

TÉCNICAS DE COMPUTAÇÃO EM TEMPO REAL
EM CONTROLE E SUPERVISÃO DE TUBULAÇÕES

Autor: GILBERTO JOSÉ NAVES

Orientador: Prof. Dr. JOÃO ALEXANDRE F. R. PEREIRA ^{edla}

Co-Orientadora: Profa. Dra. SANDRA LÚCIA DA CRUZ

*Esta exemplar entregue
depois da reunião de T.R.
dependência do Gilberto José Naves
em 30-09-81*
Sandra Cruz

Campinas - SP - Brasil

PC. 911.9545

UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

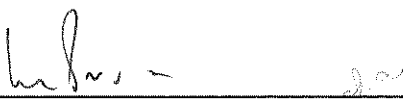
Faculdade de Engenharia Química

"TÉCNICAS DE COMPUTAÇÃO EM TEMPO REAL,
EM CONTROLE E SUPERVISÃO DE TUBULAÇÕES"

AUTOR: Gilberto José Naves

Tese submetida à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Química - UNICAMP - como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

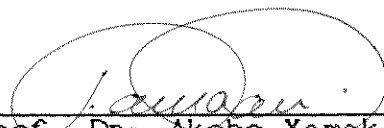
Aprovada por:



Prof. Dr. João Alexandre F. R. Pereira
(FEQ/UNICAMP - Orientador)



Prof. Dr. Mário de Jesus Mendes
(FEQ/UNICAMP)



Prof. Dr. Akebo Yamakami
(FEE/UNICAMP)

Campinas - SP - Brasil

30 de Setembro de 1991

*A minha mãe
e irmãs*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Alexandre F. R. Pereira, meu agradecimento pela dedicada orientação e apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

À Profa. Dra. Sandra Lúcia da Cruz, pela valiosa contribuição e incentivo prestados.

Aos colegas do Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos, pelas colaborações e sugestões fornecidas.

Aos amigos do curso, sem os quais este trabalho teria sido muito mais difícil.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa que permitiu a realização deste trabalho.

NOMENCLATURA

- α - velocidade de propagação da onda no transiente hidráulico, [m/s]
- A - constante, $A = (-2,457 \ln C)^{16}$
- A - área da seção transversal, [cm²]
- A_v - área de abertura da válvula, [cm²]
- A_1 - constante da curva de calibração do transdutor (coeficiente linear), [cmHg]
- A_2 - constante da curva de calibração do transdutor (coeficiente angular), [cmHg/volts]
- B - constante, $B = (37530/Re)^{16}$
- C - constante, $C = (7/Re)^{0,9} + 0,27(e/D)$
- C_a - constante, $C_a = \frac{gA}{a}$, [$\frac{\text{cm}^3/\text{s}}{\text{cmH}_2\text{O}}$]
- C_b - constante, $C_b = Q_{or}^2 / (8C_v H_{or})$, [cmH₂O]
- C_c - constante, $C_c = (C_p - C_n) / C_a$, [cmH₂O]
- C_d - coeficiente de vazão
- C_n - constante da equação característica negativa, [cm³/s]
- C_p - constante da equação característica positiva, [cm³/s]
- C_v - constante da válvula, $c_v = (\tau Q_0^2) / (C_a H_0)$, [cm³/s]
- C^+ - linha característica positiva
- C^- - linha característica negativa
- D - diâmetro do tubo, [cm]
- e - espessura da parede do tubo, [cm]
- E - módulo de elasticidade do tubo, [GPa]
- f - fator de atrito de Darcy
- F - força resultante, $F = F_1 - F_2$, [dyna]
- F_1, F_2 - forças devidas à pressão, [dyna]
- g - aceleração devida à gravidade, [9,81 m/s²]
- h_f - perda de carga devida ao atrito, [cmH₂O]
- H - carga piezométrica, [cmH₂O]

H_{res} - carga piezométrica do reservatório, [cmH₂O]
 H_0 - perda de carga na válvula, [cmH₂O]
 K - módulo de elasticidade do fluido, [GPa]
 L - comprimento do tubo reto, [m]
 L - combinação linear das equações do movimento e da continuidade,
 $L = L_1 + \lambda L_2$
 L_{eq} - comprimento equivalente de tubo reto, [m]
 L_1 - equação do movimento, [eq. 2.11]
 L_2 - equação da continuidade, [eq. 2.30]
 n - número de divisões da tubulação
 ρ - pressão, [dyna/cm²]
 Q - vazão nominal de escoamento, [cm³/s]
 Q_0 - velocidade do fluido em regime permanente, [cm³/s]
 r - raio do tubo, [cm]
 Re - número de Reynolds
 S - força de cisalhamento devida ao atrito, [dynal]
 SA - sinal analógico enviado pelo transdutor-transmissor de
 pressão, [volts]
 SD - sinal digital convertido pela placa analógica-digital,
 [números inteiros]
 t - tempo, [s]
 t_0 - tempo inicial, [s]
 V - velocidade do fluido na seção transversal da tubulação, [cm/s]
 V - volume inicial do elemento de fluido, [cm³]
 V_m - volume do fluido à entrada, [cm³]
 V_{out} - volume do fluido à saída, [cm³]
 x - variável medida do experimento
 x - distância, [m]
 y - valor filtrado
 \bar{y} - valor filtrado resultante do filtro duplo exponencial
 z - altura do tubo acima do plano de referência, [cm]

Letras Gregas

α - constante do filtro simples, $\alpha = 1/(\tau_f/\Delta t + 1)$, ou

constante função da razão de Poisson e de dimensões do tubo,
$$\alpha = \frac{2e}{D}(1+\mu) + \frac{D}{D+e}$$

δp - variação de pressão durante o intervalo de tempo δt , [dy/cm²]

δt - intervalo infinitesimal de tempo, [s]

δV_c - variação no volume devida à compressibilidade do fluido, [cm³]

δV_{in} - aumento no volume do fluido, [cm³]

δV_r - variação do volume do tubo devida à expansão ou à contração radial, [cm³]

δx - comprimento infinitesimal, [cm]

$\delta \epsilon$ - variação na deformação

$\delta \sigma$ - variação da tensão, [dyna/cm²]

ΔH_{ant} - Perda de carga no instante anterior ao vazamento, [cmH₂O]

ΔH_{op} - Perda de carga no instante posterior ao vazamento, quando ocorre a estabilização da pressão, [cmH₂O]

ΔH_{min} - Queda de pressão mínima atingida na tubulação após o vazamento, [cmH₂O]

Δt - incremento de tempo, [s]

Δx - incremento de comprimento, [cm]

γ - peso específico do fluido, [(g/cm³)/g], ou
constante do filtro duplo exponencial

ϵ - rugosidade do tubo

λ - multiplicador linear

μ - razão de Poisson, ou

viscosidade do fluido, [cp]

ρ - densidade do fluido, [g/cm³]

σ - tensão radial no tubo devida à pressão, [dyna/cm²]

τ - abertura relativa da válvula, $\tau = (C_d A_v)/(C_d A_v)_0$

τ_f - constante de tempo do filtro, [s]

Subscritos

- i - seção i
- i^{+1} - seção $i+1$
- i^{+2} - seção $i+2$
- j - variável na posição j em relação às linhas características
- j^{+1} - variável na posição $j+1$ em relação às linhas características
- j^{-1} - variável na posição $j-1$ em relação às linhas características
- n - valor filtrado no instante corrente
- n^{+1} - trecho $n+1$
- n^{-1} - valor filtrado no instante imediatamente anterior
- n^{-2} - valor filtrado no segundo instante anterior
- o - condições em regime estacionário
- or - variável no vazamento
- p - variável nas condições de regime transiente
- 1 - trecho 1

RESUMO

Este trabalho estuda o comportamento da variação da perda de carga com o tempo obtida pelo desenvolvimento de um modelo matemático, a partir de equações do transiente hidráulico aplicadas a um vazamento ocorrido numa tubulação, bem como por um sistema de aquisição de dados em tempo real por microcomputador, interfaceado a um sensor de medição da diferença de pressão nos pontos extremos de uma tubulação.

Para o modelo de cálculo desenvolvido, foi aplicado o método das características, tendo como condições de contorno, um reservatório a montante e uma válvula totalmente aberta a jusante da tubulação.

O sistema de aquisição de dados consta de um transdutor-transmissor de pressão que mede a diferença de pressão em dois pontos nas extremidades da tubulação, um circuito condicionador e amplificador de sinal que transforma o sinal de saída do transdutor numa faixa adequada de voltagem, alterando o *off-set* e possuindo um ganho variável, um conversor analógico-digital que converte o sinal analógico, vindo do circuito, em digital, um conversor digital-digital que atua numa válvula solenóide, simulando o vazamento em estudo e um microcomputador que, juntamente com o programa de aquisição de dados, processa os dados adquiridos.

Foi elaborado um software de filtragem dos dados amostrados, no qual minimiza ruídos provocados por operações normais num processo de transporte de fluidos.

Para um estudo minucioso do fenômeno, em ambos os métodos, 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 numa tubulação.

ABSTRACT

This work studies the time-variant behavior of the pressure drop obtained by development of a numerical model based on hydraulic transient equations applied to a pipeline rupture, as well as by a real-time data acquisition microcomputer system, connected to a pressure measurement device at the ends of the pipe.

To the developed calculation model the Method of Characteristics was applied, having as boundary conditions a reservoir upstream and a totally opened valve downstream the tube.

The data acquisition system involves a pressure transmitter, which measures the pressure drop at two points in the ends of the pipe, an amplifier-conditioner signal circuit that adjusts the exit signal to an adequate voltage range by changing its off-set and presenting a variable gain, an analog-digital converter, which converts the analog signal coming from the circuit into a digital signal, a digital-digital converter that acts in a solenoid valve simulating the leakage and, finally, a microcomputer coupled with the data acquisition program, that processes the data.

It was elaborated a sampled data filtration software which minimizes noises in normal fluid flow processes.

Aiming a deep study of the phenomenon, the main parameters which directly affects the leakage, such as leakage ratio, Reynolds number and leakage position, were changed in both methods. Based on this study, it was possible to conclude about the detection, the extent and the location of the leakage in a pipeline.

SUMÁRIO

CONTEÚDO	pag.
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DA LITERATURA E MODELOS MATEMÁTICOS	4
2.1 - INTRODUÇÃO	5
2.2 - TÉCNICAS DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTO	5
2.3 - DESCRIÇÃO DO FENÔMENO DO TRANSIENTE HIDRÁULICO	12
2.4 - EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARA O CÁLCULO DO TRANSIENTE HIDRÁULICO	15
2.4.1 - Equação do Movimento	16
2.4.2 - Equação da Continuidade	19
2.5 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS EQUAÇÕES DO MOVIMENTO E DA CONTINUIDADE	23
2.6 - VELOCIDADE DA ONDA NO TRANSIENTE HIDRÁULICO	24
2.7 - PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA	25
2.7 - PERDA DE CARGA LOCALIZADA	26
2.8 - CONCLUSÃO	27
CAPÍTULO 3 - MÉTODOS MATEMÁTICOS	28
3.1 - INTRODUÇÃO	29
3.2 - RESOLUÇÃO PELO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS	29
3.3 - CONDIÇÕES DE CONTORNO	37
3.3.1 - Reservatório a Montante	37
3.3.2 - Válvula a Jusante	38
3.3.3 - Vazamento	40
3.3.4 - Redução do Diâmetro da Tubulação (Contração)	43
3.3.5 - Bifurcação a Jusante (Ramificação)	44
3.3.6 - Bifurcação a Montante (Junção)	46
3.4 - TEMPO DE INTEGRAÇÃO	47
3.5 - CONCLUSÃO	48

CAPÍTULO 4 - MONTAGEM EXPERIMENTAL	50
4.1 - INTRODUÇÃO	51
4.2 - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	51
4.3 - COMPONENTES DO EQUIPAMENTO	53
4.3.1 - Bomba Centrífuga	53
4.3.2 - Transdutor-Transmissor de Pressão	54
4.3.3 - Circuito de Amplificação e Condicionamento de Sinal	55
4.3.4 - Placa Analógica-Digital	56
4.3.5 - Placa Digital-Digital	59
4.3.6 - Microcomputador	60
CAPÍTULO 5 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	61
5.1 - INTRODUÇÃO	62
5.2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	62
5.3 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR-TRANSMISSOR DE PRESSÃO	63
5.4 - INTERVALO DE AMOSTRAGEM	64
5.5 - FILTRAGEM DE DADOS	66
5.5.1 - Filtros Analógicos	67
5.5.2 - Filtros Digitais	67
5.5.2.1 - Filtro Exponencial Simples	67
5.5.2.2 - Filtro Exponencial Duplo	69
5.6 - PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	71
CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E ANÁLISE	73
6.1 - INTRODUÇÃO	74
6.2 - SIMULAÇÃO DE VAZAMENTO EM TUBULAÇÕES	74
6.2.1 - Determinação do Comprimento Equivalente da tubulação	75
6.2.2 - Análise do Regime Estacionário de Escoamento	76
6.2.3 - Análise do Regime Transiente de Escoamento	77
6.3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	80
6.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	99

6.4.1 - Transiente Hidráulico	99
6.4.2 - Efeito da Razão de Vazamento	99
6.4.3 - Efeito do Número de Reynolds	100
6.4.4 - Efeito da Posição do Vazamento	100
6.4.5 - Análise Conjunta do Efeito da Razão de Vazamento e Número de Reynolds para os Resultados de Simulação	100
6.5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	103
6.5.1 - Perfil de Queda de Pressão	103
6.5.2 - Tempo de Resposta do Sistema e Localização do Vazamento	105
6.5.3 - Efeito da Razão de Vazamento e Número de Reynolds nos Resultados Experimentais	106
6.5.4 - Vazão Mínima de Vazamento Detectável	108
6.6 - CONCLUSÃO	109
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	110
7.1 - CONCLUSÕES	111
7.2 - SUGESTÕES	111
APÊNDICE A - PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	113
APÊNDICE B - PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO DO VAZAMENTO	120
APÊNDICE C - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE ORIFÍCIO	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Sabe-se que a importância de um sistema de tubulações na indústria química é indiscutível. Matérias-primas são frequentemente transportadas, por vezes a centenas de quilômetros.

Tubos e tubulações podem sofrer, em condições normais, com o passar do tempo, redução na sua resistência. Rupturas podem ocorrer, por exemplo, devidas a um mau acabamento ou qualquer outro fator destrutivo, como mudanças bruscas de pressão, ação corrosiva, ou falta de manutenção. Em muitos casos, os efeitos nocivos associados à ocorrência de vazamentos podem levar a sérios problemas, como por exemplo:

- . rupturas em tubulações de água potável ou de despejos causam muitas inconveniências, como perdas de produto, deslocamento da linha, danos a instalações nas proximidades da área, entre outras.

- . o vazamento de fluidos inflamáveis ou tóxicos tais como petróleo, gasolina ou solventes clorados pode ser letal se ocorrer em áreas residenciais, além de constituir numa perda de produto.

- . em linhas submersas, estes vazamentos podem conduzir a graves problemas de poluição ambiental.

Para se evitar estes efeitos adversos, é necessário desenvolver métodos para detecção e localização de vazamentos em tubulações.

O presente trabalho propõe obter conclusões a respeito de tal problema, através do estudo do comportamento do perfil de variação da perda de carga em função do tempo, quando se sucede um vazamento numa dada posição com uma determinada vazão de vazamento. Este perfil será determinado a partir de duas técnicas diferentes.

Primeiro, será desenvolvido um modelo matemático para a simulação, a partir de equações do transiente hidráulico, aplicadas ao vazamento ocorrido numa tubulação.

