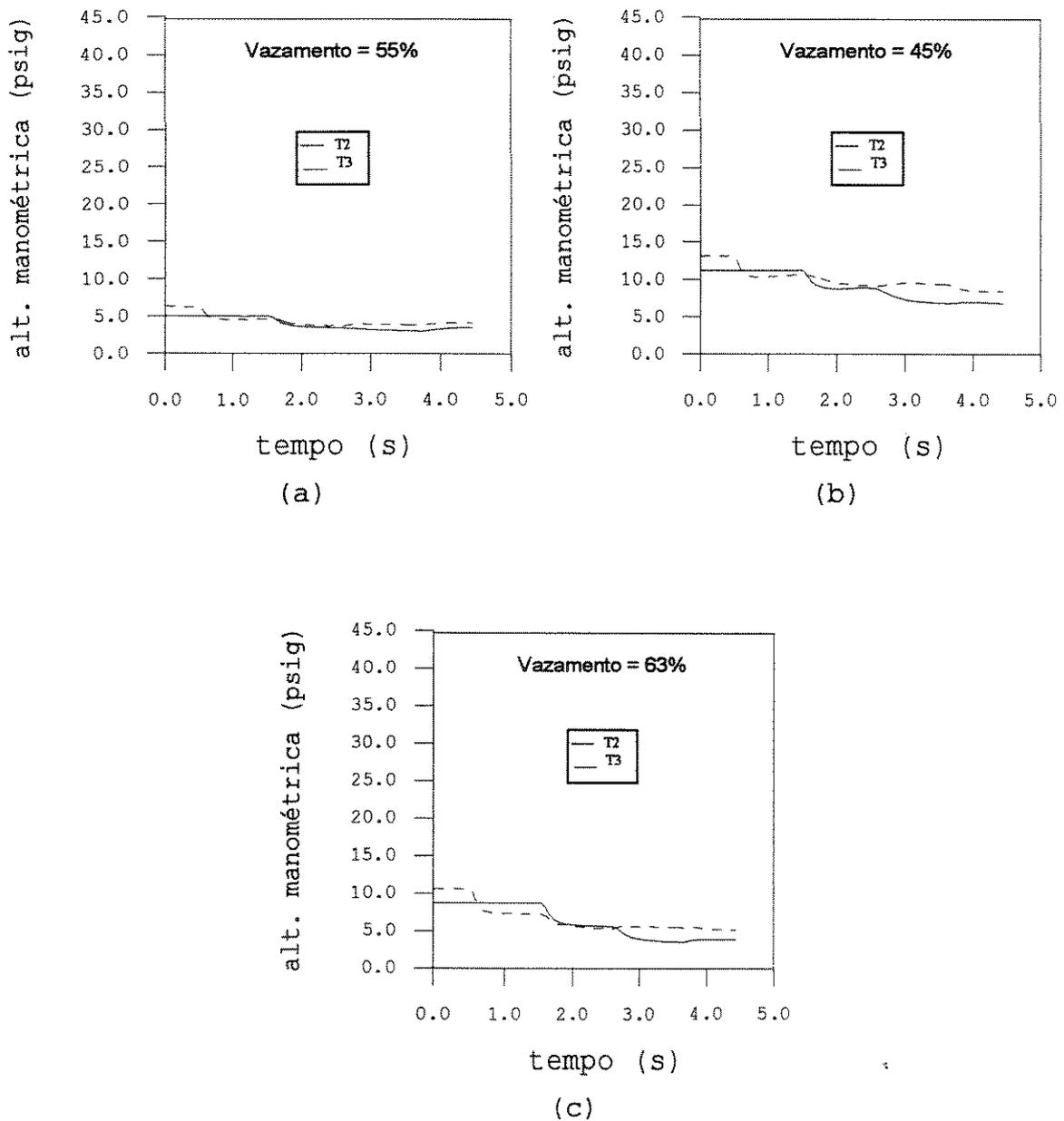


Figura 5.1.8 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 2000 e configuração 1 (linha pressurizada).

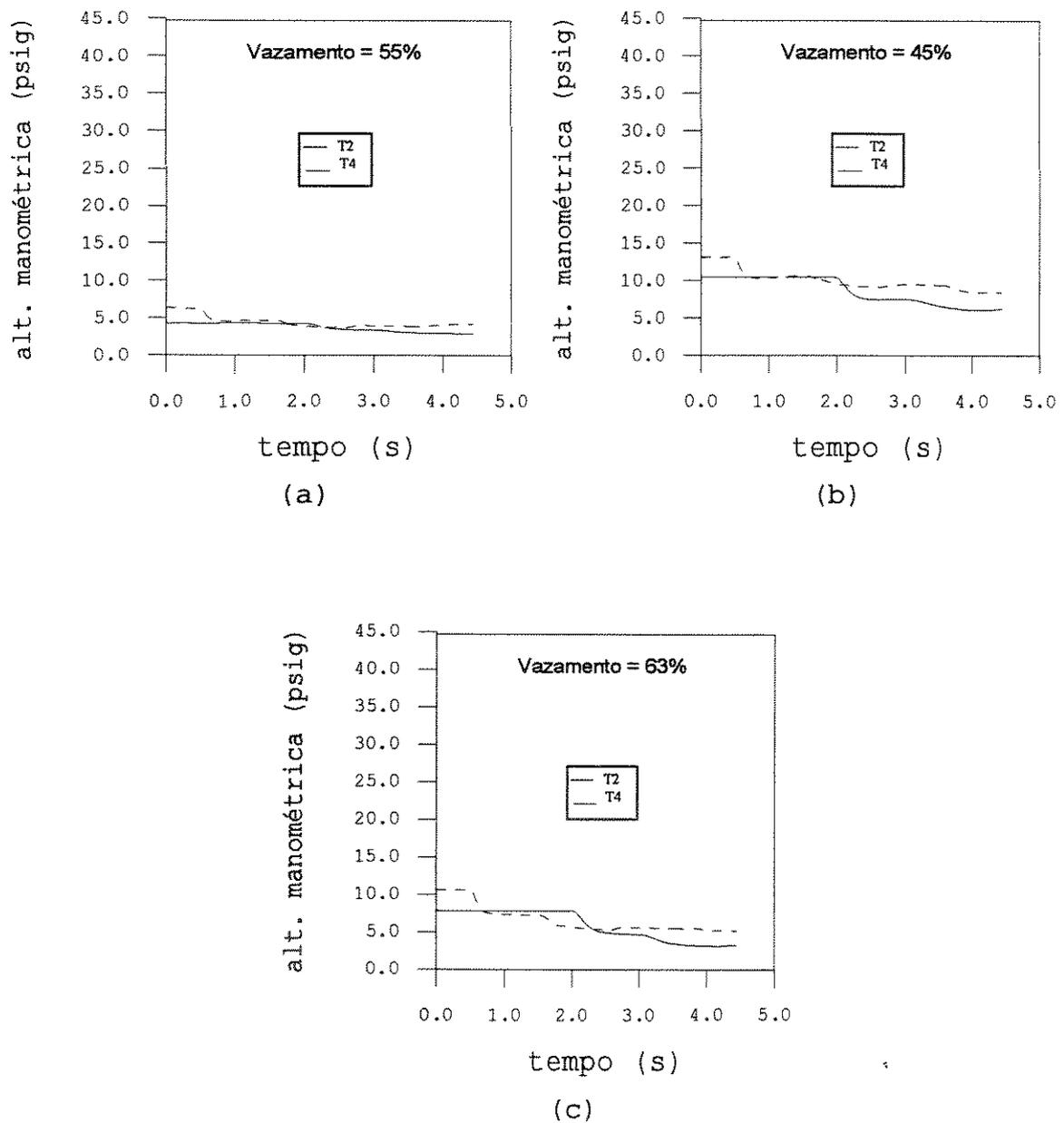


Figura 5.1.9 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 2000 e configuração 2 (linha pressurizada).