Em seguida, a diferença de pressão entre dois pontos extremos da tubulação será obtida por um sistema de aquisição de dados em tempo real, na qual será montada uma tubulação em sensores de pressão interfaceados a um microcomputador PC/XT.

Como parte final da tese, serão analisados os resultados obtidos, variando-se os principais parâmetros que influenciam o vazamento, com o objetivo de se chegar a uma conclusão final a respeito do propósito deste trabalho.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DA LITERATURA E MODELOS MATEMÁTICOS

2.1 - INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, existe uma preocupação intensiva a respeito dos efeitos provocados pelo vazamento numa tubulação. Este assunto é pesquisado em diversas áreas da engenharia, e tenta-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.

Nesta seção, serão apresentadas várias técnicas em diferentes áreas existentes na literatura, e em seguida serão introduzidos os conceitos gerais necessários ao estudo do vazamento numa tubulação e os modelos matemáticos para simulação do fenômeno do vazamento.

2.2 - TÉCNICAS DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTO

Wike [1986] enumerou várias técnicas de detecção e localização de vazamento baseadas no sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). O advento de técnicas de computação em tempo real, em controle e supervisão de tubulação, baseadas em computadores de grande porte tem fornecido subsídios para o desenvolvimento de sistemas de detecção de vazamento.

Dentro da subsérie de técnicas de detecção de vazamentos baseadas no sistema SCADA, existe uma variedade considerável e cabe ressaltar os seguintes.

Teste estático

Este método é capaz de detectar pequenos vazamentos, os chamados vazamentos 'ocultos', e difere de outras técnicas no fato de que pode ser efetuado somente com a tubulação interrompida. Baseia-se no fato de que numa linha sem fluxo uma queda de pressão é indicativa de vazamento. Transdutores diferenciais são instalados em subseções. Estando o fluxo na linha parado, o gradiente de pressão é virtualmente nulo. Se existe um vazamento, então a pressão em uma subseção começará a cair, causando uma pressão diferencial diferente de zero.

Variações inesperadas

Um dos métodos mais diretos de detecção de vazamento em uma operação de tubulação é o método de variação de pressão e fluxo. Um vazamento numa tubulação pode causar um aumento de fluxo a montante simultaneamente com uma diminuição de pressão também a montante. Combinando tais eventos, vazamentos podem ser detectados. Este método é somente de uso real para fluidos incompressíveis próximos ao estado estacionário, pois do contrário pode levar a falsos alarmes. Somente vazamentos maiores são detectáveis e o vazamento não pode ser localizado por este método.

Gradiente de pressão

Provavelmente a mais comum de todas as técnicas de detecção de vazamento baseadas no sistema SCADA. Opera segundo o princípio de que um vazamento deve distorcer o perfil de pressão ao longo de uma seção da tubulação. Instalando-se medidores de pressão em ambas as extremidades das seções, o gradiente médio de pressão ao longo da

linha pode ser calculado. Um vazamento na vizinhança da seção deve causar uma rápida variação nesse gradiente médio. Sistemas de gradiente de pressão também podem ser usados para localizar vazamentos com razoável precisão usando técnicas de ajuste de curvas com interpolação entre medidas de pressão.

Balanço de massa

Basicamente, cada seção é equipada com medidores de fluxo na entrada e saída, e taxas de fluxo são comparadas continuamente em tempo real. Qualquer diferença entre a taxa de fluxo nas duas extremidades significa um vazamento. Na prática, esta comparação é complicada pelo fato de que a taxa de fluxo medida depende de vários parâmetros do fluido (temperatura, pressão, densidade e viscosidade). Estes parâmetros podem sofrer variações ocasionando falsas deduções de diferenças na taxa de fluxo do produto, sendo corrigidos em tempos regulares através de medição de variáveis ao longo da tubulação ou previstas por um modelo de cálculo. A diferença entre as taxas de fluxo entrando e saindo na tubulação é corrigida para avaliar as variações dentro da linha. Se esta diferença excede um valor limite, um alarme automático é soado. Este método é geralmente usado para detectar vazamentos de médios a grandes e não localiza o vazamento.

Ondas de pressão negativas

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 à velocidade do som tanto no sentido a

jusante como a montante do local do vazamento. É possível determinar a existência e aproximar a localização do vazamento pelo monitoramento do progresso da onda em ambos os lados do vazamento, registrando-se o tempo no qual a onda avança vários pontos ao longo da linha. Para implementar esta técnica, transdutores de pressão diferencial são instalados nas extremidades das seções das linhas. O conhecimento da velocidade da onda e as posições dos transdutores juntamente com a distribuição do tempo de reconhecimento da onda torna possível calcular a posição do vazamento com razoável precisão. 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.

Simulação paralela

O modelo de simulação paralela é conduzido por um conjunto limitado de medições reais da tubulação, tipicamente pressões a montante e fluxos a jusante. Disto, o modelo estima as pressões, fluxos e outras variáveis em posições intermediárias ao longo da tubulação. Estas medições estimadas podem então ser comparadas com as medições reais nos pontos intermediários, e suas discrepâncias usadas para detectar vazamentos. Os modelos usados para tais sistemas variam de muito simples, como aproximações de estado estacionário, a de modelo de escoamento totalmente transiente de considerável complexidade. Tais esquemas têm fornecido um relativo sucesso em sistemas de tubulação não complicados (tipicamente linhas de transmissão com algumas ramificações) com regimes de fluxos diretos e fluidos

incompressíveis.

Fukuda e Mitsuoka [1986] descreveram um método de detecção e localização de vazamento por processamento intensivo de dados por computadores e um método de detecção de falhas na tubulação por um robô móvel. O método é baseado na aplicação da filtragem de dados formulado pela modelagem auto-regressiva de sinais ultra-acústicos, que são obtidos por sensores de emissão acústica instalados em certos intervalos da tubulação. O método vale para líquidos, gases ou misturas destes, não necessitando de processos mecânicos complicados para a instalação dos sensores, como perfuratrizes de furos nos tubos, porque estes sensores de emissão acústica são instalados na superfície do tubo. Os sinais obtidos por estes sensores não são determinísticos e sim aleatórios devidos às características ultrasônicas. Consequentemente, métodos convencionais sobre técnicas de emissão acústica não são adequados para detectar pequenos vazamentos. Com o método estatístico proposto, com filtragem de dados formulados pelo modelo auto-regressivo, pequenos vazamentos são detectados levando-se em conta as características dinâmicas dos sinais de emissão acústica, o que não tem sido feito por outros métodos.

Gally e Rioutord [1986] propuseram uma solução ao problema de detecção e localização de vazamento em regime de escoamento transiente dentro de uma tubulação de transporte de líquido ou gás. O princípio do método baseia-se na comparação, em tempo real, dos valores de pressão ou de vazão medidos nas extremidades de uma seção da tubulação com aqueles calculados através da modelagem do escoamento transiente de uma tubulação suposta sem vazamento, pelo método das características. A simulação numérica do escoamento é

conduzida, estabelecendo como condições de contorno valores medidos de pressão e vazão nas extremidades. Assim, se aparecer um desvio significativo entre os valores medidos e calculados de um dos parâmetros não introduzidos nos cálculos, deduz-se a presença de um vazamento ao longo da seção considerada. De mais, as perturbações produzidas pelo vazamento se propagam à velocidade do som a partir da posição de ocorrência do vazamento, X_r (Fig. 2.1), nos sentidos a jusante e a montante. É então possível, com a ajuda do levantamento dos instantes, t_e e t_s , correspondentes à chegada das perturbações nas extremidades E e S , obter sua posição. A velocidade do fluido é muito inferior à velocidade de propagação das ondas,

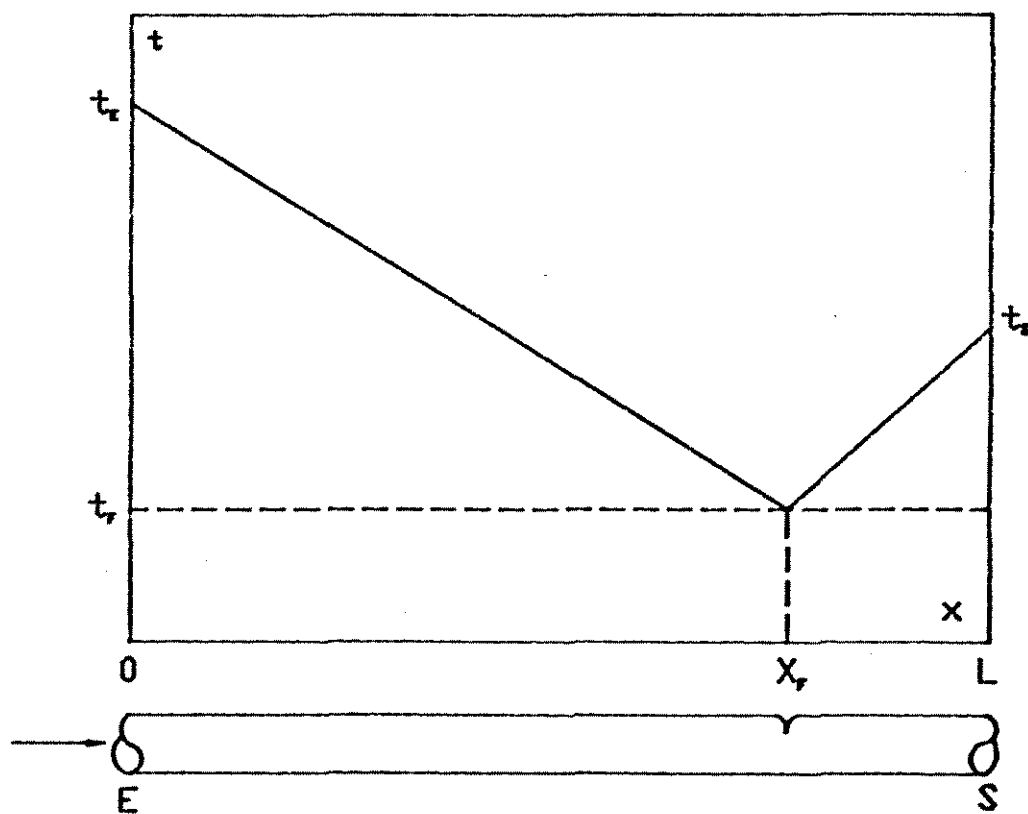


Fig. 2.1 - Princípio de localização do vazamento

portanto, a posição do vazamento é deduzida pela simples equação:

$$X_p = \frac{1}{2} \left[\alpha(t_e - t_s) + L \right]$$

onde L é o comprimento da tubulação e α a velocidade de propagação das ondas.

Os resultados demonstraram que é possível detectar vazamentos correspondentes a 5% da vazão nominal, como também determinar sua localização dentro de um domínio igual a duas vezes o passo de comprimento utilizado no algoritmo de cálculo.

Billmann e Isermann [1987] propuseram uma técnica para detectar e localizar pequenos vazamentos. As melhorias são feitas utilizando um modelo matemático dinâmico, baseado nas equações de escoamento transiente, observadores de estado adaptativo não linear e uma técnica de correlação de detecção. Os sinais medidos são a taxa de fluxo e a pressão nas extremidades da seção considerada.

Baghdadi e Mansy [1988] elaboraram um modelo matemático para localização de vazamentos em tubulação baseado na análise de fluxo unidimensional em regime estacionário. 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 devida 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 predizer a posição do vazamento em termos das quantidades medidas das taxas de

fluxo e das pressões nas extremidades da tubulação em regime estacionário.

2.3 - DESCRIÇÃO DO FENÔMENO DO TRANSIENTE HIDRÁULICO

O transiente hidráulico pode ocorrer numa tubulação quando há um retardamento ou uma aceleração do escoamento, tal como acontece quando uma válvula na linha tem sua abertura alterada, quando na partida ou parada de uma bomba ou quando se sucede um vazamento na linha de uma tubulação. Quando uma válvula é rapidamente fechada numa tubulação durante o escoamento, a vazão através da válvula é reduzida. Com isso a carga no lado de montante da válvula aumenta e provoca uma flutuação de alta pressão que se propaga a montante. Essa flutuação de pressão atua de modo a reduzir a velocidade do escoamento. A jusante da válvula a pressão reduz-se, e uma onda de pressão reduzida propaga-se a jusante, o que também diminui a velocidade.

Antes da dedução das equações do transiente hidráulico, é apresentada uma descrição da sequência de eventos que tem lugar após o fechamento de uma válvula situada na extremidade de uma tubulação que sai de um reservatório (Fig. 2.2). Despreza-se o atrito nesse caso. No instante do fechamento ($t = 0$), o fluido mais próximo à válvula atinge velocidade zero e é comprimido, distendendo a parede do tubo (Fig. 2.2a). Tão logo a primeira camada seja comprimida, o processo repete-se com a camada adjacente. O fluido a montante da válvula continua movendo-se para jusante sem diminuição de sua velocidade, até que as camadas sucessivas tenham sido comprimidas em toda a extensão da tubulação. Uma onda de alta

pressão se propaga a montante, frenando o fluido à sua passagem, comprimindo-o e expandindo a tubulação. Seja a , a velocidade de propagação da onda do transiente hidráulico e L o comprimento da seção da tubulação considerada. No instante $t = L/a$ unidades de tempo, todo o fluido encontra-se sob a carga extra ΔH , toda a quantidade de movimento foi eliminada e toda a energia cinética transformou-se em energia elástica e de pressão.