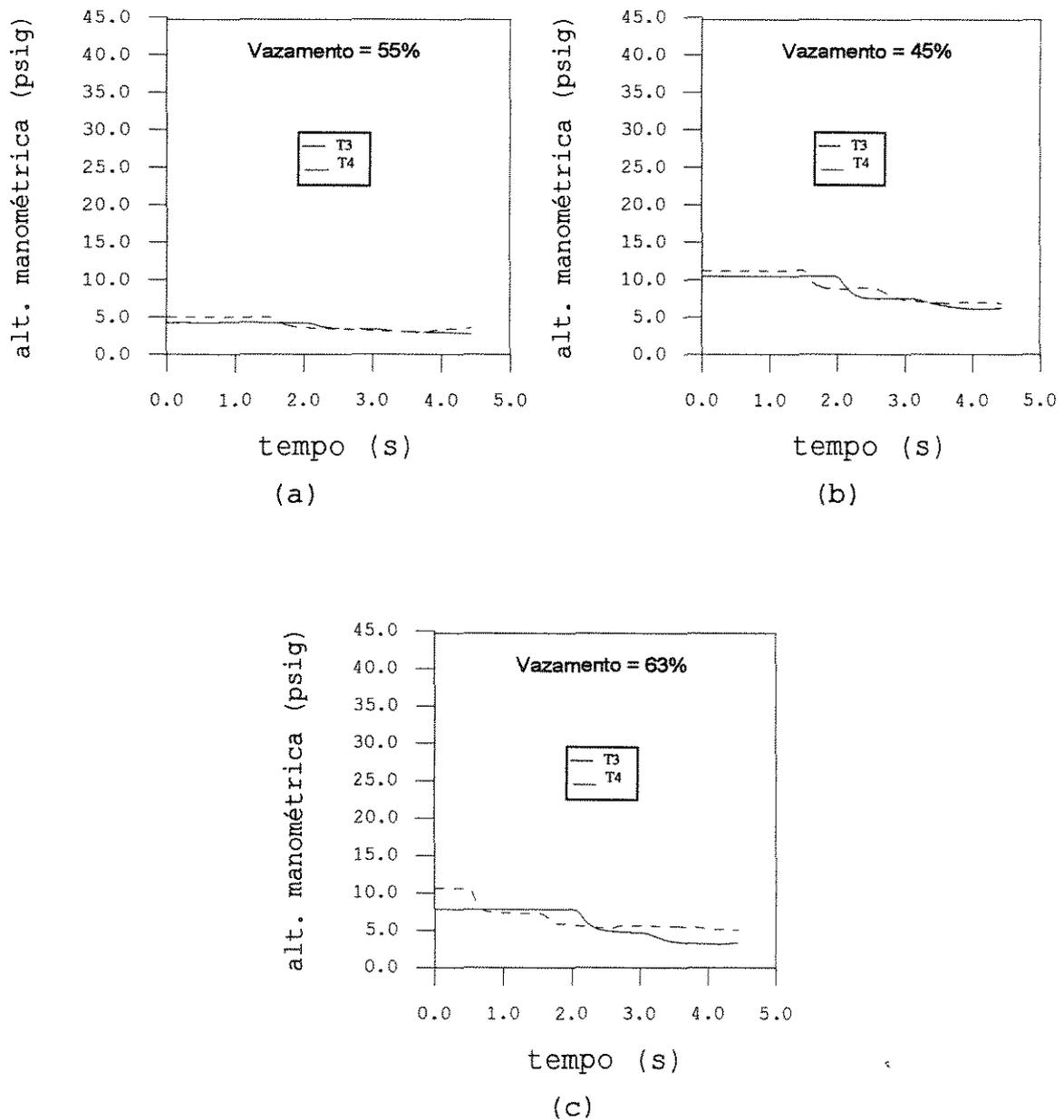


Figura 5.1.10 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 2000 e configuração 3 (linha pressurizada).

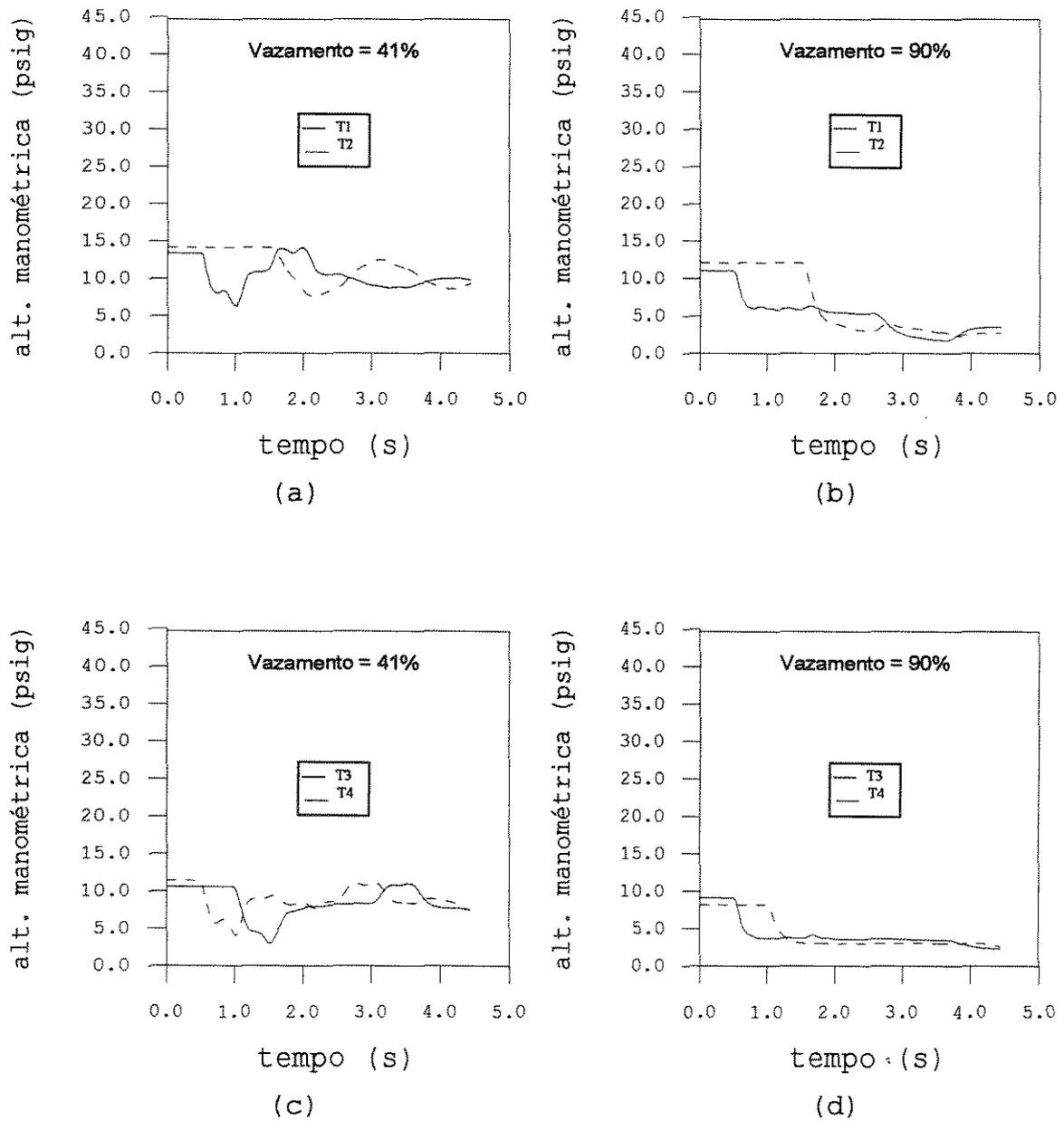


Figura 5.1.11 - Comparação entre os transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 2000 e configuração 4(a) e (b) e configuração 5(c) e (d) (linha pressurizada).

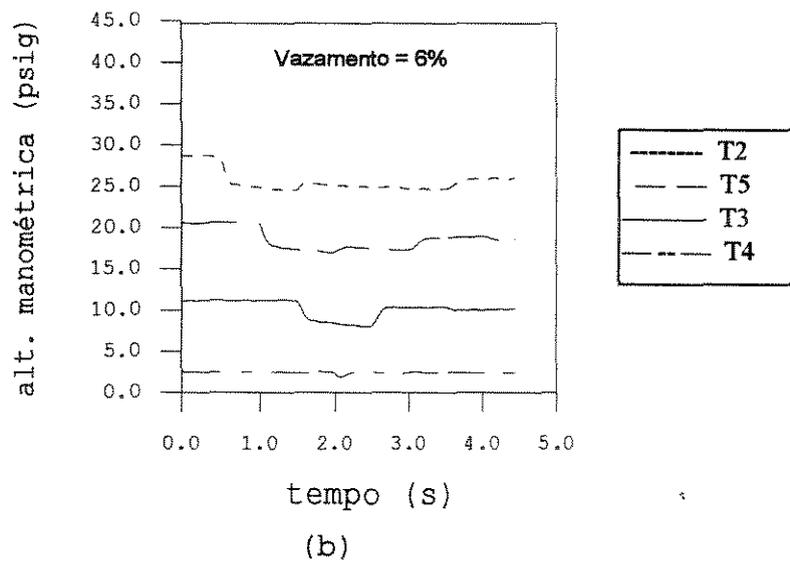
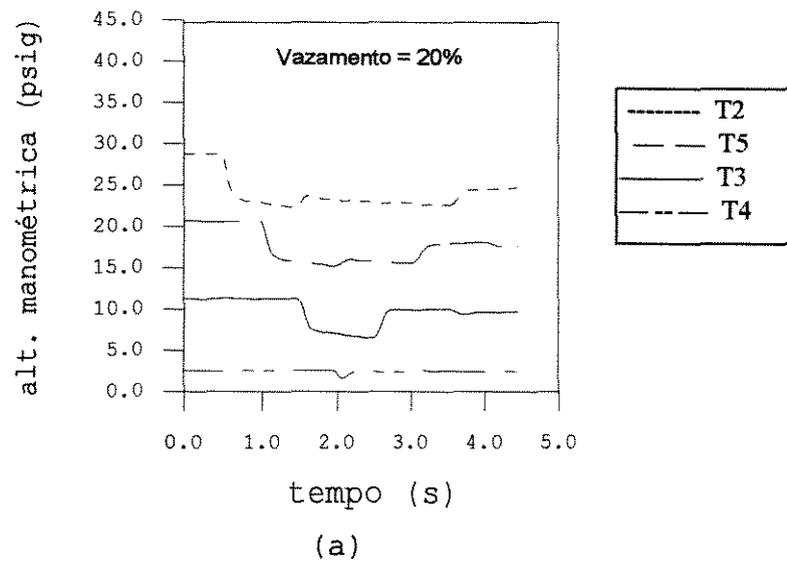


Figura 5.1.12 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 12000 e configuração 6

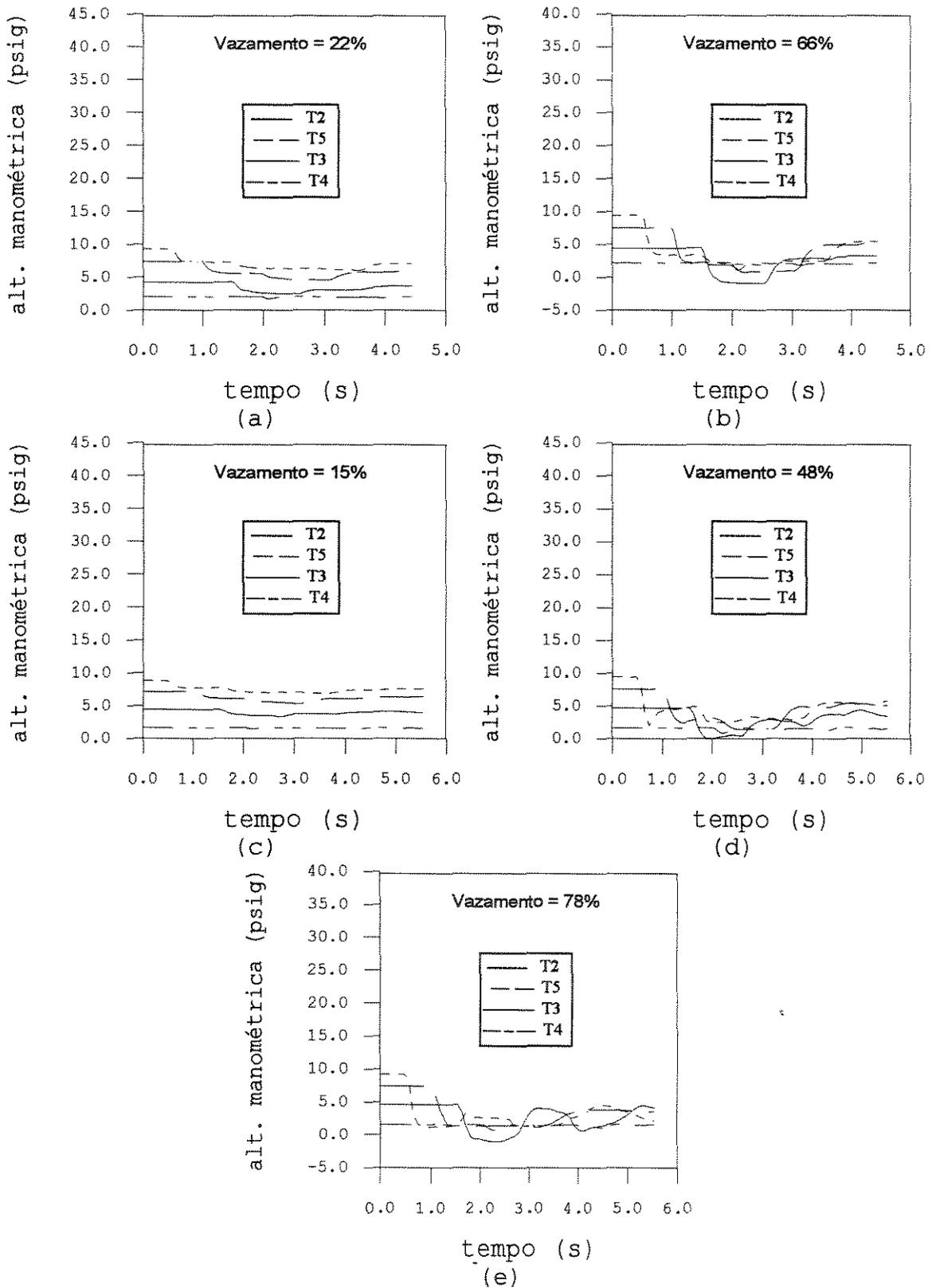
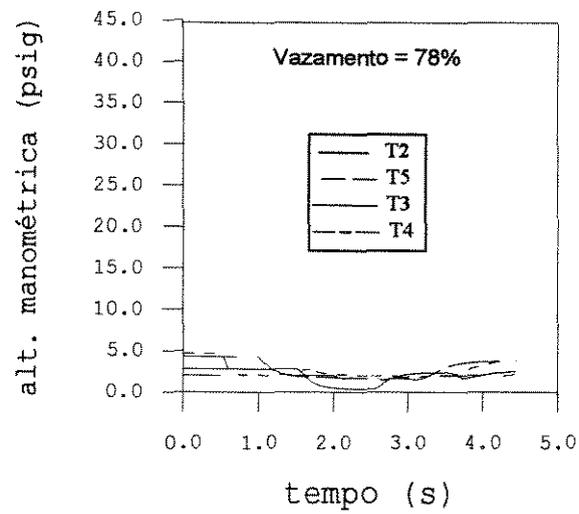
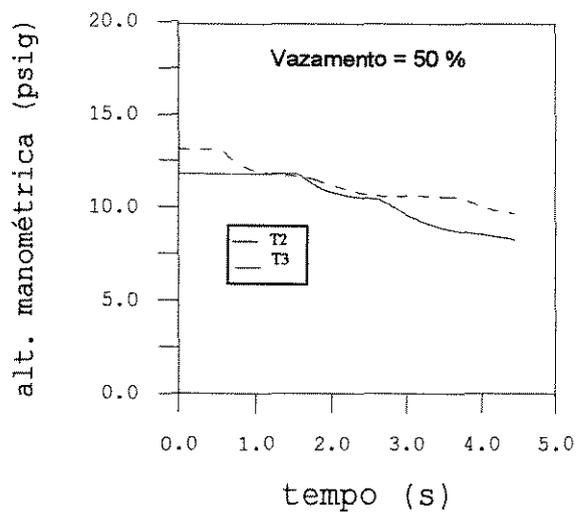


Figura 5.1.13 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 5000 e configuração 6

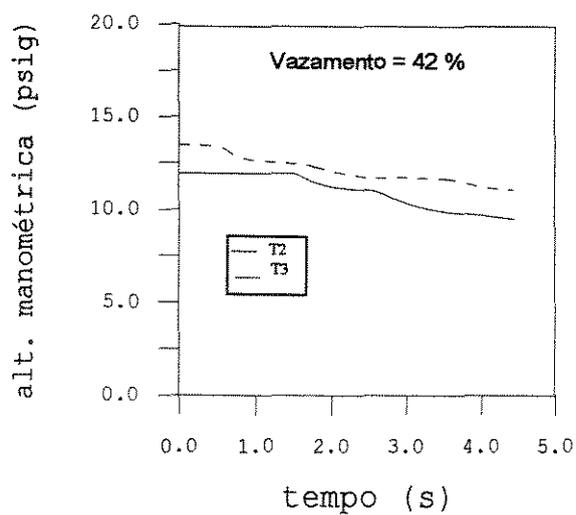


(a)