Desde que o nível do reservatório é constante e o fluido encontra-se com uma carga extra ΔH , ocorre uma condição de desequi-

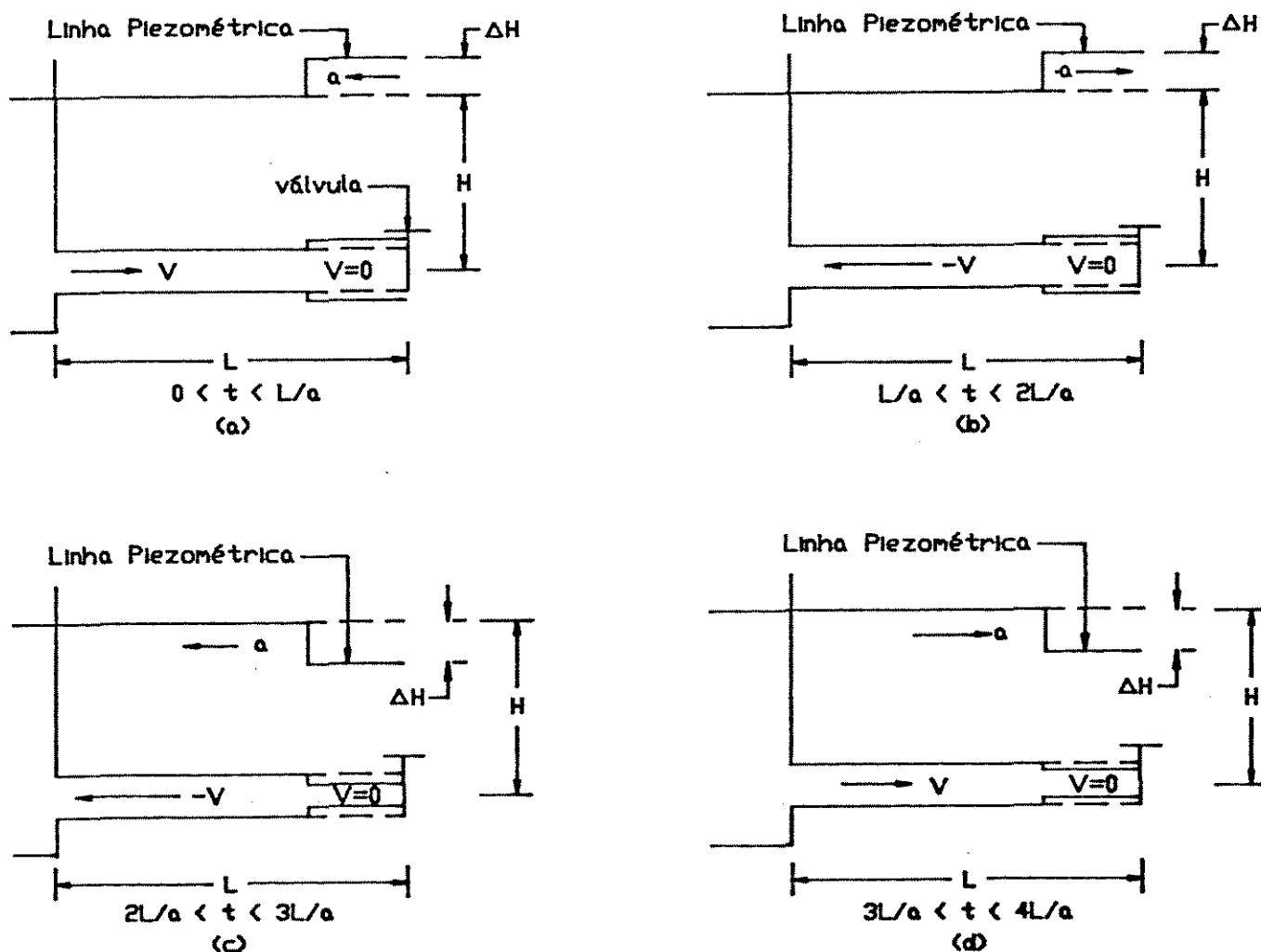


Fig. 2.2 - Propagação de ondas de pressão causada pelo fechamento instantâneo de uma válvula

líbrio no início da tubulação (reservatório), no instante de chegada da onda de pressão. Com isso, o fluido começa a escoar com velocidade V em sentido contrário, causando uma queda de pressão de $H + \Delta H$ a H e a normalização da parede do tubo. Este processo propaga-se a jusante, em direção à válvula, à mesma velocidade α . No instante $t = 2L/\alpha$ unidades de tempo em que a onda chega à válvula, as pressões voltam ao normal em toda a tubulação, e a velocidade em todos os pontos é V no sentido a montante.

Estando a válvula fechada, não há fluido disponível para manter o escoamento na seção da válvula. Conseqüentemente, a velocidade é instantaneamente variada de $-V$ a 0 e uma onda de baixa pressão se desenvolve ($-\Delta H$). Essa onda de baixa pressão avança a montante à velocidade α , ocasiona a expansão do fluido em virtude da pressão mais baixa, e permite que a parede do tubo se contraia. Ao final de $3L/\alpha$ unidades de tempo, a pressão atinge $H - \Delta H$ e a velocidade do fluido é zero em toda a extensão da tubulação.

No instante em que a onda de pressão negativa chega à extremidade a montante da tubulação, $3L/\alpha$ unidades de tempo após o fechamento da válvula, o fluido está em repouso, mas uniformemente submetido a uma carga ΔH menor que a de antes do fechamento. Isso deixa uma condição de desequilíbrio no reservatório, e o fluido move-se em direção à válvula à velocidade V , e a pressão é restabelecida, devolvendo à tubulação e ao fluido suas condições normais, enquanto a onda avança a jusante com velocidade α . No momento em que essa onda atinge a válvula ($t = 4L/\alpha$), as condições são exatamente as mesmas que prevaleciam no instante do fechamento da válvula.

Este processo é então repetido a cada $4L/a$ unidades de tempo. A ação do atrito do fluido e da elasticidade imperfeita do fluido e da parede do tubo, desprezados até aqui, atuam no sentido de amortecer a vibração e eventualmente trazer o fluido a um repouso permanente.

2.4 - EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARA O CÁLCULO DO TRANSIENTE HIDRAULICO

Duas equações básicas da mecânica são aplicadas a um curto trecho do fluido numa tubulação para a obtenção das equações diferenciais do movimento transiente: a segunda lei do movimento de Newton e a equação da continuidade. As variáveis dependentes são a elevação da linha piezométrica, H , acima de um plano de referência fixo e a vazão volumétrica, Q , ou a velocidade média, V , numa seção transversal. As variáveis independentes são a distância, x , medida ao longo da tubulação desde a extremidade a montante e o tempo, t .

As hipóteses a serem consideradas para a dedução das equações a seguir são:

- O fluxo na tubulação é unidimensional e a distribuição de velocidade é uniforme sobre a seção transversal do mesmo.
- As paredes do tubo e o fluido são linearmente elásticos, ou seja, a tensão é proporcional à deformação.
- As fórmulas para o cálculo da perda de carga em regime estacionário na tubulação são válidas para o regime transiente.

2.4.1 - Equação do Movimento

Para a aplicação da segunda lei do movimento de Newton, vamos considerar um elemento horizontal de fluido tendo área de seção transversal A e comprimento δx , dentro de uma tubulação como mostrado na Fig. 2.3. Se a carga piezométrica e a velocidade a

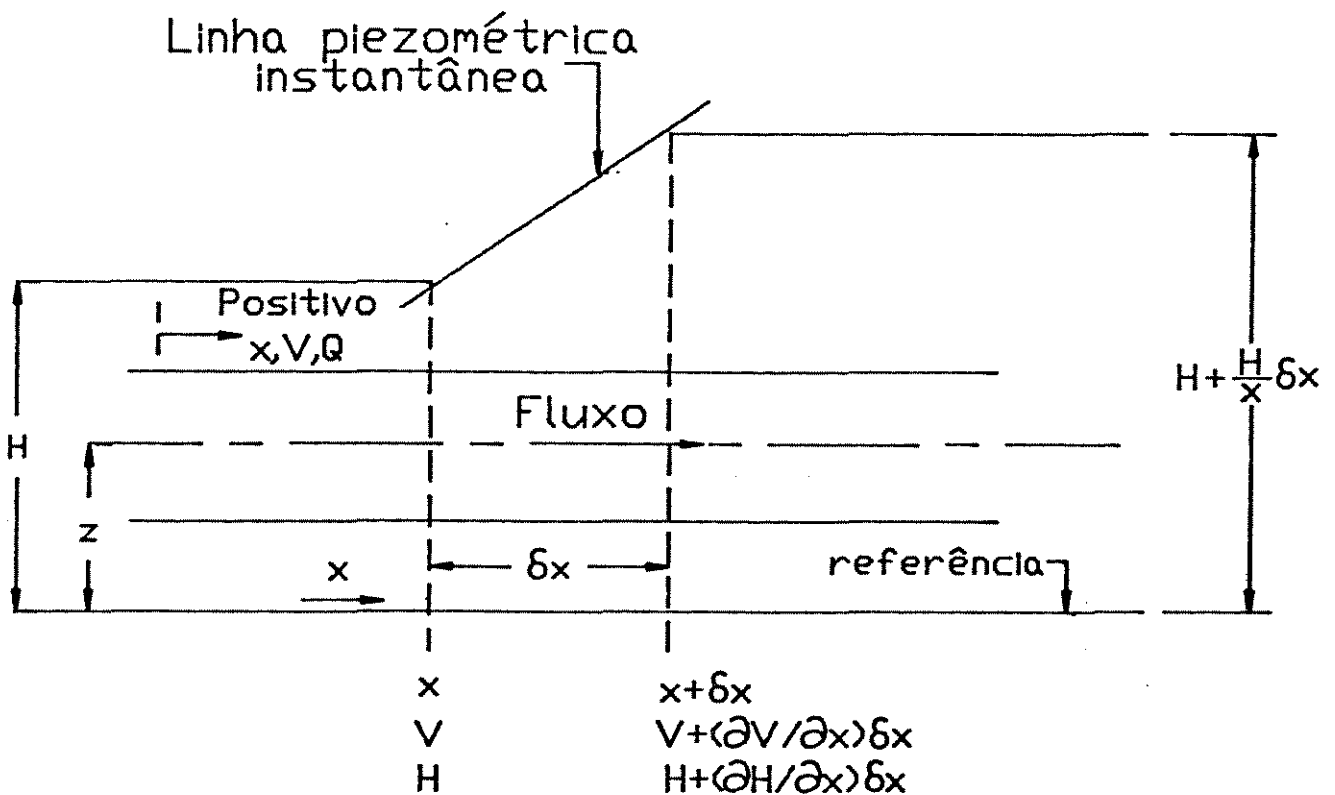


Fig. 2.3 - Diagrama do sistema para a dedução da eq. do movimento

distância x são H e V , então seus correspondentes valores a $x + \delta x$ são $H + (\partial H / \partial x) \delta x$ e $V + (\partial V / \partial x) \delta x$ respectivamente. Na direção x três forças, F_1 , F_2 e S , estão agindo sobre o elemento. F_1 e F_2 são forças devidas à pressão enquanto S é a força de cisalhamento devida ao atrito. Se γ é o peso específico do fluido, A a área da

seção transversal e z a altura da tubulação acima do plano de referência, então:

$$F_1 = \gamma A (H - z) \quad (2.1)$$

$$F_2 = \gamma A \left[H - z + \frac{\partial H}{\partial x} \delta x \right] \quad (2.2)$$

Se a fórmula de Darcy-Weisbach é usada para o cálculo da perda de carga devida ao atrito, então a força de cisalhamento pode ser definida como:

$$S = \frac{\gamma}{g} \frac{fV^2}{8} \pi D \delta x \quad (2.3)$$

onde g é a aceleração devida a gravidade, f o fator de atrito de Darcy e D o diâmetro do tubo. A força resultante, F , agindo sobre o elemento é dada pela equação:

$$F = F_1 - F_2 - S \quad (2.4)$$

A substituição das expressões para F_1 , F_2 e S através das eqs. 2.1, 2.2 e 2.3 na eq. 2.4 fornece:

$$F = -\gamma A \frac{\partial H}{\partial x} \delta x - \frac{\gamma}{g} \frac{fV^2}{8} \pi D \delta \quad (2.5)$$

De acordo com a segunda lei do movimento:

$$\text{Força} = \text{Massa} \times \text{Aceleração} \quad (2.6)$$

Para o elemento de fluido considerado:

$$\left. \begin{aligned} \text{Massa do elemento} &= \frac{\gamma}{g} A \delta x \\ \text{Aceleração do elemento} &= \frac{dV}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

A substituição das eqs. 2.5 e 2.7 na eq. 2.6 e divisão por $\gamma A \delta x$ fornece:

$$\frac{dV}{dt} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{fV^2}{2D} \quad (2.8)$$

Conhecemos através de cálculos elementares que a derivada total

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.9a)$$

ou

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2.9b)$$

Substituindo a eq. 2.9b na eq. 2.8 e rearranjando, obtemos:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV^2}{2D} = 0 \quad (2.10)$$

Nos problemas de transiente hidráulico, o termo $V(\partial V/\partial x)$ é bem

pequeno em relação ao termo $\partial V/\partial t$ e pode ser desprezado. Como o atrito se opõe ao movimento, V^2 é expresso por $V|V|$ para introduzir o sinal adequado. Escrevendo a eq. 2.10 em termos da vazão, Q , e rearranjando, temos:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (2.11)$$

Esta equação é indicada por L_1 , para distingui-la da equação da continuidade L_2 , que é deduzida a seguir.

2.4.2 - Equação da Continuidade

Vamos considerar o volume de controle mostrado na Fig 2.4. O volume do fluido à entrada, V_{in} , e o volume à saída, V_{out} , durante o intervalo de tempo δt são calculados pelas equações abaixo:

$$V_{in} = V \pi r^2 \delta t \quad (2.12)$$

$$V_{out} = \left[V + \frac{\partial V}{\partial x} \delta x \right] \pi r^2 \delta t \quad (2.13)$$

onde r é o raio do tubo. O aumento no volume do fluido, δV_m , durante o tempo δt é:

$$\delta V_m = V_{in} - V_{out} = - \frac{\partial V}{\partial x} \delta x \delta t \pi r^2 \quad (2.14)$$

A variação de pressão, δp , durante o intervalo de tempo, δt , é

$(\partial\rho/\partial t)\delta t$. Esta variação é responsável por uma expansão ou contração na direção radial da parede do tubo e também por um aumento ou decréscimo no comprimento do elemento do fluido devido sua compressibilidade (veja Fig. 2.4).

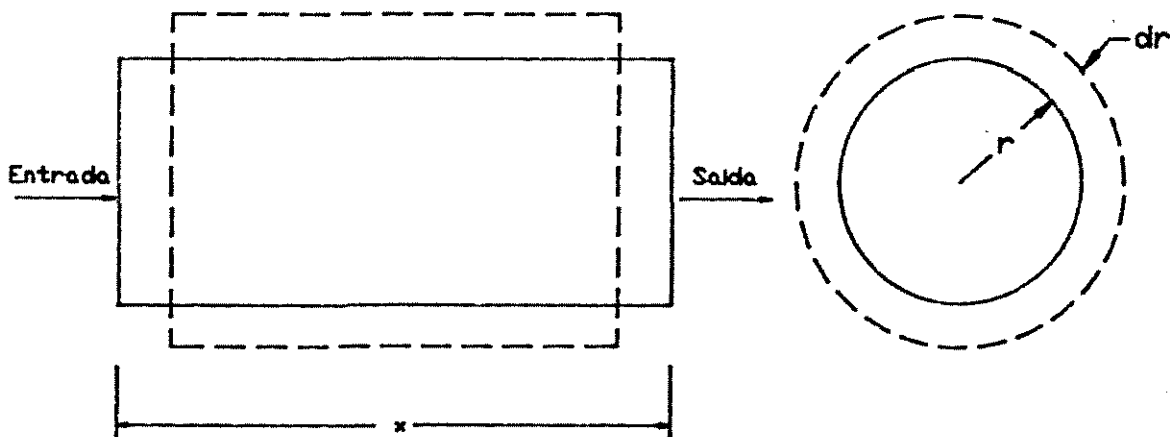


Fig. 2.4 - Diagrama do sistema para a dedução da eq. da continuidade

Vamos primeiro considerar a variação do volume, δV_r , devida à expansão ou à contração radial do tubo. A tensão radial, σ , em um tubo relativa à pressão p é dada pela equação:

$$\sigma = \frac{pr}{e} \quad (2.15)$$

onde e é a espessura da parede do tubo. Então, a variação na tensão, $\delta\sigma$, causada por δp pode ser escrita como:

$$\delta\sigma = \delta p \frac{r}{e} = \frac{\partial p}{\partial t} \delta t \frac{r}{e} \quad (2.16)$$

Desde que o raio r foi aumentado de $r + \delta r$, a variação na deformação, $\delta \epsilon$, é dada por:

$$\delta \epsilon = \frac{\delta r}{r} \quad (2.17)$$

Se a parede do tubo é assumida linearmente elástica, então:

$$E = \frac{\delta \sigma}{\delta \epsilon} \quad (2.18)$$

onde E é o módulo de elasticidade de Young. A substituição de expressões para $\delta \sigma$ e $\delta \epsilon$ através das eqs. 2.16 e 2.17 na eq. 2.18 fornece:

$$E = \frac{(\partial \rho / \partial t) \delta t (r/e)}{\delta r/r} \quad (2.19)$$

ou

$$\delta r = \frac{\partial \rho}{\partial t} \frac{r^2}{eE} \delta t \quad (2.20)$$

A variação no volume do elemento devida à expansão ou à contração do tubo, pode ser escrita como:

$$\delta V_r = 2\pi r \delta x \delta r \quad (2.21)$$

Substituindo para δr através da eq. 2.20, fornece:

$$\delta V_r = 2\pi \frac{\partial \rho}{\partial t} \frac{r^3}{eE} \delta t \delta x \quad (2.22)$$

Vamos agora derivar uma expressão para a variação no volume,

δV_c , relativa à compressibilidade do fluido. O volume inicial do elemento do fluido é determinado pela equação abaixo:

$$V = \pi r^2 \delta x \quad (2.23)$$

O módulo de elasticidade do fluido, K , é definido como:

$$K = \frac{-\delta p}{\delta V_c / V} \quad (2.24)$$

Pela substituição por V através da eq. 2.23 e notando que $\delta p = (\partial p / \partial t) \delta t$, a eq. 2.24 torna-se:

$$\delta V_c = \frac{-\partial p}{\partial t} \frac{\delta t}{K} \pi r^2 \delta x \quad (2.25)$$

Se nós assumirmos que a densidade do fluido se mantém constante, então segue da lei da conservação da massa que:

$$\delta V_{i,n} + \delta V_c = \delta V_r \quad (2.26)$$

A substituição de expressões $\delta V_{i,n}$, δV_r e δV_c através das eqs. 2.14, 2.22 e 2.25 na eq. acima e a divisão por $\pi r^2 \delta x \delta t$ fornece:

$$\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{2r}{eE} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.27)$$

ou

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \left(\frac{2r}{eE} + \frac{1}{K} \right) = 0 \quad (2.28)$$

Vamos definir

$$\alpha^2 = \frac{K}{\rho[1 + (KD/eE)]} \quad (2.29)$$

onde ρ é a densidade mássica do fluido. Notando que $\rho = \rho gH$, rearranjando os termos e substituindo $Q = VA$, a eq. 2.29 torna-se:

$$L_z = \frac{\alpha^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2.30)$$

que é a equação da continuidade para um líquido incompressível no interior de um tubo elástico.