Figura 5.1.14 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 2000 e configuração 6

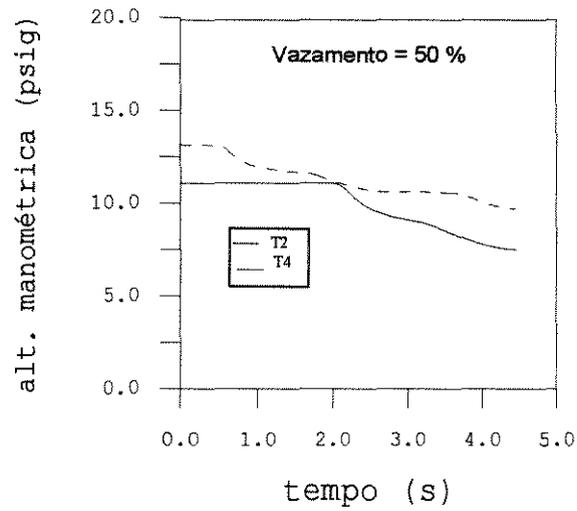


(a)

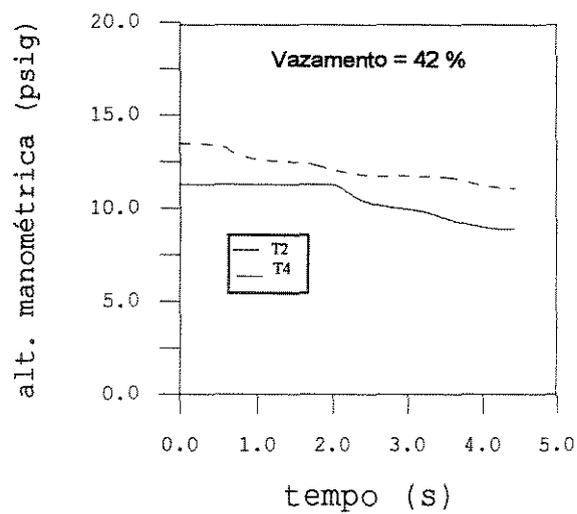


(b)

Figura 5.1.15 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 1000 e configuração 1 (tubulação pressurizada).

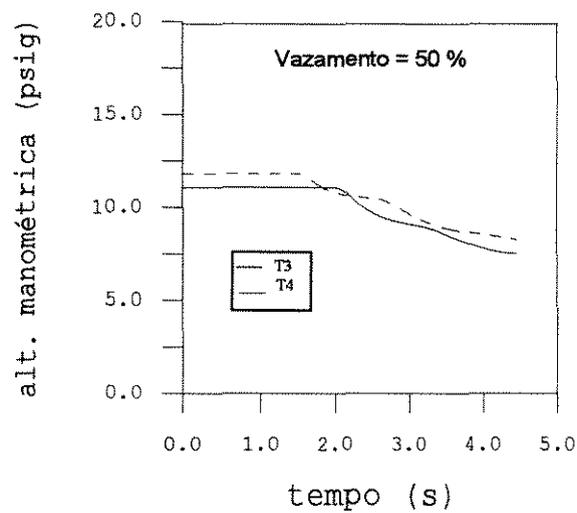


(a)

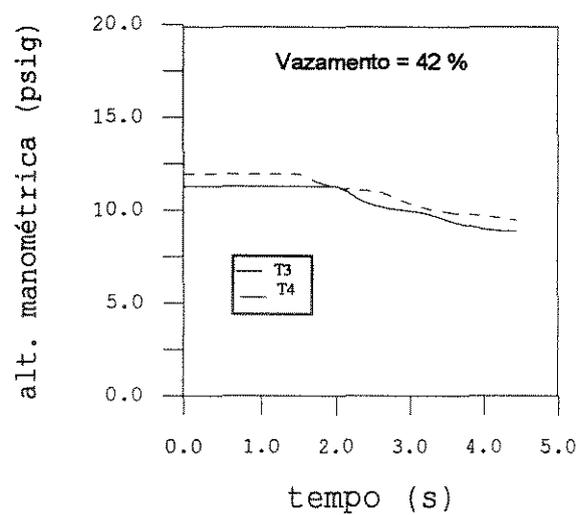


(b)

Figura 5.1.16 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 1000 e configuração 2 (tubulação pressurizada).

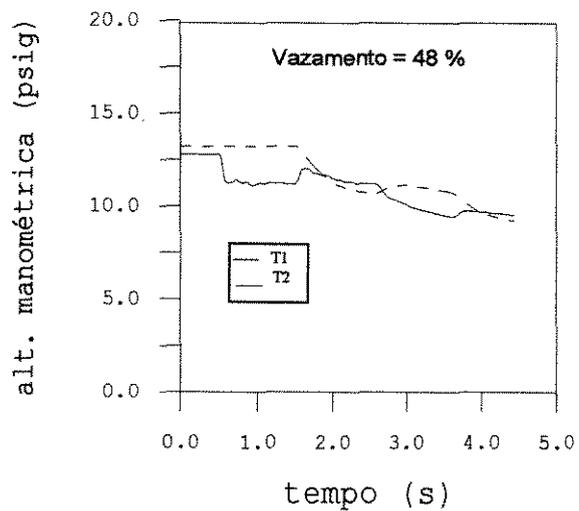


(a)

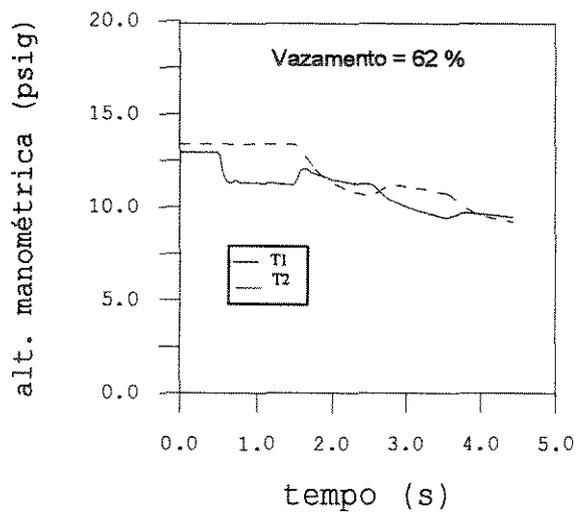


(b)

Figura 5.1.17 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 1000 e configuração 3 (tubulação pressurizada).



(a)



(b)

Figura 5.1.18 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 1000 e configuração 4 (tubulação pressurizada).

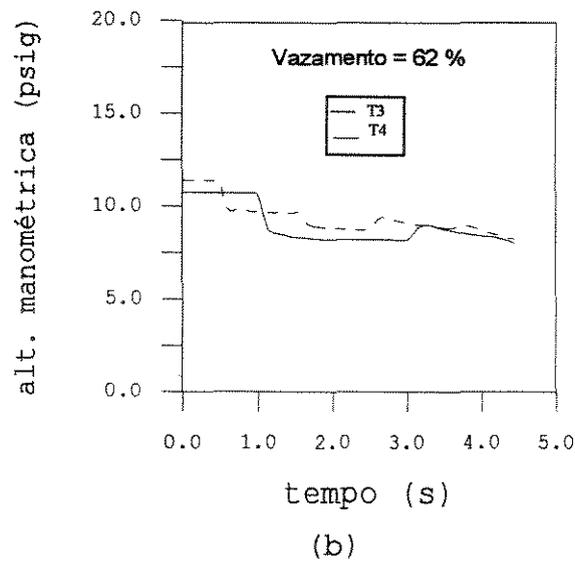
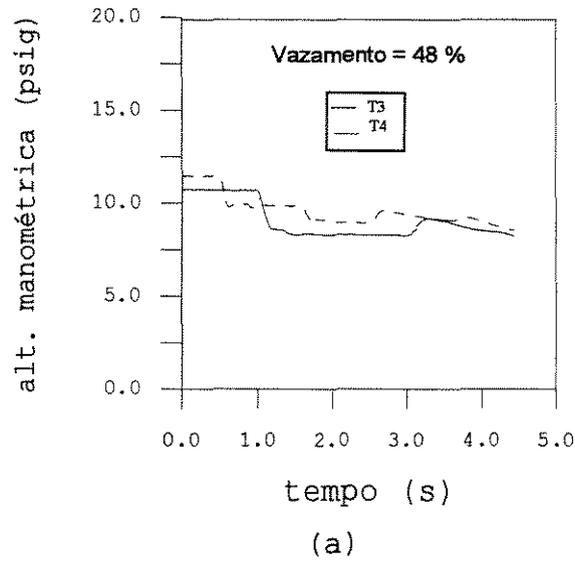


Figura 5.1.19 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para Reynolds 1000 e configuração 5 (tubulação pressurizada).

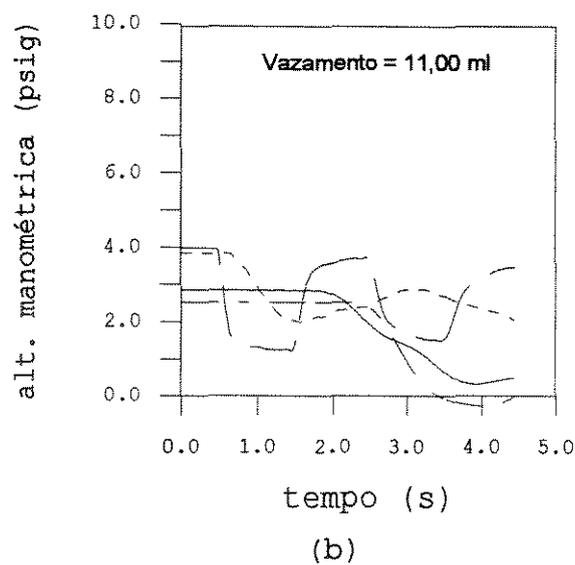
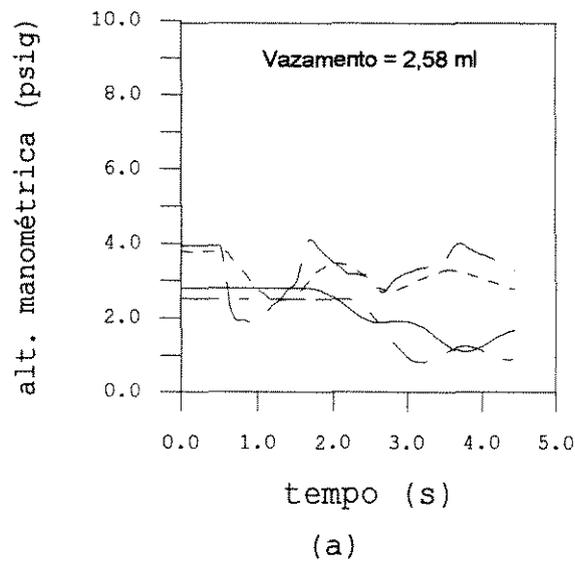


Figura 5.1.20 - Transientes hidráulicos obtidos experimentalmente para tubulações com fluxo estacionário.

5.5 - 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 deste 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.

5.5.1 - Queda de pressão na tubulação

Quando do surgimento de um vazamento em uma tubulação qualquer, a pressão no interior da mesma decresce de um certo valor, ΔP_1 . Com a perda de energia provocada pelo atrito entre a onda de pressão e as paredes do tubo, o transiente hidráulico logo se dissipa e 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 5.1.i. Para alguns experimentos a queda de pressão é bem suave. Este fato ocorre devido à presença de ar em excesso no interior da tubulação, o qual adentrava quando a válvula solenóide era aberta.

As figuras 5.2.12 a 5.2.14 mostram ainda que para o transdutor mais afastado do vazamento - T4, localizado a 992 m do vazamento - a queda de pressão é quase imperceptível. Para vazamentos de pequena magnitude e estando a tubulação com ar, seria difícil localizar o vazamento utilizando este transdutor.

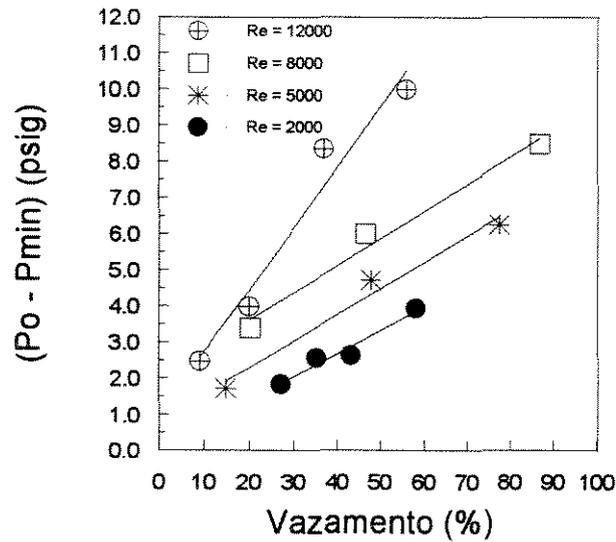


Figura 5.2.1 - Influência da magnitude do vazamento e da vazão de líquido sobre a queda de pressão máxima no interior da tubulação. Resultados obtidos para a configuração 5.

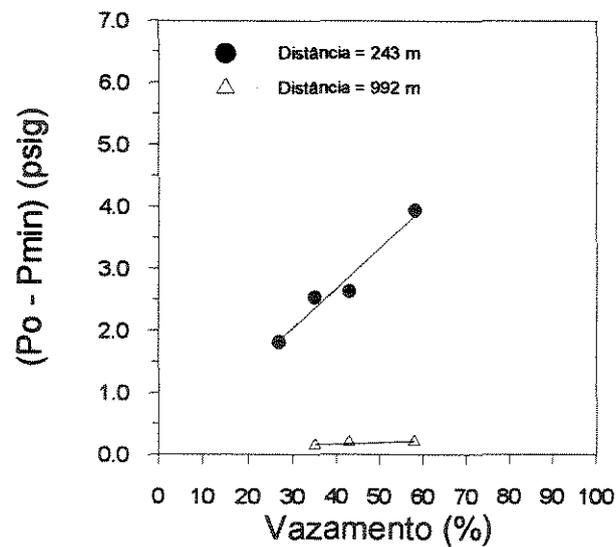


Figura 5.2.2 - Influência da distância transdutor-vazamento sobre a queda de pressão máxima no interior da tubulação. Resultados obtidos para Reynolds 2000.

As figuras 5.2.i mostram a influência da vazão do vazamento, do número de Reynolds e da distância do vazamento aos transdutores sobre o valor de ΔP_1 .

A figura 5.2.1 mostra que quanto maior o vazamento, maior a perda de carga máxima (ΔP_1). Este aumento na perda de carga ocorre porque o vazamento de líquido provoca uma diminuição na pressão no interior da tubulação. Observa-se também, que ΔP_1 varia 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.

A figura 5.2.1 mostra ainda que, ΔP_1 aumenta com o aumento da vazão de escoamento de líquido. Já na figura 5.2.2, pode-se ver que ΔP_1 é menor para os transdutores mais afastados do vazamento. Este fenômeno é devido 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.

5.5.2 - Vazamento mínimo detectado

O sistema de detecção de vazamento mostrou ser de boa qualidade, detectando facilmente vazamentos na faixa de 9 a 100% da vazão de escoamento de água.

5.5.3 - Velocidade de propagação do transiente hidráulico

O valor teórico da velocidade de propagação do transiente hidráulico é equivalente a:

$$(a=552,5 \text{ m/s}) [5]$$

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 e vazão do vazamento.

Tabela 5.3: Propriedades físicas da água e do PVC[2].

Características do tubo	Características da água
Módulo de elasticidade $E = 3,00 \times 10^9 \text{ Pa}$	Módulo de Elasticidade $K = 2,19 \times 10^9 \text{ Pa}$
Módulo de Poisson $\mu = 0,40$	Densidade da água $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$
Diâmetro interno do tubo $D = 1,481 \times 10^{-2} \text{ m}$	
Espessura do tubo $e = 0,44 \times 10^{-3} \text{ m}$	

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 5.3 mostra como esta velocidade pode ser calculada experimentalmente:

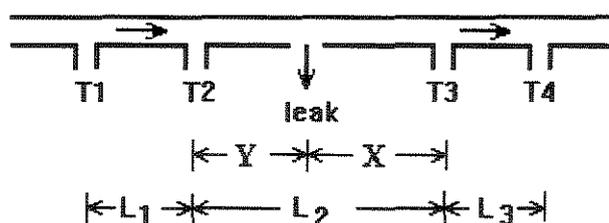


Figura 5.3 - Esquema utilizado para cálculo da velocidade experimental.