2.5 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS EQUAÇÕES DO MOVIMENTO E DA CONTINUIDADE

A equação do movimento, eq. 2.11, e a equação da continuidade, eq. 2.30, constituem um conjunto de equações diferenciais parciais de primeira ordem. Nestas equações, existem duas variáveis independentes, x e t , e duas variáveis dependentes, V e H . Embora a velocidade da onda, α , dependa das características do sistema, testes de laboratório mostram que esta dependência é significativamente pequena pela redução da pressão, sempre quando esta mantém-se acima da pressão de vapor.

Equações 2.11 e 2.30 podem ser escritas na forma matricial como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{Bmatrix} Q \\ H \end{Bmatrix} = - \left[\underline{B}(Q, H) \right] \frac{\partial}{\partial x} \begin{Bmatrix} Q \\ H \end{Bmatrix} - \left[\underline{G}(Q, H) \right] \quad (2.31)$$

onde:

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} 0 & \partial A \\ \frac{a^2}{\partial A} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\underline{G} = \begin{Bmatrix} \frac{fQ|Q|}{2DA} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

2.6 - VELOCIDADE DA ONDA NO TRANSIENTE HIDRÁULICO

Com o objetivo de calcular variações de pressão ocorrendo num sistema de tubulação submetido a uma mudança brusca na velocidade, é necessário calcular a velocidade da onda no transiente hidráulico. A equação apropriada é dada por Streeter e Wylie [1976] para tubos de PVC:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1+(KD/Ee)\alpha]}} \quad (2.34)$$

onde a é a velocidade da onda, K o módulo de elasticidade do fluido, ρ a densidade do fluido, E o módulo de elasticidade do material do tubo, D diâmetro interno do tubo, e a espessura da parede do tubo e α uma função da razão de Poisson e de dimensões do tubo dada por:

$$\alpha = \frac{2e}{D}(1+\mu) + \frac{D}{D+e} \quad (2.35)$$

onde μ é a razão de Poisson para o material do tubo.

As Equações 2.34 e 2.35 são baseadas na hipótese de que o módulo de elasticidade do material e do líquido são constantes na faixa de pressão utilizada. Além disso, o material deve ser rígido o bastante para que as variações no volume do tubo sobre as flutuações de pressão possam ser extremamente pequenas. O tubo de PVC cumpre estas restrições na faixa de pressão de interesse e portanto, as equações acima são válidas para este material.

2.7 - PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

A perda de carga, h_f , no escoamento de um fluido newtoniano incompressível em uma tubulação e devida ao atrito na parede é determinada em função do fator de atrito de Darcy, f , pela seguinte equação:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.36)$$

onde L é o comprimento do tubo, D o diâmetro, V a velocidade específica superficial do fluido e g a aceleração da gravidade.

O fator de atrito pode ser correlacionado com o número de Reynolds, Re , e com a rugosidade, ϵ , através de uma equação geral válida para todos os regimes de escoamento e uma grande faixa de valores da rugosidade de tubos. Esta equação foi proposta por Churchill e é apresentada a seguir:

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-8/2} \right]^{1/12} \quad (2.37)$$

onde:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.38)$$

$$A = (-2,457 \ln C)^{16} \quad (2.39)$$

$$B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16} \quad (2.40)$$

$$C = \left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \frac{\epsilon}{D} \quad (2.41)$$

sendo μ a viscosidade do fluido.

2.8 - PERDA DE CARGA LOCALIZADA

Sempre que a velocidade do fluxo que escoo em uma tubulação tem uma mudança em sua direção, causada pela presença de uma conexão ou válvulas, ou varia de um valor absoluto pela presença de uma expansão ou redução da área de escoamento, produz-se uma fricção devida à configuração geométrica associada a cada um destes acidentes, que deve ser adicionada ao atrito de superfície decorrente do escoamento apenas no tubo reto. Pode-se prever deste modo a perda de carga total associada ao circuito de escoamento como um todo. A perda de carga através de conexões, válvulas, expansões e reduções, pode ser prevista pela equação:

$$h_l = f \frac{L_{eq}}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.42)$$

onde L_{eq} é o comprimento equivalente de tubo reto que produz a

mesma perda de carga que o acidente. Este comprimento equivalente é obtido através de tabelas existentes na literatura.

2.9 - CONCLUSÃO

Este trabalho propõe inferir a respeito do problema de detecção, localização e dimensão do vazamento numa tubulação, a partir do estudo do comportamento do perfil de variação da pressão com o tempo, obtido pelo desenvolvimento de um modelo teórico de equações do transiente hidráulico aplicadas ao vazamento ocorrido na tubulação e por um sistema de aquisição de dados em tempo real de um modelo experimental construído.

O sistema de aquisição de dados envolve um microcomputador PC/XT, uma placa de conversão A/D (analógica/digital) de 12 bits e 8 canais multiplexados, além de conversores D/A e D/D e sistema de medida e transmissão de sinal de pressão. Será desenvolvido todo o sistema de software de aquisição e análise de dados *on-line*, utilizando ainda técnicas de operação do microcomputador em tempo real.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS MATEMÁTICOS

3.1 - INTRODUÇÃO

No capítulo anterior, foram demonstradas as equações diferenciais parciais que regem o fenômeno do transiente hidráulico.

Neste capítulo, será apresentado o método de resolução das equações, denominado método das características. É um método comum de solução deste tipo de equação, que tem como finalidade transformar as equações diferenciais parciais em ordinárias, e a partir daí, utilizar o método das diferenças finitas como solução para as equações diferenciais ordinárias.

Em seguida, serão desenvolvidas as condições de contorno nas extremidades das seções da tubulação, que normalmente existem num sistema hidráulico de transporte fluidos, para a ocorrência de um vazamento numa determinada posição com uma vazão definida.

Serão apresentados sistemas de tubulações alternativos com reduções, junções e bifurcações. O capítulo é concluído com a escolha do incremento de tempo para um sistema complexo de tubulação.

3.2 - RESOLUÇÃO PELO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

Para facilitar a discussão, vamos reescrever as equações da continuidade e do movimento derivadas no último capítulo.

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + \epsilon A \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (3.1)$$

$$L_2 = \alpha^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + \epsilon A \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

As equações L_1 e L_2 podem ser combinadas linearmente por meio de um multiplicador desconhecido, como $L = L_1 + \lambda L_2$. Quaisquer dois valores reais e distintos de λ fornecem duas equações em Q e H que representam o mesmo fenômeno físico que as duas equações originais, L_1 e L_2 , e que podem substituí-las diante de qualquer solução. Pode acontecer de resultar uma grande simplificação, se dois valores particulares de λ forem encontrados. Com a substituição de L_1 e L_2 na expressão de L , e após algum rearranjo, obtém-se:

$$L = \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda \alpha^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right] + \lambda \epsilon A \left[\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (3.3)$$

Esta equação está montada de tal modo que o primeiro termo entre colchetes seria a derivada total dQ/dt se:

$$\frac{dx}{dt} = \lambda \alpha^2 \quad (3.4)$$

e o segundo termo entre colchetes seria dH/dt se:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\lambda} \quad (3.5)$$

uma vez que:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{e} \quad \frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial Q}{\partial t}$$

conforme o cálculo, as eqs. 3.4 e 3.5 devem ser equivalentes se:

$$\lambda a^2 = \frac{1}{\lambda} \quad (3.6)$$

Tirando-se o valor de λ :

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (3.7)$$

Portanto, dois valores reais e distintos de λ foram determinados, os quais transformam as duas equações de derivadas parciais (eqs. da continuidade e do movimento) num par de equações diferenciais totais condicionadas pelas eqs. 3.4 e 3.5.

Essas equações, com a substituição de λ , tornam-se:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = a \end{aligned} \right\} c^+ \quad (3.8)$$

$$(3.9)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{aligned} \right\} c^- \quad (3.10)$$

$$(3.11)$$

No plano $x-t$, as eqs. 3.9 e 3.11 representam duas linhas retas com inclinação $\pm 1/a$, sendo chamadas de linhas características. Matematicamente, estas linhas dividem o plano $x-t$ em duas regiões

que podem ser dominadas por duas diferentes espécies de solução. Fisicamente, elas representam o caminho percorrido pela perturbação. Por exemplo, uma perturbação no ponto A (Fig. 3.1) no tempo t_0 deve alcançar o ponto P depois do tempo Δt .

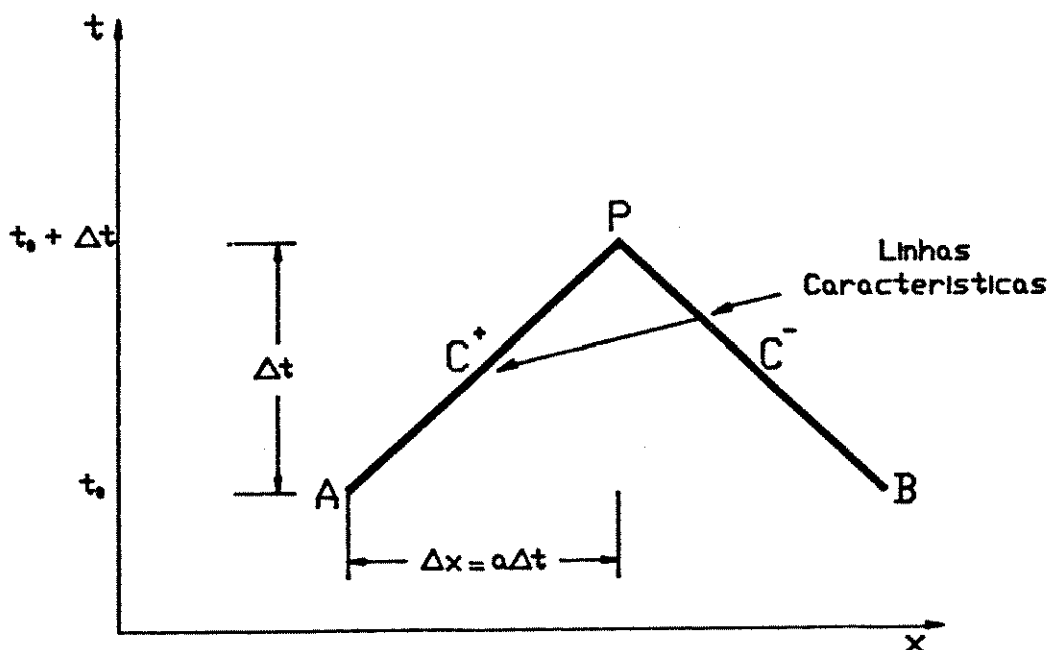


Fig. 3.1 - Linhas Características no plano $x-t$

Antes de apresentar um procedimento para a resolução das eqs. 3.8 e 3.10, vamos primeiro discutir o significado físico das linhas características no plano $x-t$. Para facilitar a discussão vamos considerar uma única tubulação, mostrada na figura 3.2. As equações características (3.8 e 3.10) são válidas ao longo do comprimento do tubo (i.e., para $0 < x < L$) e condições de contorno especiais são necessárias nas extremidades (i.e., a $x = 0$ e $x = L$). No exemplo em consideração, existe um reservatório a montante (a $x = 0$) e uma válvula a jusante (a $x = L$) e as condições do transiente são produzidas pelo fechamento de uma válvula. No tempo $t = 0$, o fluxo é estacionário. Quando a válvula é instantaneamente fechada, o

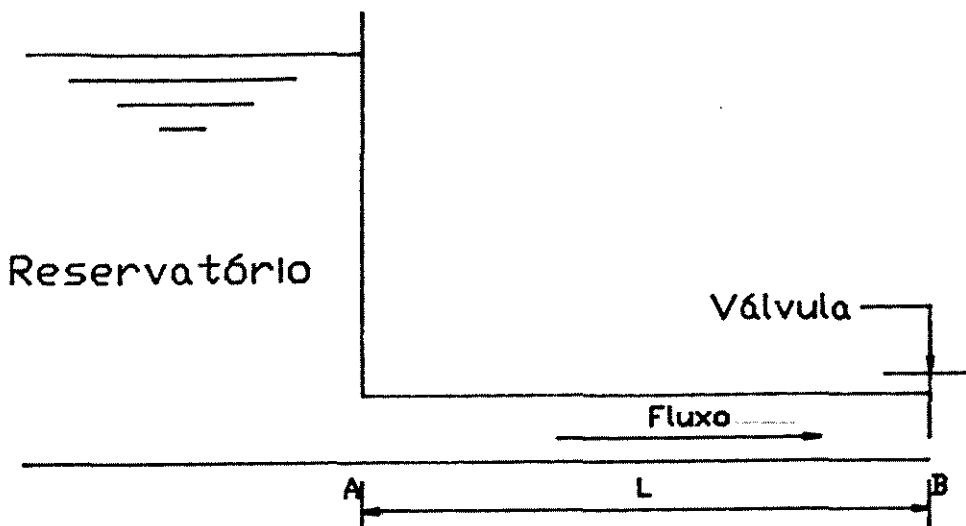


Fig. 3.2 - Representação esquemática de uma tubulação

fluxo através da mesma é reduzido a zero e resulta em um aumento de pressão na válvula. Devido a este aumento, uma onda de pressão avança na direção a montante. Se o caminho dessa onda for graficado no plano $x-t$, ele deve ser representado pela linha BC como mostrado na Figura 3.3. Se excitações são impostas simultaneamente nos pontos A e B, então a região influenciada pelas condições iniciais é como mostrada nesta figura; a linha característica AC separa as regiões influenciadas pela vizinhança a montante e as condições iniciais, e a linha BC separa as regiões influenciadas pela vizinhança a jusante e as condições iniciais. Em outras palavras, a linha característica no plano $x-t$ representa o caminho percorrido pela perturbação iniciada a várias posições no sistema.

Para resolver as eqs. 3.8 a 3.11, será utilizado um método de diferenças finitas de primeira ordem por se tratar de problemas com intervalos de tempo usualmente pequenos, produzindo resultados suficientemente corretos.

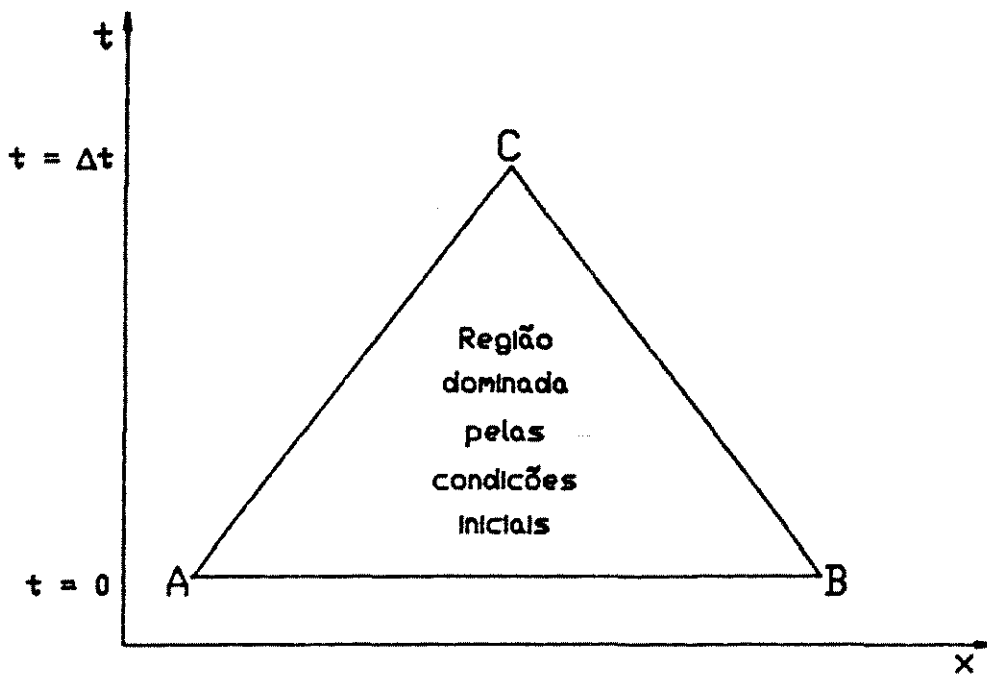


Fig. 3.3 - Excitação nas extremidades a montante e a jusante

Referindo-se a Fig. 3.1, as condições iniciais são conhecidas (i.e., a $t = 0$, estas são condições iniciais em estado estacionário) ou calculadas no passo anterior. O objetivo é calcular as condições desconhecidas a $t = t_0 + \Delta t$, onde o incremento de tempo Δt é $\Delta x/\alpha$. Escrevendo a equação característica positiva (eq. 3.8) em notação de diferenças finitas (Fig. 3.4), obtém-se:

$$Q_{p_j} - Q_{j-1} + \frac{\beta A}{\alpha} (H_{p_j} - H_{j-1}) + \frac{f \Delta t}{2DA} Q_{j-1} |Q_{j-1}| = 0 \quad (3.12)$$

e, analogamente, da eq. 3.10:

$$Q_{p_j} - Q_{j+1} - \frac{\beta A}{\alpha} (H_{p_j} - H_{j+1}) + \frac{f \Delta t}{2DA} Q_{j+1} |Q_{j+1}| = 0 \quad (3.13)$$

A eq. 3.12 pode ser escrita como:

$$Q_{p_j} = C_p - C_a H_{p_j} \quad (3.14)$$

e a eq. 3.13 como:

$$Q_{p_j} = C_n + C_a H_{p_j} \quad (3.15)$$

onde:

$$C_p = Q_{j-1} + \frac{\partial A}{\alpha} H_{j-1} - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_{j-1} |Q_{j-1}| \quad (3.16)$$

$$C_n = Q_{j+1} - \frac{\partial A}{\alpha} H_{j+1} - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_{j+1} |Q_{j+1}| \quad (3.17)$$

e

$$C_a = \frac{\partial A}{\alpha} \quad (3.18)$$

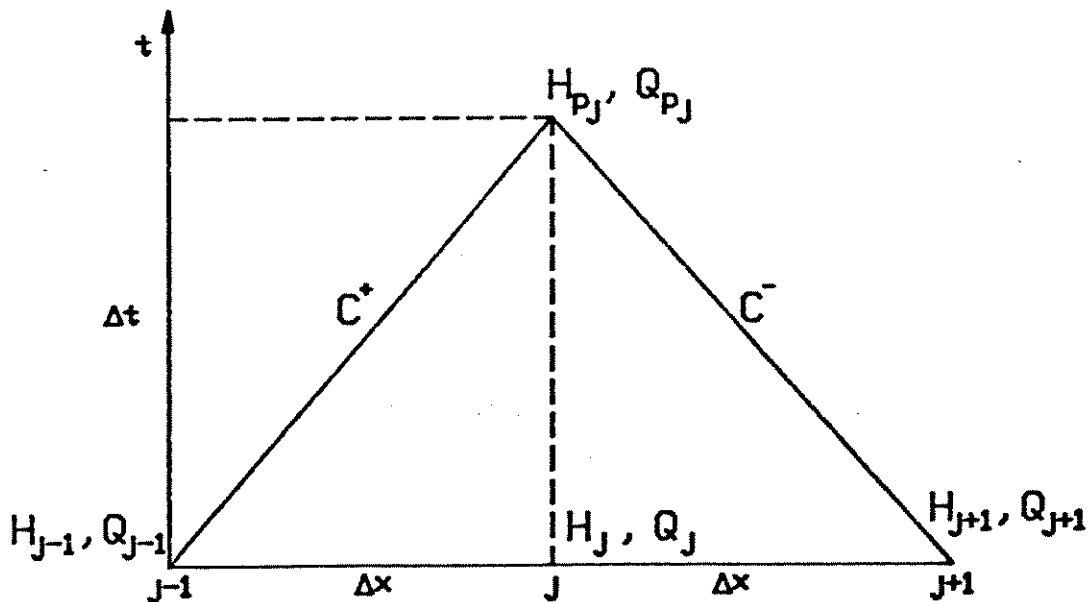
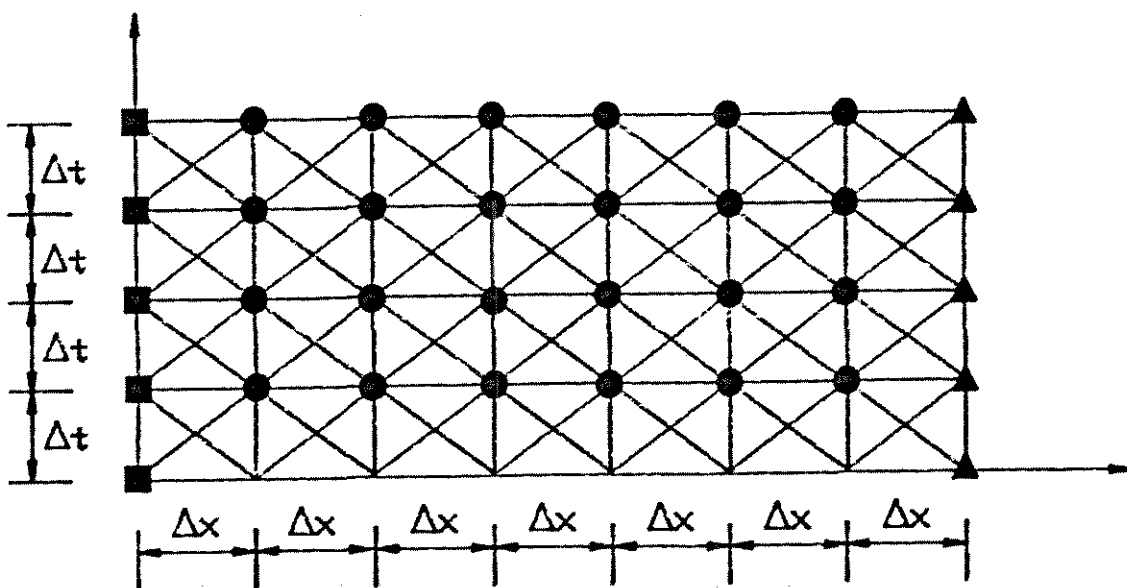


Fig. 3.4 - Notação em diferenças finitas

Note que a eq. 3.14 é válida ao longo da linha característica positiva AP e a eq. 3.15 ao longo da linha característica negativa BP (Fig. 3.1). Os valores das constantes C_n e C_p são conhecidos para cada passo de tempo, e a constante C_s depende das propriedades do tubo. Devemos nos referir à eq. 3.14 como *equação característica positiva* e à eq. 3.15 como *equação característica negativa*. Em tais equações temos duas incógnitas: $H_{p,j}$ e $Q_{p,j}$. Os valores dessas incógnitas podem ser determinados pela resolução simultânea dessas equações, ou seja:

$$Q_{p,j} = 0,5(C_p + C_n) \quad (3.19)$$

Já o valor de $H_{p,j}$ pode ser determinado através das eqs. 3.14 ou 3.15.



- Pontos interiores
- ▲ Condições de contorno a jusante
- Condições de contorno a montante

Fig. 3.5 - Malha retangular para a resolução das equações características

Para ilustrar como utilizar as equações acima, nós devemos considerar uma única seção da tubulação separadamente. A seção é dividida em n trechos iguais (Fig 3.5), e as condições em estado estacionário a $t = t_0$ são primeiro obtidas em todos os pontos. Para n trechos, existem $n + 1$ divisões ao longo do conduto. Então, para determinar as condições a $t = t_0 + \Delta t$, as duas últimas equações são usadas para a determinação de H_{p_j} e Q_{p_j} , com j variando de 2 até n . As condições de contorno são então utilizadas para a determinação de H_{p_1} , Q_{p_1} e $H_{p_{n+1}}$, $Q_{p_{n+1}}$. Obtidos esses valores, os resultados são impressos e os valores de Q_j e H_j são substituídos pelos valores de Q_{p_j} e H_{p_j} , dando-se novo incremento ao tempo e repetindo-se o procedimento descrito.

3.3 - CONDIÇÕES DE CONTORNO

Na última seção foi discutido que condições de contorno especiais são necessárias para a resolução do problema nas extremidades da tubulação. Estas são desenvolvidas pela solução das eqs. 3.14, 3.15 ou ambas, e as condições impostas pelas vizinhanças. A eq. 3.14 é usada para contornos a jusante e a eq. 3.15 a montante. Serão desenvolvidas agora condições de contorno úteis para resolução do problema do transiente hidráulico.

3.3.1 - Reservatório a Montante

Para o reservatório a montante, a característica C^- é obtida pela eq. 3.15 para $j = 1$. Se a perda de carga e a velocidade na entrada

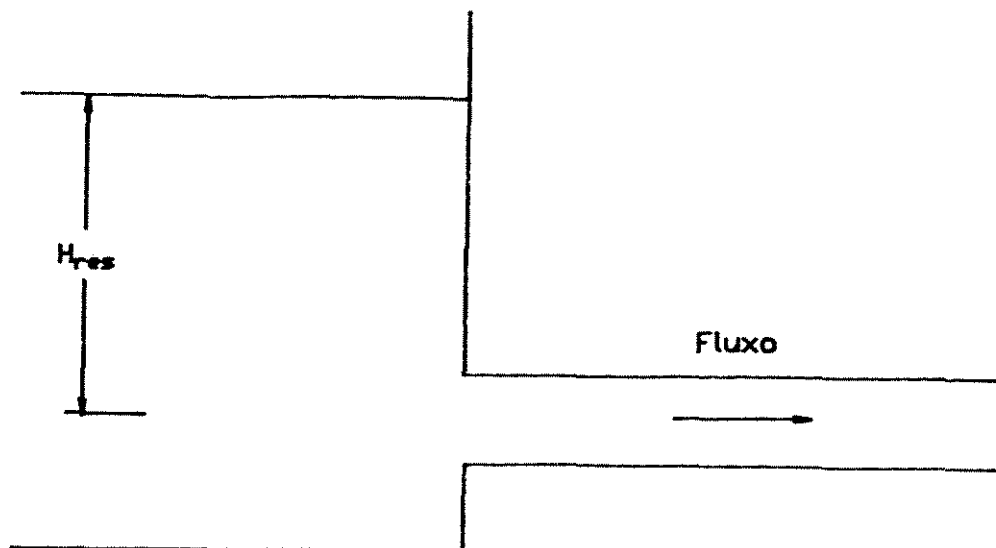


Fig. 3.6 - Reservatório a montante

da tubulação são desprezíveis, então da Fig. 3.6, temos que:

$$H_{res} = H_{p_1} \quad (3.20)$$

onde, H_{res} é a carga piezométrica do reservatório. A substituição dessa última na eq. 3.15 para $j = 1$ fornece:

$$Q_{p_1} = C_n + C_v H_{res} \quad (3.21)$$

3.3.2 - Válvula a Jusante (Fig 3.7)

Na extremidade a jusante do conduto, a característica C^* é dada pela eq. 3.14 para $j = n+1$. O fluxo em estado estacionário através da válvula pode ser escrito como:

$$Q_0 = (C_d A_v)_0 \sqrt{2gH_0} \quad (3.22)$$

onde o índice 0 indica condições em estado estacionário, C_d o coeficiente de vazão, A_v a área de abertura da válvula, H_0 a perda de carga na válvula e Q_0 a velocidade do fluido no conduto em regime permanente. Para uma outra abertura genérica em estado transiente:

$$Q_{p_{n+1}} = (C_d A_v) \sqrt{2gH_{p_{n+1}}} \quad (3.23)$$

Dividindo a eq. 3.22 pela eq. 3.23, elevando ao quadrado ambos os lados e definindo a abertura da válvula relativa $\tau = (C_d A_v) / (C_d A_v)_0$, obtém-se que:

$$Q_{p_{n+1}} = \tau Q_0 \sqrt{\frac{H_{p_{n+1}}}{H_0}} \quad (3.24)$$

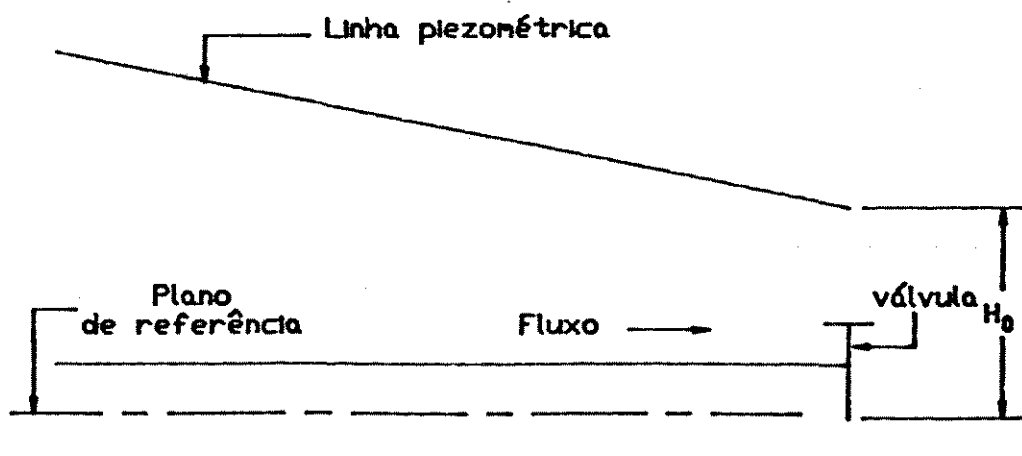


Fig. 3.7 - Válvula a jusante

A resolução simultânea da equação característica positiva (eq. 3.14) e da eq. 3.24 fornece $Q_{p_{n+1}}$ e $H_{p_{n+1}}$. A solução envolve uma equação do segundo grau. Desprezando o sinal negativo no termo do radical, temos que:

$$Q_{p_{n+1}} = 0,5 \left[-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_p C_v} \right] \quad (3.25)$$

onde:

$$C_v = (\tau Q_0)^2 / (C_p H_0) \quad (3.26)$$

Agora $H_{p_{n+1}}$ pode ser determinado pela eq. 3.24.