Atendendo à figura 5.3, em um instante t

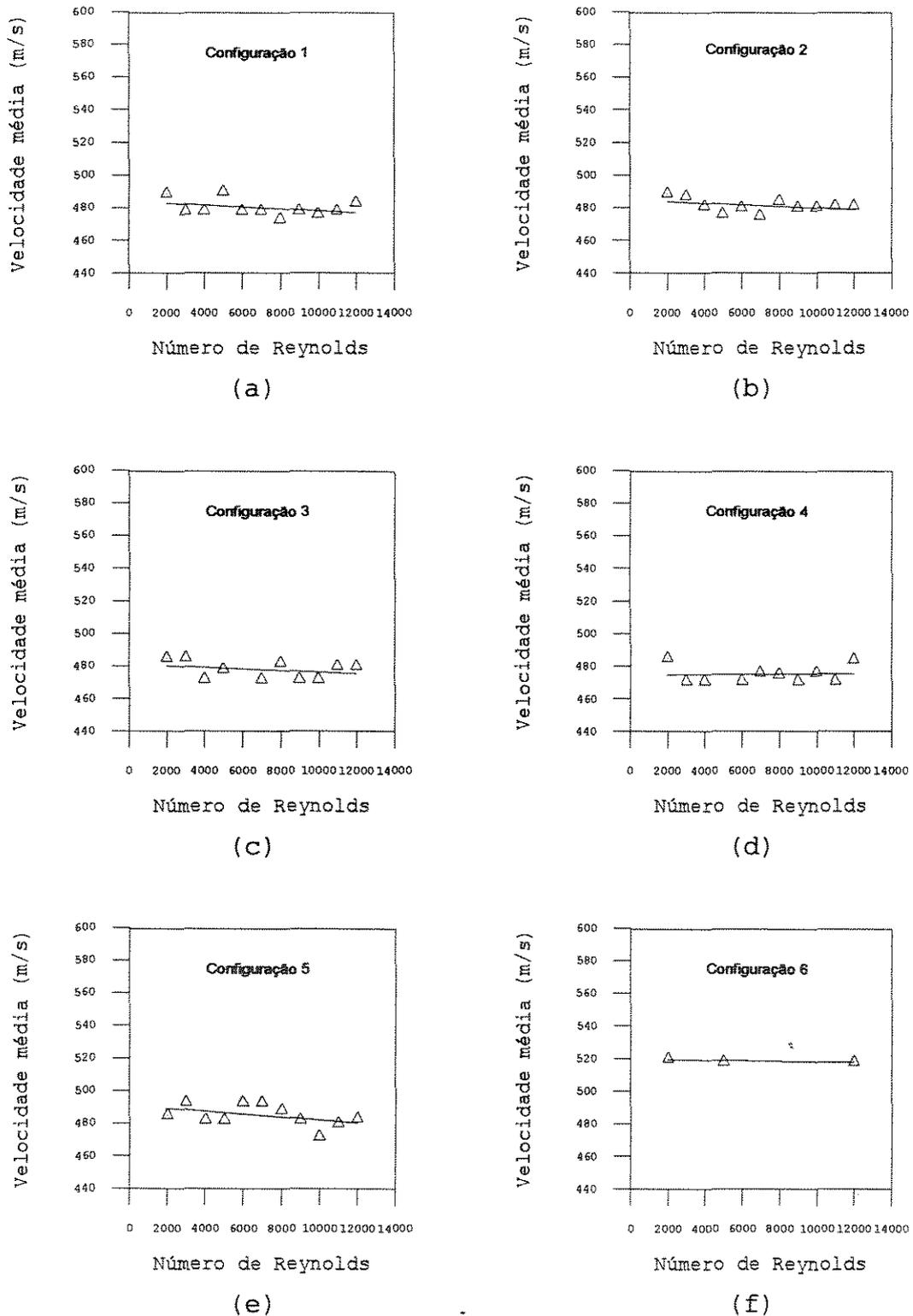


Figura 5.4 - Influência do número de Reynolds e da posição do vazamento sobre a velocidade do transiente hidráulico.

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 transdutores T3, T2, T4 e T1 nos instantes t_1 , t_2 , t_3 e t_4 , respectivamente.

Consideremos a onda de pressão que propaga-se a jusante do vazamento, ou seja, na direção dos transdutores 3 e 4, sendo a distância entre os transdutores L_3 . A onda de pressão demora um intervalo de tempo $(t_3 - t_1)$ para percorrer esta distância (ver figura 5.3). Deste modo, a velocidade experimental da onda é dada por:

$$V = \frac{L_3}{(t_3 - t_1)} \quad (5.1)$$

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

$$V = - \frac{L_1}{(t_4 - t_2)} \quad (5.2)$$

Na figura 5.4 está representado 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 no intervalo de 480 m/s a 520 m/s foram detectados. Esses valores são pouco menores do que o valor calculado da velocidade da onda no tubo: 552 m/s[5].

Os resultados obtidos a partir da figura 5.4 mostram ainda, que a velocidade do transiente hidráulico mantêm-se praticamente constante com o aumento do número de Reynolds. Isso ocorre pois o número de acidentes (cotovelos) entre os transdutores e o vazamento é pequeno. Wiggert,

Otwell e Hatfield [6] 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.

Podemos observar ainda, que para distâncias semelhantes (figuras 5.4.e e 5.4.f), existe uma diferença nos valores da velocidade de propagação da onda. Uma explicação para este comportamento pode ser o fato de que os experimentos foram realizados com configurações sob diferentes pressões. O experimento realizado com a configuração 6 está sob pressão (tubulação pressurizada).

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.

5.5.4 - Localização do vazamento

Para o presente trabalho, a localização do vazamento foi obtida de duas maneiras:

- Quando o microcomputador provoca o vazamento (programas AQU12.C, AQUJ23.C, AQUJ24.C e AQUJ34.C). Para este caso, o instante em que o vazamento surge é conhecido;
- Quando o vazamento é provocado por meios externos ao computador (programas LOCAL3-0.C e LOCAL4-0.C). 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:

5.5.4.1 - Vazamento provocado pelo micro-computador

Como já descrito na seção 4.6, através dos programas de aquisição de dados AQU12.C, AQUJ23.C, AQUJ24.C e AQUJ34.C, o micro-computador envia um sinal à válvula solenóide para que esta se abra iniciando o transiente hidráulico. O instante em que a válvula é aberta é $t_0 = 0$.

Tomando como exemplo a figura 5.3, calcula-se o intervalo de tempo gasto pela onda de pressão para alcançar o transdutor 4:

$$\Delta t_1 = t_3 - t_0 = t_3 \quad (5.3)$$

Considerando que a velocidade de propagação do transiente hidráulico obtida pela equação 5.1 é constante ao longo da tubulação, a distância entre a posição do vazamento e o transdutor 4 pode ser calculada como se segue:

$$d_1 = v \cdot \Delta t_1 \quad (5.4)$$

Comparando-se d_1 a L_3 sabemos com que precisão 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 5.5.5, encontram-se os experimentos realizados para determinação do atraso na abertura da válvula. Deste modo, pode se calcular o exato instante em que a onda de pressão alcança os transdutores, que é o valor arquivado menos o atraso da válvula.

A tabela 5.4 mostra a influência da vazão de escoamento da água e da posição do vazamento sobre o erro de localização do vazamento.

5.5.4.2 - Vazamento provocado em um instante qualquer

Com os programas LOCAL3-0.C e LOCAL4-0.C, o transiente hidráulico é provocado aleatoriamente, deste modo não é possível definir o instante em que o mesmo surgiu, tornando-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.

Tabela 5.4 - Precisão de localização do vazamento

Confi- guração	Número de Reynolds	Distância ao transdutor mais perto ± erro (m)
1	1000	243 ± 2,0
	2000	243 ± 5,0
	5000	243 ± 8,0
	7000	243 ± 3,0
	8000	243 ± 3,0
	12000	243 ± 1,0
3	1000	742 ± 4,0
	2000	742 ± 5,0
	5000	742 ± 8,0
	7000	742 ± 4,0
	8000	742 ± 5,0
	12000	742 ± 5,0

Do esquema mostrado na figura 5.3 podemos escrever as seguinte equações:

$$X + Y = L_2 \quad (5.5)$$

$$Y - X = v.(t_1 - t_2) \quad (5.6)$$

onde V é definida pela equação 5.1, se a localização é feita utilizando-se os transdutores a jusante do vazamento, ou equação 5.2, se são usados os transdutores a montante.

Tabela 5.5: Resultados obtidos para vazamento localizado a 249 metros da entrada da tubulação (243m do transdutor 2).