Note que $\tau = 1$ corresponde à válvula totalmente aberta e o fluxo através dela é Q_0 sobre uma carga de H_0 .

3.3.3 - Vazamento

Para determinarmos as condições de contorno no caso de vazamento, a tubulação será considerada como sendo uma junção de duas seções,

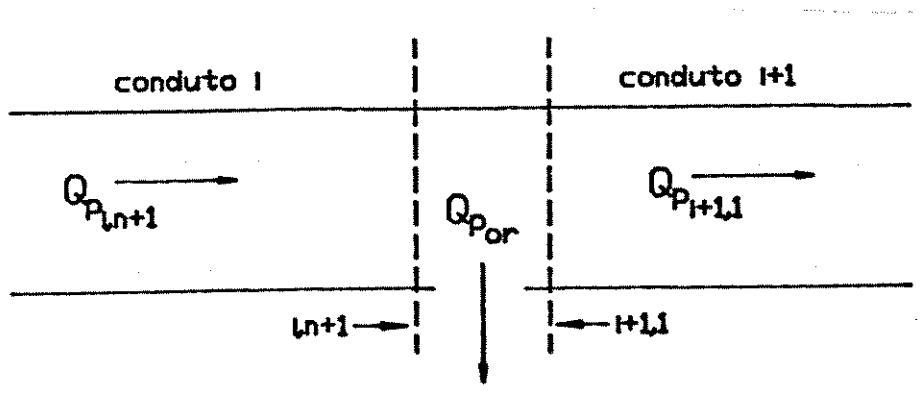


Fig. 3.8 - Representação esquemática de uma tubulação com vazamento

separadas na posição onde ocorreu a ruptura (Fig. 3.8). Cada seção é dividida em n trechos, de maneira análoga à realizada no caso simples anterior. Para este propósito, utiliza-se dois subscritos. O primeiro deve designar o número do seção, enquanto que o segundo deve indicar o número do trecho.

Se a diferença na velocidade nos trechos $(i, n+1)$ e $(i+1, 1)$ e a perda de carga no vazamento são desprezíveis, então:

$$H_{p_{i, n+1}} = H_{p_{i+1, 1}} \quad (3.27)$$

As equações características negativa e positiva para o trecho $(i, n+1)$ e $(i+1, 1)$ são:

$$Q_{p_{i, n+1}} = C_p - C_a H_{p_{i, n+1}} \quad (3.28)$$

$$Q_{p_{i+1, 1}} = C_n + C_a H_{p_{i+1, 1}} \quad (3.29)$$

A equação da continuidade no vazamento é:

$$Q_{p_{i, n+1}} = Q_{p_{i+1, 1}} + Q_{p_{or}} \quad (3.30)$$

onde $Q_{p_{i, n+1}}$ é a vazão do fluido antes do vazamento, $Q_{p_{i+1, 1}}$ a vazão do fluido após o vazamento e $Q_{p_{or}}$ a vazão do fluido no vazamento, todas variáveis no regime transiente.

Existem quatro equações e cinco incógnitas ($H_{p_{i, n+1}}$, $H_{p_{i+1, 1}}$, $Q_{p_{i, n+1}}$, $Q_{p_{i+1, 1}}$ e $Q_{p_{or}}$), portanto é necessário mais uma equação

para tornar o sistema determinado e possível de ser resolvido. Esta equação é obtida partindo-se da eq. 3.24, que estabelece a relação da velocidade do fluido numa válvula a jusante do conduto, que também pode ser aplicada para o caso do problema de orifício a jusante tomando-se o valor de $\tau = 1$, pois no caso do mesmo a abertura é considerada constante.

Então, da eq. 3.24, temos:

$$Q_{v,or} = Q_{or} \sqrt{\frac{H_{p,i,n+1}}{H_{or}}} \quad (3.31)$$

onde Q_{or} e H_{or} são a vazão e a carga piezométrica no orifício do vazamento para o estado estacionário.

A solução simultânea das eqs. 3.27 a 3.31 fornece:

$$C_n - C_p + 2C_d H_{p,i,n+1} + Q_{or} \sqrt{\frac{H_{p,i,n+1}}{H_{or}}} = 0 \quad (3.32)$$

Esta equação pode ser transformada em equação quadrática e resolvida em termos de $H_{p,i,n+1}$. Desprezando o sinal positivo no termo do radical, obtemos:

$$H_{p_{i,n+1}} = C_b - C_c - \sqrt{C_b(C_b - 2C_c)} \tag{3.33}$$

onde:

$$C_b = \frac{Q_o^2 r}{8C_o H_o r} \tag{3.34}$$

$$C_c = \frac{C_p - C_n}{C_o} \tag{3.33}$$

Agora $H_{p_{i+1,1}}$, $Q_{p_{i,n+1}}$, $Q_{p_{i+1,1}}$ e $Q_{p_{or}}$ podem ser obtidos pelas eqs. 3.28 a 3.31.

3.3.4 - Redução do Diâmetro da Tubulação (Contração)

Será utilizada a mesma notação para o caso de vazamento, ou seja, adotar-se-á dois subscritos, onde o primeiro designa o número da seção e o segundo o trecho subdividido.

Se a diferença da velocidade nos trechos (i,n+1) e (i+1,1) (Fig. 3.9) e a perda de carga nas junções são desprezíveis, então:

$$H_{p_{i,n+1}} = H_{p_{i+1,1}} \tag{3.36}$$

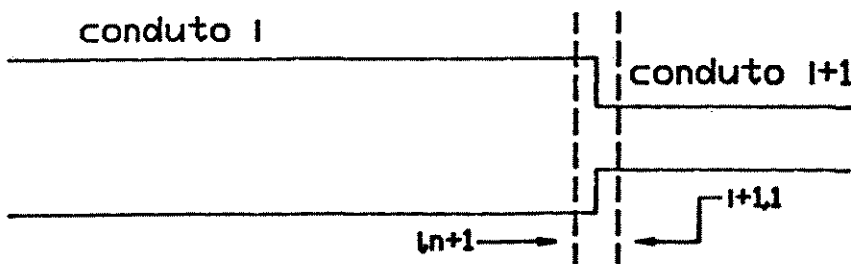


Fig. 3.9 - Redução

As equações características positiva e negativa para os trechos $(i, n+1)$ e $(i+1, 1)$ são:

$$Q_{p_i, n+1} = C_{p_i} - C_{a_i} H_{p_i, n+1} \quad (3.37)$$

$$Q_{p_{i+1}, 1} = C_{n_{i+1}} + C_{a_{i+1}} H_{p_{i+1}, 1} \quad (3.38)$$

A equação da continuidade na junção é:

$$Q_{p_i, n+1} = Q_{p_{i+1}, 1} \quad (3.39)$$

Combinando as eqs. 3.36 a 3.39, temos:

$$H_{p_i, n+1} = \frac{C_{p_i} - C_{n_{i+1}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}}} \quad (3.40)$$

Agora $H_{p_{i+1}, 1}$, $Q_{p_i, n+1}$ e $Q_{p_{i+1}, 1}$ podem ser determinadas pelas eqs. 3.36 a 3.38.

3.3.5 - Bifurcação a Jusante (Ramificação)

Para uma ramificação mostrada na Figura 3.10, as seguintes equações podem ser escritas:

1. Equação da continuidade:

$$Q_{p_{i,n+1}} = Q_{p_{i+1,1}} + Q_{p_{i+2,1}} \quad (3.41)$$

2. Equações características:

$$Q_{p_{i,n+1}} = C_{p_i} - C_{o_i} H_{p_{i,n+1}} \quad (3.42)$$

$$Q_{p_{i+1,1}} = C_{n_{i+1}} + C_{o_{i+1}} H_{p_{i+1,1}} \quad (3.43)$$

$$Q_{p_{i+2,1}} = C_{n_{i+2}} + C_{o_{i+2}} H_{p_{i+2,1}} \quad (3.44)$$

3. Equação para a carga total:

$$H_{p_{i,n+1}} = H_{p_{i+1,1}} = H_{p_{i+2,1}} \quad (3.45, 3.46)$$

Nas eqs. 3.45 e 3.46, a perda de carga e a diferença de velocidade nas junções foram desprezadas.

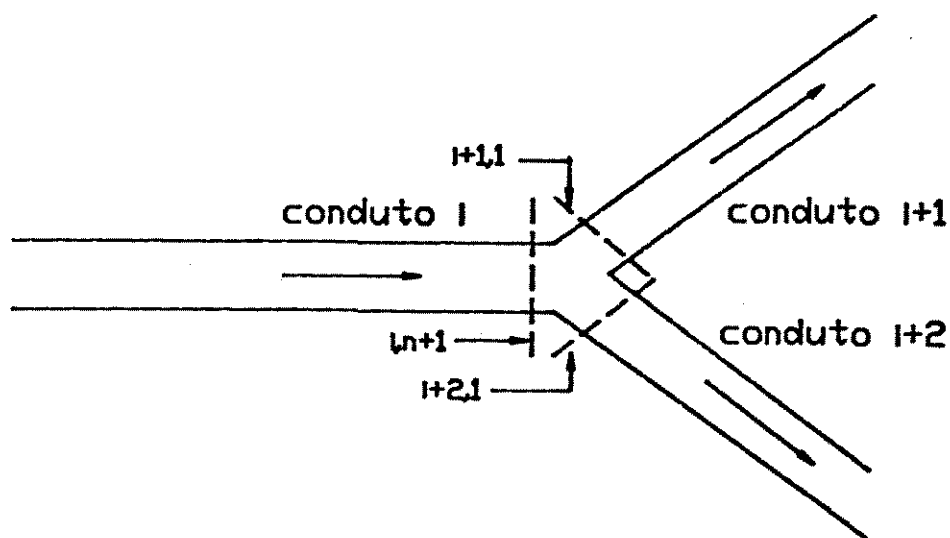


Fig. 3.10 - Bifurcação a jusante

A solução simultânea das eqs. 3.41 a 3.46 fornece:

$$H_{p_{i,n+1}} = \frac{C_{p_i} - C_{n_{i+1}} - C_{n_{i+2}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}} + C_{a_{i+2}}} \quad (3.47)$$

Agora $H_{p_{i+1,1}}$ e $H_{p_{i+2,1}}$ podem ser determinados pelas eqs. 3.45 e 3.46, e $Q_{p_{i,n+1}}$, $Q_{p_{i+1,1}}$ e $Q_{p_{i+2,1}}$ pelas eqs. 3.42 a 3.44.

3.3.5 - Bifurcação a Montante (Junção)

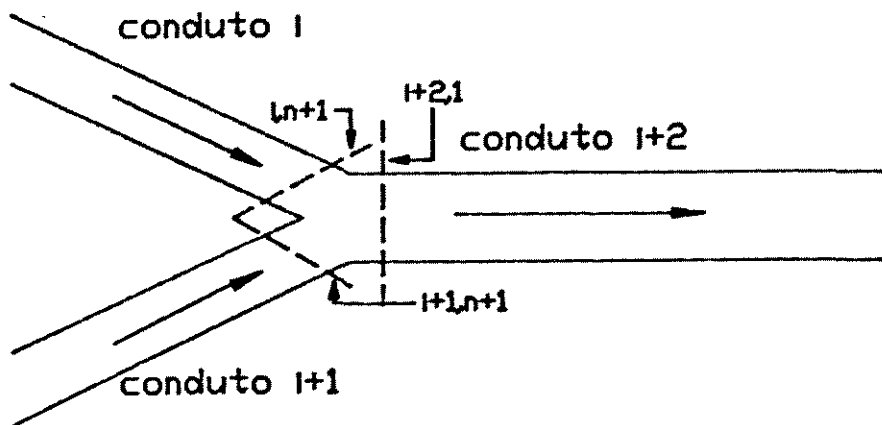


Fig. 3.11. - Bifurcação a montante

Para uma junção mostrada na Figura 3.11 as mesmas equações podem ser escritas como anteriormente

1. Equação da continuidade:

$$Q_{p_{i+2,1}} = Q_{p_{i,n+1}} + Q_{p_{i+1,n+1}} \quad (3.48)$$

2. Equações características:

$$Q_{p_i, n+1} = C_{p_i} - C_{a_i} H_{p_i, n+1} \quad (3.49)$$

$$Q_{p_{i+1}, n+1} = C_{p_{i+1}} - C_{a_{i+1}} H_{p_{i+1}, n+1} \quad (3.50)$$

$$Q_{p_{i+2}, 1} = C_{n_{i+2}} + C_{a_{i+2}} H_{p_{i+2}, 1} \quad (3.51)$$

3. Equação para a carga total:

$$H_{p_i, n+1} = H_{p_{i+1}, n+1} = H_{p_{i+2}, 1} \quad (3.52, 3.53)$$

Nas eqs. 3.52 e 3.53, a perda de carga e a diferença de velocidade nas junções foram desprezadas.

A solução simultânea das eqs. 3.48 a 3.53 fornece:

$$H_{p_i, n+1} = \frac{C_{p_i} + C_{p_{i+1}} - C_{n_{i+2}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}} + C_{a_{i+2}}} \quad (3.54)$$

Agora $H_{p_{i+1}, n+1}$ e $H_{p_{i+2}, 1}$ podem ser determinados pelas eqs. 3.52 e 3.53, e $Q_{p_i, n+1}$, $Q_{p_{i+1}, n+1}$ e $Q_{p_{i+2}, 1}$ pelas eqs. 3.49 a 3.51.

3.4 - TEMPO DE INTEGRAÇÃO

Para um sistema complexo de duas ou mais seções, é necessário que o mesmo incremento de tempo seja utilizado. Este tempo de integração deve ser escolhido tal que a condição de estabilidade de Courant seja satisfeita, ou seja:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{a} \quad (3.55)$$

Se este intervalo de tempo, Δt , é tal que o comprimento das divisões de qualquer seção da tubulação seja maior ou igual a $a\Delta t$, então Δx deve ser maior ou igual a $a\Delta t$ para satisfazer ao critério de estabilidade de Courant. Logo, a seguinte equação deve fornecer resultados suficientemente corretos.

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i n_i} \quad (i = 1 \text{ a } N) \quad (3.56)$$

onde n_i é o número de divisões da seção da tubulação e N o número de seções do sistema.

3.5 - CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentado o método das características para a resolução das equações diferenciais originadas e as condições de contorno foram desenvolvidas para o caso de um reservatório a montante e uma válvula a jusante do vazamento.

No caso em que não é possível definir as condições de contorno em pontos onde não temos informações a respeito de como a pressão

ou a vazão se comporta em função de parâmetros conhecidos, seria necessário obtê-las através de aquisição de dados por transmissores e conversores A/D, ou seja, a simulação numérica do transiente hidráulico seria efetuada estabelecendo como condições de contorno valores medidos das variáveis nas extremidades por aquisição de dados em tempo real. Sendo assim, o sistema de aquisição de dados seria utilizado como subsídio para a solução ao problema do transiente hidráulico.

CAPÍTULO 4

MONTAGEM EXPERIMENTAL

4.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentada a aparelhagem experimental construída para aquisição de dados em tempo real através do interfaceamento do processo a um microcomputador, com o objetivo de se estudar o transiente hidráulico provocado pela sucessão de um vazamento numa dada posição, medindo-se a queda de pressão entre dois pontos de uma tubulação.

4.2 - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

A Figura 4.1 mostra o esquema da montagem experimental, constituindo de uma tubulação, bomba centrífuga, transdutor-transmissor de pressão, medidor de vazão e acessórios.

O sistema hidráulico consiste de oito tubos de PVC de 2,5 metros de comprimento, 3/4" de diâmetro nominal e 0,25 cm de espessura, interligados por joelhos padrão de 90°. A tubulação foi montada sobre uma mesa de madeira nivelada em sua posição horizontal.

Para os vazamentos foram montadas saídas laterais a 5, 10 e 15 m da entrada da tubulação. A estas saídas laterais, conectou-se uma válvula solenóide nas diferentes posições em cada corrida realizada, onde se controla sua abertura ou fechamento através do interfaceamento com um microcomputador. A vazão da abertura lateral (vazamento) é controlada manualmente por uma válvula gaveta instalada após a válvula solenóide. A medição do fluxo do vazamento é feita manualmente por proveta e cronômetro.

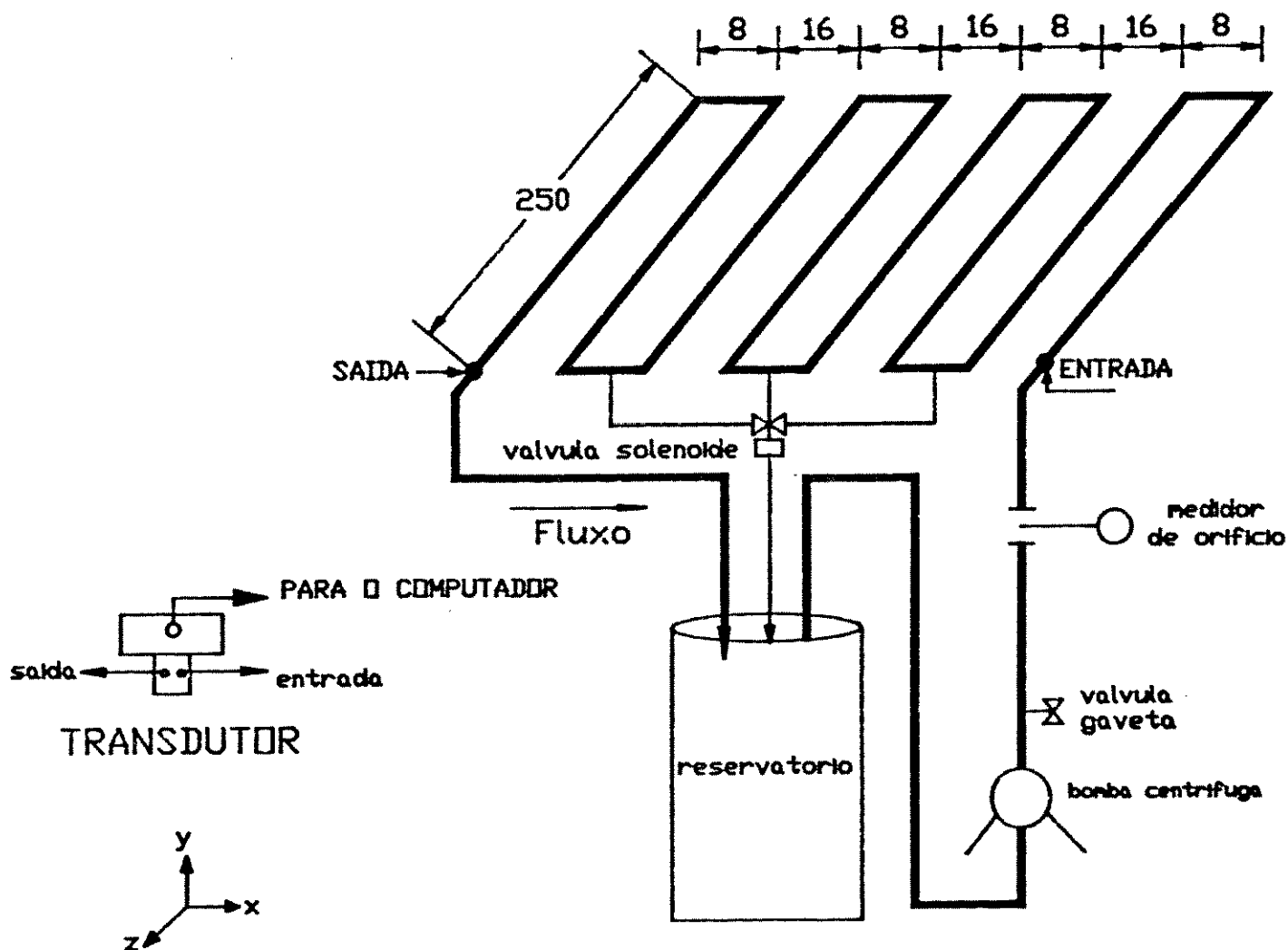


Fig. 4.1 - Esquema da Montagem Experimental

A água circula na tubulação em circuito fechado, ficando armazenada num tanque reservatório de capacidade de 50 litros e sendo succionada por uma bomba centrífuga.

A vazão de água na tubulação é medida por uma placa de orifício previamente calibrada e instalada na saída da bomba. Os dados e curva de calibração do medidor estão apresentados no apêndice C.

A queda de pressão é medida através de um transdutor-transmissor de pressão com tomadas de pressão no início e final da tubulação. O transdutor é calibrado utilizando um manômetro de mercúrio em U, e antes de ser conectado ao microcomputador é ligado a um circuito de amplificação e condicionamento de sinal.

4.3 - COMPONENTES DO EQUIPAMENTO

A aparelhagem experimental é dividida nos seguintes elementos:

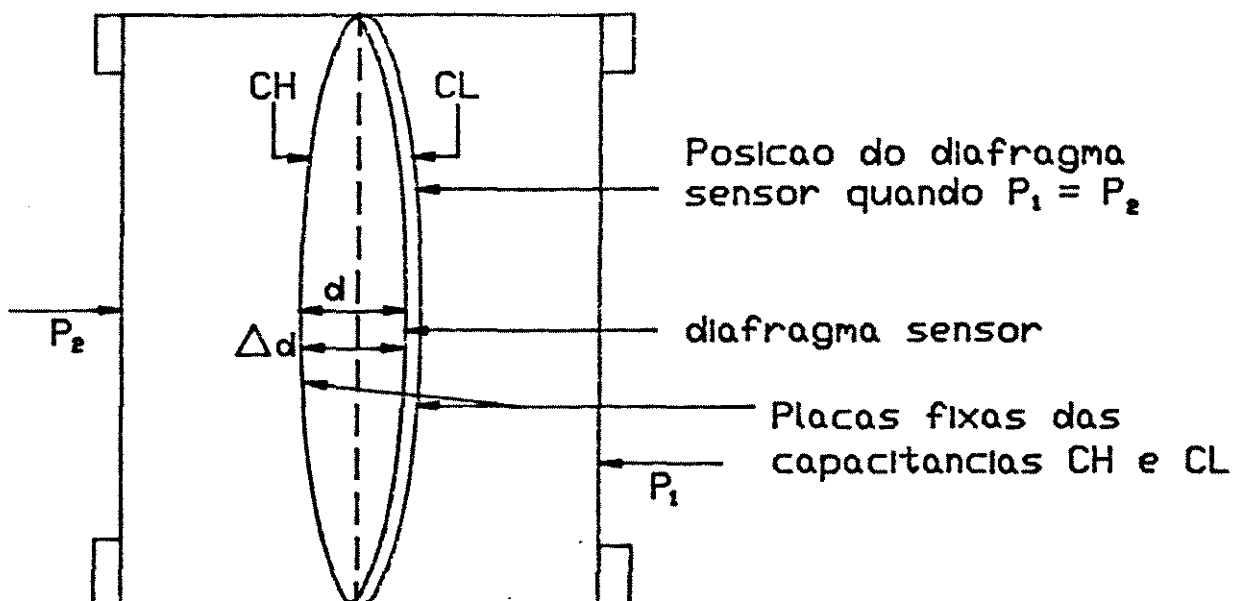
- Bomba centrífuga,
- Transdutor-transmissor de pressão,
- Circuito de amplificação e condicionamento de sinal,
- Placa analógica-digital,
- Placa digital-digital,
- Microcomputador.

4.3.1 - Bomba Centrífuga

A bomba centrífuga, da marca SCHNEIDER e modelo POP, permite obter uma vazão máxima de $220 \text{ cm}^3/\text{s}$. Após a bomba, foi instalada uma válvula gaveta, com conexão de $1/2''$, para poder fixar sua vazão num valor desejado.

4.3.2 - Transdutor-Transmissor de Pressão

Transdutores são dispositivos que convertem uma forma de energia em outra, transformando um tipo de impulso num sinal mais fácil ou conveniente de transmitir ou manipular. Nas medidas realizadas, foi utilizado um transdutor-transmissor de pressão da marca SMAR e modelo LD300. O sensor empregado é do tipo capacitivo (célula capacitiva), mostrado esquematicamente na Figura 4.2.



CH - Capacitancia medida entre a placa fixa do lado de P_1 e o diafragma sensor

CL - Capacitancia medida entre a placa fixa do lado de P_2 e o diafragma sensor

d - Distancia entre as placas fixas de CH e CL

Δd - Deflexao sofrida pelo diafragma sensor devido a aplicacao da pressao diferencial, $\Delta P = P_1 - P_2$

Fig. 4.2 - Célula Capacitiva

A célula capacitiva é um sensor de pressão constituído por dois capacitores de capacitâncias variáveis, conforme a pressão diferencial aplicada. A pressão atuando no diafragma provocará deflexão que causará variação no material dielétrico resultando em mudança na capacitância da unidade que é proporcional à variação da pressão diferencial.

Esses instrumentos são de alta voltagem de saída, amplitude e frequência e por isso são mais indicados e adequados para medidas dinâmicas, necessitando de condicionamento do sinal devido à geração de ruído, bem como serem compatibilizados com as características do computador que irá analisar os sinais.

4.3.3 - Circuito de Amplificação e Condicionamento de Sinal

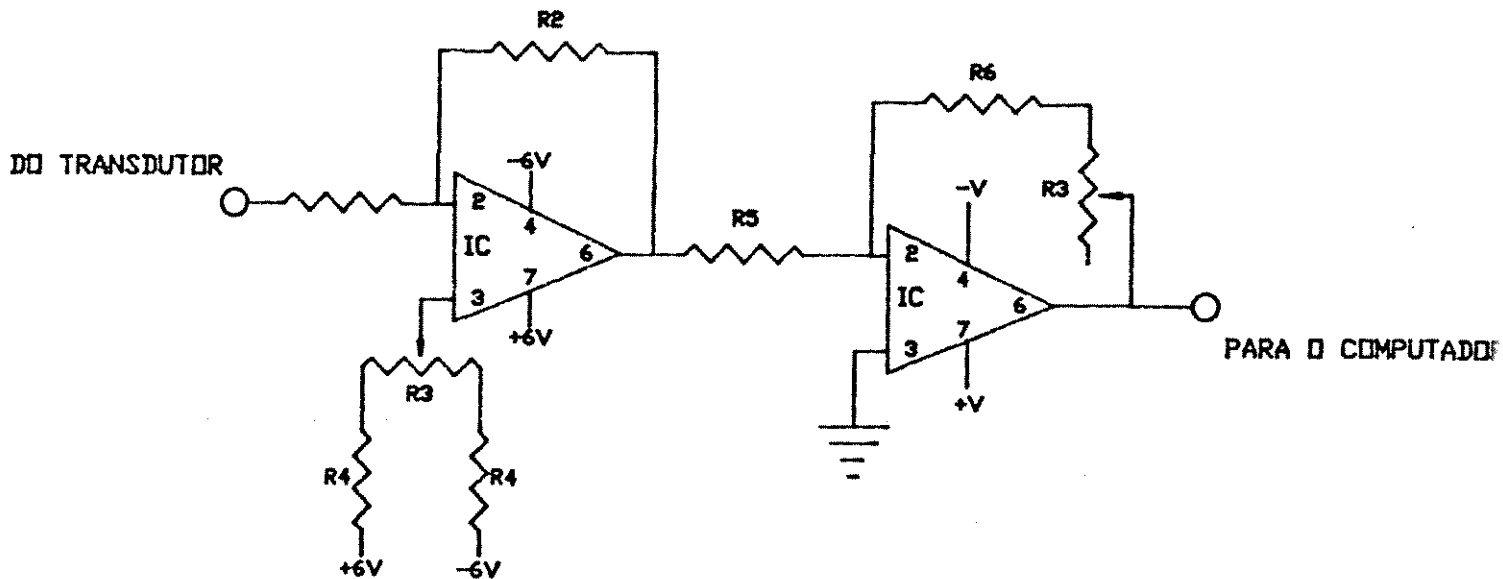


Fig. 4.3 - Circuito Condicionador e Amplificador de Sinal

O transdutor-transmissor de pressão produz um sinal de 0,7 a 0,8 V, referente a uma variação de pressão de 0 a 1360 mmH₂O. A fim de condicionar o sinal para se adaptar às características da placa de conversão analógica-digital, foi elaborado um circuito eletrônico de ajuste de zero e ganho variável, com a finalidade de converter o sinal na saída do transdutor-transmissor de pressão na faixa de 0,7 a 0,8 V para 0 a 5 V, embora na prática opere-se entre 0,5 e 4,5 V. O circuito eletrônico foi construído no laboratório e consiste basicamente de dois microcircuitos integrados do tipo 741, sendo apresentado na Fig. 4.3.

4.3.4 - Placa Analógica-Digital (A/D)

Os sinais medidos no processo são de natureza analógicas. Eles não podem ser utilizados diretamente pelo microcomputador, o qual requer que os dados estejam na forma digital (informações codificadas em palavras de 12 bits). Portanto, a interface entre o computador e o processo deve ser feita com um conversor analógico-digital. Para isso, foi instalada uma placa A/D da marca TAURUS, compatível com o microcomputador PC/XT.

O conversor analógico-digital de 12 bits comporta oito canais com *samplers* e *multiplexer*.

A pressão medida no processo é fornecida de forma contínua com o tempo pelo transdutor. Entretanto, o computador só pode manipular estas informações de forma discreta (em dados intervalos de tempos) porque o tempo gasto entre a aquisição de um e outro dado é finito.