Experimento	Posição do vazamento (m)	Erro de localização (m)
01	250,0	7,0
02	246,0	3,0
03	251,0	8,0
04	246,0	3,0
05	246,0	3,0
06	240,0	3,0
07	251,0	8,0
08	246,0	3,0
09	242,0	1,0
10	242,0	1,0
11	242,0	1,0
12	246,0	3,0
13	242,0	1,0
14	251,0	8,0
15	244,0	1,0
16	248,0	5,0
17	251,0	8,0
Valor médio	246,0	4,0

Tem-se então, um sistema de 3 equações (5.1, 5.5 e 5.6) e 3 incógnitas (V, X e Y). A resolução deste sistema fornece a localização do vazamento.

Os programas LOCAL3-0.C e LOCAL4-0.C foram desenvolvidos para obtenção da localização de um vazamento quando este é provocado aleatoriamente. A listagem dos programas para localização de um vazamento, quando o mesmo ocorre aleatoriamente, encontra-se no apêndice B. As tabelas 5.5 e 5.6 trazem os resultados de velocidade de propagação do transiente e localização do vazamento obtidos através dos programas LOCAL3-0.C e LOCAL4-0.C.

Tabela 5.6: Resultados obtidos para vazamento localizado a 748 metros da entrada da tubulação (243m do transdutor 3).

Experimento	Posição do vazamento (m)	Erro de localização (m)
01	246,0	3,0
02	248,0	5,0
03	248,0	5,0
04	248,0	5,0
05	248,0	5,0
06	244,0	1,0
Valor médio	247,0	4,0

Os resultados apresentados nas tabelas foram realizados mantendo-se constante a vazão de escoamento da água ($Re = 2000$) e a magnitude do vazamento (15% da vazão de escoamento), variando-se o instante em que ocorre a abertura da válvula solenóide e a posição do vazamento. O acionamento do relé que abre a válvula solenóide foi feito manualmente através de um interruptor.

Analisando as tabelas 5.5 e 5.6, podemos constatar que o erro na localização está dentro do

esperado, já que o intervalo de tempo entre duas leituras de um mesmo transdutor é da ordem de 0,025 segundos, para os programas LOCAL3-0. e LOCAL4-0.C, e as velocidade de propagação do transiente hidráulico obtida experimentalmente são da ordem de 500 m/s, erros de até 12 metros são aceitáveis.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 - Conclusões

Através da análise dos experimentos realizados neste trabalho podemos obter algumas informações a respeito da eficiência do método e do comportamento do transiente hidráulico frente a diversos parâmetros hidráulicos.

Apesar do experimento ter sido realizado em uma tubulação de PVC com 1.248 m de comprimento e 1" de diâmetro interno e, a maioria das tubulações industriais serem de aço carbono e de comprimentos bem mais elevados, acreditamos que as conclusões a que chegamos também são verdadeiras para tubulações de grande porte.

O sistema de aquisição de dados provou ser eficaz na detecção e localização de vazamentos situados na faixa mínima de 9% do valor da vazão na tubulação. O sistema também se mostrou capaz de detectar vazamentos em tubulações em regime estacionário. Tal fato é importante no caso de problemas em uma unidade industrial que necessite parar por alguns instantes o fornecimento de matéria-prima em uma de suas plantas.

Foi possível concluir também que a velocidade de propagação da onda de pressão, gerada por um vazamento, tem características constante com o aumento do número de Reynolds. Pesquisas anteriores [3] mostraram que a velocidade de propagação da onda de pressão diminui com o aumento do número de Reynolds. Tal fato se deveu ao grande número de acidentes (cotovelos) na tubulação, entretanto no nosso caso o experimento não apresenta tantos acidentes, o que o aproxima mais das tubulações industriais.

Para este experimento a distância máxima de afastamento, entre transdutor e vazamento, foi de 992m, estando a tubulação estável, ou seja, isenta de ar.

6.2 - Sugestões

A seguir, algumas sugestões de modo a dar continuidade ao trabalho aqui descrito:

- Que o método possa ser testado para tubulações com ramificações e que transportam produtos através de terrenos irregulares;
- 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;
- Fazer um estudo econômico, a fim de determinar o número ótimo de transdutores.

APÊNDICE A

CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO

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.

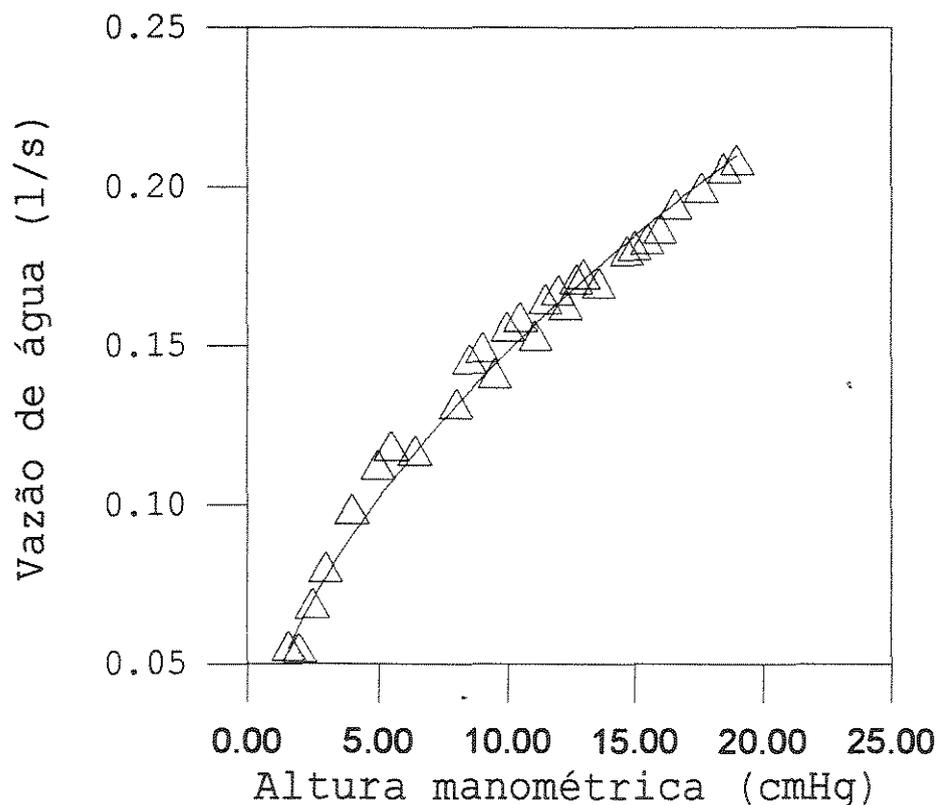


Figura A.1 - Curva de calibração da placa de orifício

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

$$Q = 0,04 \cdot \Delta H^{0,54} \quad (\text{A.1})$$

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

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

APÊNDICE B

LISTAGENS DOS PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO

APÊNDICE B - LISTAGENS DOS PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Neste apêndice encontram-se listados os programas de aquisição de dados, AQU12.C, e de localização de vazamentos, LOCAL3-0.C. As diferenças para os demais programas, AQUJ23.C, AQUJ24.C, AQUJ34.C e LOCAL4-0.C, está na escolha dos transdutores para a aquisição dos dados.

B.1 - Listagem do programa AQU12.C

```

/* ----- */
/*          PROGRAMA PARA AQUISICAO DE DADOS - VERSAO 3.0          */
/* ----- */

/* ----- */
/*   ESTE PROGRAMA FAZ A AQUISICAO DE DADOS UTILIZANDO-SE DE DOIS   */
/*   TRANSDUTORES DE PRESSAO LOCALIZADOS A JUSANTE DO LOCAL DE VA-   */
/*   MENTO. AS DISTÂNCIAS DOS TRANSDUTOES A ENTRADA DA TUBULAÇÃO SÃO: */
/*   D1 (T4) = 1241.51 M E D2 (T3) = 991,96 M                       */
/* ----- */
#include "conio.h"
#include "dos.h"
#include "stdlib.h"
#include "stdio.h"
#include "graphics.h"
#include "ctype.h"
#include "math.h"
#include <bios.h>
#include "time.h"

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

/* ----- */
/*          DEFINICAO DOS BITS DE IMPORTANCIA          */
/* ----- */

```

```

#define BSHEAN 0x10 /*Bit de controle do sample-hold entanl
                    (1=sample)*/
#define BSHSA 0x08 /*Bit de controle do sample-holds das saidas
                    (1=sample)*/
#define MASC0_5 0x00 /* Mascara no modo de operacao 0-5V */
#define MASC1_5 0x29 /* Mascara no modo de operacao 1-5V */
#define MASC0_4 0x08 /* Mascara no modo de operacao 1-4V */
#define MASCBIP 0x23 /* Mascara no modo de operacao BIPOLAR */
#define TIME_OUT 25 /* Tempo de espera do fim da conversao A/D */

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

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

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

void main()
{
clock_t clock();
int tempo1,tempo2;
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 Tecla <ENTER> para iniciar aquisicao de dados ");
getch();
clrscr();
initgraph(&graphdriver,&graphmode,"c:\\cp\\tc2");
/*inic.do mod.grafico */
leitura(volt_estac);
cleardevice();
eixos(); /* construcao dos eixos x e y do grafico */
outtextxy(250,190,"ESTADO ESTACIONARIO");
grafico(volt_estac); /* construcao do grafico para os dados
                    filtrados */
outtextxy(350,10,"Para continuar aperte uma tecla");
getch();
cleardevice();
outtextxy(300,80,"Processo em regime estacionario - Aperte uma te-
cla");
outtextxy(300,90,"para iniciar regime transiente");
getch();

```

```

cleardevice();
tempo1 = clock();
write_dig(1);          /* abertura da valvula solenoide */
leitura(volt_trans);  /* leitura dos dados no estado transiente */
eixos();
outtextxy(250,185,"ESTADO TRANSIENTE");
grafico(volt_trans);
outtextxy(350,10,"Para continuar aperte uma tecla");
write_dig(0);          /* fechamento da valvula solenoide */
tempo2 = clock();
printf("Tempo de abertura da valvula = %f \n", (tempo2 - tempo1)/CLK_TCK);
getch();

opcao:

cleardevice();
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 */
}
/* ----- */
/*          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<20;j++)
    {
        somal = somal + read_anl(3,offset);      /* transdutor - T1 */
        soma2 = soma2 + read_anl(2,offset);      /* transdutor - T2 */
    }
    y[i] = 60.0*((somal/20.0)-730.40)/(4095.0-730.40);
    y[i+1] = 60.0*((soma2/20.0)-742.70)/(4095.0-742.70);
}

/* 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];
    }
}

/* ----- */
/*          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 */
    }
}

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

void eixos()
{
    char buf;
    int ix,iy;
    double ticx,ticy;
    float i;
    setttextjustify(1,0);
    setttextstyle(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)        /* divisões do eixo x */
        /* 45.45455 = (580 - 80)/11 */
    {
        ix = i + 80;
        line(ix,160,ix,163);
        ticx = 0.011208792*i/2.0;             /* 0.01128792 = (2,802198/250) */
        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;
    gcvf(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);
}

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

/* ----- */
/*          ARQUIVO DE RESULTADOS          */
/* ----- */

void arquivo(float y[500])
{
    FILE *arq1;
    char arq[15];
    int i;
    float P1,P2;
cleardevice();
    printf("\n      De o nome do arquivo de dados : ");
    scanf("%s",&arq);
arq1 = fopen(arq,"wt");
    clrscr();
    for(i=0;i<250;i++)
    {
        P1=y[i*2];
        P2=y[i*2+1];
        fprintf(arq1,"%f ",0.011208792*(i+1));
        fprintf(arq1,"%f ",P1);
        fprintf(arq1,"%f \n",P2);
    }
    fclose(arq1);
}

/* ----- */
/*          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 inanl em sample */
    modoper &= ~BSHEAN;       /* Retira bit de sample */
    outportb(base + ADSTS,modoper); /* Sample-hold da inanl 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) */
                             /* Selecciona o canal+sample-hold corresp */
    chda |=BSHSA;           /* Introduz o bit de sample */
    outportb(base + CTL,chda); /* Coloca o sample-hold do canal em sam-
ple */
}

/* ----- */
/*     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 CONVERTOR /*                       */
/*     Parametro de entrada: numero do canal                     */
/*     Parametro de saida: retorna o valor da conversao          */
/*     se ocorrer erro retorna -1 */
/* ----- */

unsigned int read_anl(unsigned char canal, unsigned char offset)
{
    unsigned int dadols,dadoms;
    unsigned int dado;
    selchad(canal);
    outportb(base+ADOFF,offset); /* Normalisa o valor do offset */
    dadols = inportb(base+ADLSB); /* Envia o start ao ad */
    wait_eoc();                  /* Delay para conversao */
    dadoms = inportb(base+ADMSB); /* Le os 4 bits mais significativos*/
    dadols = inportb(base+ADLSB); /* Le os 8 bits menos significativos */
    dado = (dadoms << 8) + dadols;
    return(dado);
}

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

```

```

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

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

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

/* ----- */
/*           ROTINA PARA SELECAO AUTOMATICA DO MODO DE OPERACAO
/*           ACEITA OS SEGUINTEs PARÂMETROS:           */
/* ----- */
/* 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;
}

/* ----- */

```

B.2 - Listagem do programa de localização - LOCAL3-0.C

```

/*****
/*   PROGRAMA PARA LOCALIZACAO DE VAZAMENTOS - VERSAO 3.0           */
/*                                                                    */
/*   Este programa localiza o vazamento a partir das leituras     */
/*dos transdutores de pressao 1, 2 e 3. O programa nos diz entre   */
/*quais transdutores o vazamento se localiza e a distancia entre  */
/*o mesmo e os transdutores. O valor final da leitura de um      */
/*transdutor é a media de 15 leituras.                             */
*****/

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

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

```

```

#define TIMCTL 15 /* Porta de controle do 8253 */
#define TRUE 1
#define FALSE 0

/* ----- */
/*          DEFINICAO DOS BITS DE IMPORTANCIA          */
/* ----- */
#define BSHEAN 0x10 /* Bit de controle do sample-hold entanl
(1=sample) */
#define BSHSA 0x08 /* Bit de controle do sample-holds das sai-
das(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 MASCBIꝀP 0x23 /* Mascara no modo de operacao BIPOLAR */
#define TIME_OUT 25 /* Tempo de espera do fim da conversao A/D */

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

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

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

void main()
{
    clock_t clock();
    int tempo1,tempo2;
    char laco,loop,inicio,input,CASO,fimcalc;
    int i,vazam,m;
    float volt_estac[1000],t[4],e[4];
    int graphdriver = DETECT,graphmode;
    offset = adj_offset();

    /* INICIO DO PROGRAMA */

    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();
    vazam = 0;
    m = 0;
    initgraph(&graphdriver,&graphmode,"c:\\cp\\tc2"); /*inic.do
mod.grafico*/

    laco:

```

```
fprintf(arq1,"%f ",P1);  
fprintf(arq1,"%f ",P2);  
fprintf(arq1,"%f ",P3);  
fprintf(arq1,"%f \n",P4);  
}  
fclose(arq1);  
}
```

:

as demais rotinas referem-se à placa ADA(ver B.1).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Silva, R. A., Buiatti, C., Cruz, S. L. and Pereira, J. A. F. R., Pressure Wave Behavior and Leak Detection in Pipelines, Computers Chem. Engng, vol. 20, 491-496, 1996.
- [2] - WATTERS, G.Z., JEPPSON, R.W., FLAMMER, G.H. Waterhammer in PVC and reinforced plastic pipe. Journal of the hydraulics division, 1976.
- [3] - BUIATTI, C.M. Monitoramento de tubulações por técnicas computacionais on-line. Tese de mestrado, Unicamp, Campinas, 1995.
- [4] - 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, nº6, 1987.
- [5] - Wylie, E.B. and Streeter, V.L., Fluid transients, FEB Press, Michigan, 1983.
- [6] - Wiggert, D. C., Otwell, R. S. & Hatfield, F. J., The effect of elbow restraint on pressure transientes, Transactions of ASME, 107, 402-46, 1985.
- [7] - Wang, G., Dong D. and Fang C., Leak Detection for Transport Pipelines Based on Autoregressive Modeling, IEE Trans., Vol. 42, nº 1, 68-71, 1993.

[8] - Fukuda, T. and Mitsuoka, T., Pipeline Inspections and Maintenance by Applications of Computer Data Processing and Robotic technology, Computers in Industry, vol. 7(1), 5-13, 1986.

[9] - Watababe, K., Koyama, H., Ohma, T. and Himmelblau, D. M., Location of Pinholes in a Pipeline, Computers chem. Engng., vol. 17(1), 61-70, 1993.

[10]- Babhdadi, A. H. A. and Mansy, H. A., Mathematical Model for Leak Location in Pipelines, Appl. Math. Modeling, vol. 12(1), 25-30, 1988.

[11]- Billmann, L. and Isermann, R., Leak Detection Methods for Pipelines, Automatica, vol. 23(3), 381-385, 1987.

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