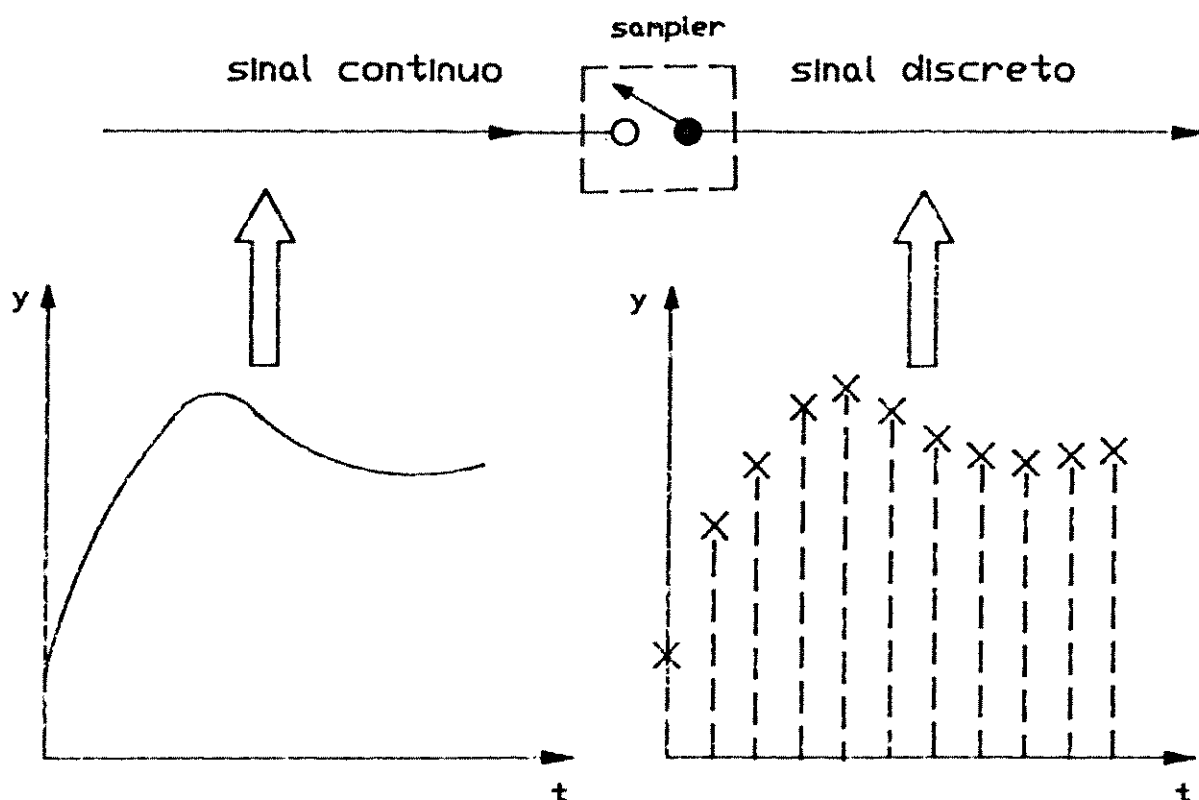


Fig. 4.3 - Conversão de sinal contínuo a discreto

Isto é conseguido através do uso de um *sampler*, que é simplesmente um interruptor que abre e fecha em intervalos discretos de tempo. Em outras palavras, um *sampler*, conforme Figura 4.4, permite que o microcomputador efetue a leitura de valores de um sinal analógico contínuo e produza uma sequência de valores amostrados em determinados instantes.

Quando for necessário converter um elevado número de diferentes sinais analógicos utiliza-se um *multiplexer*, como esquematizado na Figura 4.5. O *multiplexer* pode ser descrito como um interruptor eletrônico com várias portas, o qual é controlado pelo microcomputador. Sua utilização implica na leitura, se desejado, de várias

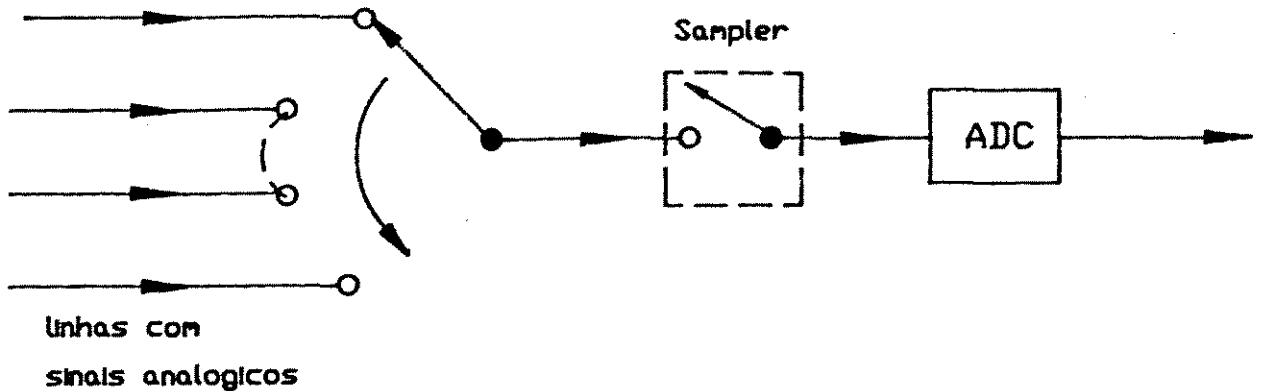


Fig. 4.4 - Conversor A/D com multiplexador

linhas transmissoras de sinais analógicos em uma sequência pré-fixada pelo usuário. A vantagem consiste no fato de se poder converter mais de um sinal analógico com apenas um conversor A/D. Assim, os oito canais de entrada correspondem a oito portas, podendo então se fazer a leitura de oito linhas de sinais analógicos.

O sinal analógico originado do transdutor-transmissor de pressão e circuito de amplificação e condicionamento de sinal em forma de voltagem está na faixa de 0 a 5 V. O princípio de operação do conversor A/D consiste na conversão de um sinal analógico em um sinal digital expresso como um número inteiro na forma binária. A resolução da conversão depende do número de bits usado pelo conversor para codificar um sinal analógico na forma digital. Para o conversor A/D de 12 bits, definem-se 2^{12} (4096) números inteiros, incluindo o zero, então a precisão da conversão expressa pelo valor da resolução é dada pela equação:

$$\text{Resolução} = \frac{5 - 0}{4096 - 1} 100 = 0,12 \%$$

Isto significa que quando dois valores de voltagem diferirem mais que 0,12 % do valor do intervalo de voltagem pré-fixado, o conversor irá distinguir os dois sinais e atribuirá dois diferentes números inteiros na forma binária para eles.

4.3.5 - Placa Digital-Digital (D/D)

Um sistema de controle por computador digital pode requerer entradas ou saídas digitais para manusear ou receber informações a respeito do estado de relés atuando em bombas, válvulas, lâmpadas e outros dispositivos *on* ou *off*. No nosso caso, é necessário introduzir uma saída digital para atuar na abertura ou fechamento da válvula solenóide, a qual é útil para simular o vazamento em estudo.

A saída digital é introduzida na placa (D/D) e acoplada à válvula solenóide. O sinal é recebido pelo acionamento de qualquer tecla através da chamada de uma sub-rotina em conjunto com o programa de aquisição de dados. A saída digital tem capacidade para comandar até oito relés, bastando para isto que se escolha o número binário adequado a uma dada saída.

Os sinais digitais são totalmente compatíveis com o microcomputador, sem necessidade de conversores especiais em interface. A transmissão de sinais digitais é feita em série e o tamanho de uma informação digital transmitida é uma palavra, ou seja, 12 bits para

um computador de 12 bits, como no nosso caso.

4.3.6 - Microcomputador

O microcomputador de trabalho é um PC/XT, marca HENGESYSTEM, modelo HSTURBO.

O computador digital utilizado para aquisição de dados em tempo real possui um relógio interno que permite a correta correspondência entre o tempo e as variáveis do processo analisado.

CAPÍTULO 5

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

5.1 - INTRODUÇÃO

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

Neste capítulo, será apresentada a técnica de aquisição de dados em tempo real via microcomputador, interfaceado ao experimento construído. Esta técnica é desenvolvida visando a análise da diferença de pressão em função do tempo tanto em regime estacionário como a partir da sucessão do vazamento numa dada posição da tubulação.

5.2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Como discutido no capítulo anterior, o sinal produzido pelo transdutor-transmissor de pressão está na faixa de 0,7 a 0,8 V, necessitando de ser condicionado a fim de adaptar-se às características da placa analógica-digital. Para esse propósito, foi apresentado o circuito de condicionamento e amplificação de sinal, baseado em amplificadores operacionais do tipo 741 de acordo com as características do conversor analógico-digital, que no nosso caso foi configurado para aceitar voltagens de 0 a 5000 mV. O conversor A/D recebe o sinal analógico de voltagem e transforma-o em sinal digital na faixa de 0 a 4096 números inteiros, conforme a relação linear:

$$SD = \frac{4096}{5000} SA \quad (5.1)$$

onde SA é o sinal analógico de voltagem enviado pelo transdutor-transmissor de pressão e circuito de amplificação e condicionamento de sinal e SD o sinal digital convertido pelo conversor A/D.

Este sinal digital será manipulado pelo microcomputador de acordo com as operações por ele executadas. Os sinais de saída serão convertidos em unidades de engenharia dentro do programa de aquisição de dados.

5.3 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR-TRANSMISSOR DE PRESSÃO

É possível relacionar a pressão manométrica diferencial com a voltagem fornecida pelo transdutor-transmissor de pressão acoplado ao circuito de amplificação e condicionamento de sinal através da curva de calibração.

A curva de calibração é obtida sempre no início do experimento, efetuando-se medidas de voltagem no instrumento de medição de pressão diferencial (transdutor-transmissor de pressão) e leituras de pressão diretamente do tubo manométrico, variando-se a vazão da bomba centrífuga de um mínimo valor até um máximo a fim de cobrir uma ampla faixa de pressão. Com esses dados coletados, constrói-se a curva de pressão versus voltagem, fornecendo uma relação linear do tipo: $H = A_1 + A_2V$, conforme pode ser visto na Fig. 5.1, onde H é a diferença de pressão medida pelo manômetro de mercúrio nas extremidades de entrada e saída da tubulação em mmHg, V a diferença de potencial medida pelo transdutor-transmissor de pressão em voltagem e A_1 e A_2 as constantes obtidas por regressão linear da

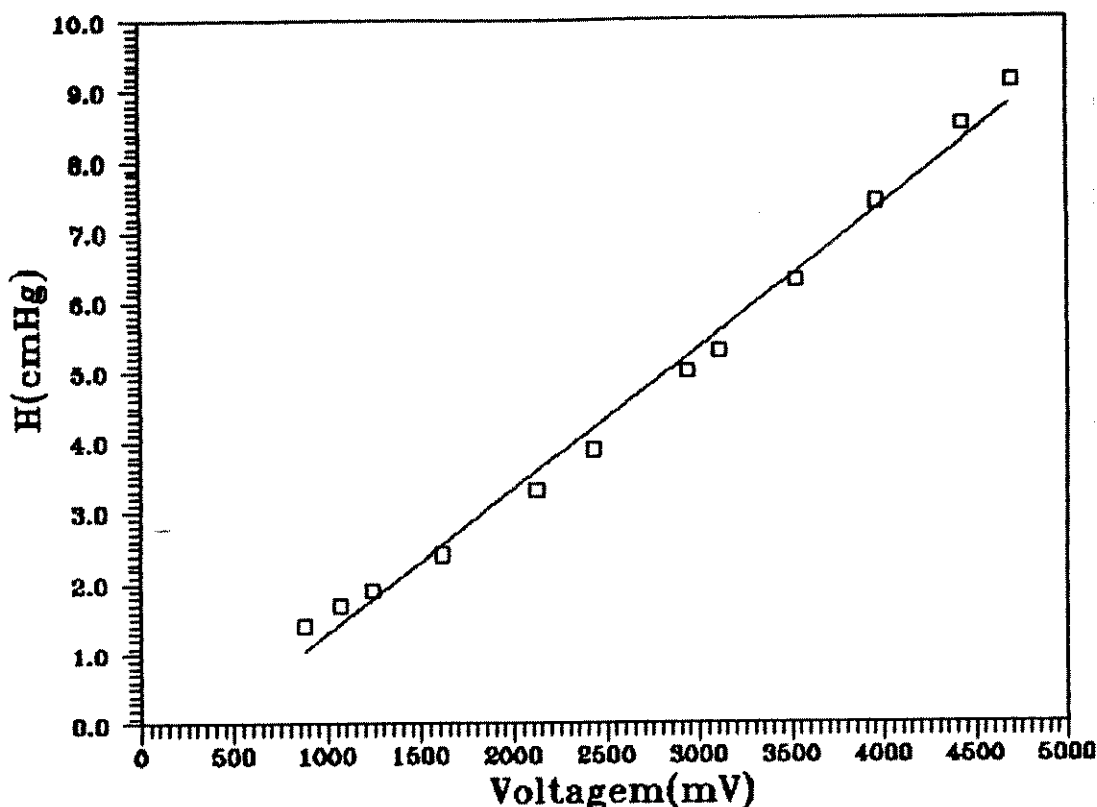


Fig. 5.1 - Curva de Calibração do Transdutor-Transmissor de Pressão

curva experimental de pressão versus tensão. De um modo geral, A_1 e A_2 têm valores de -2,5 e 0,0025 respectivamente. De posse dessa curva, os valores de tensão são transformados em pressão, os quais são arquivados podendo ser apresentados ao usuário em forma de tabelas ou gráficos.

5.4 - INTERVALO DE AMOSTRAGEM

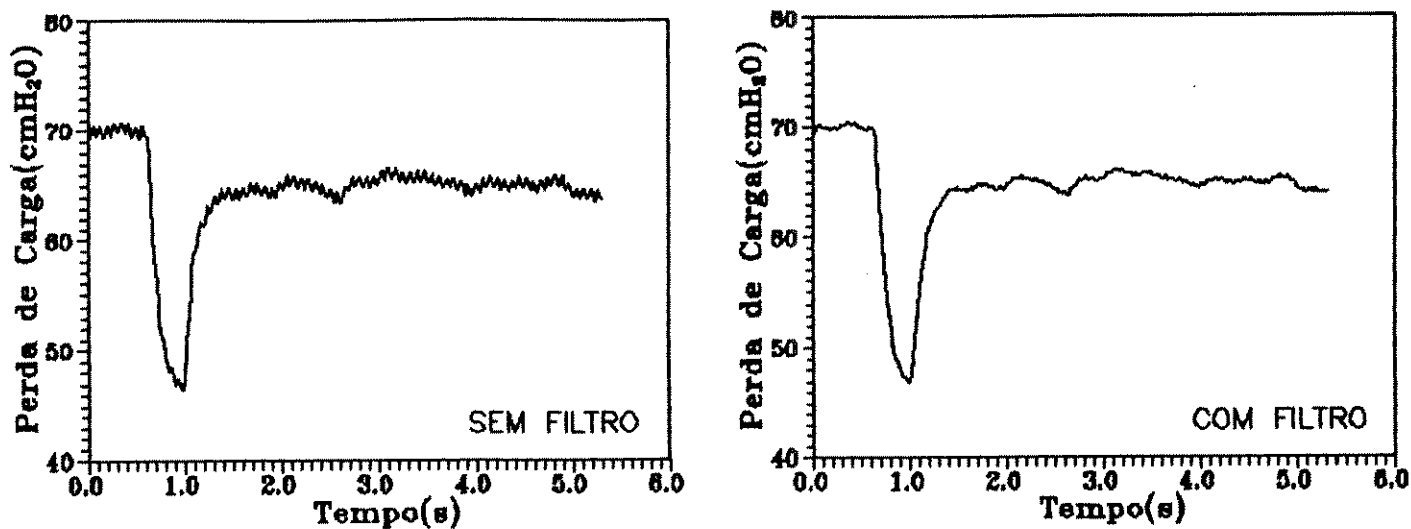
O tempo gasto para aquisição de cada sinal vindo do transdutor-transmissor e circuito de amplificação e condicionamento de sinal é de 0,38 ms. Este é o tempo gasto para a execução de cada passo

dentro do laço de leitura no programa de aquisição de dados. Nesse laço existem cálculos e atribuições que não fazem parte da leitura em si, mas são necessários para o condicionamento e conversão dos sinais analógicos em unidades de engenharia e contribuem para um atraso na leitura de cada valor. Por isso, é necessário determinar esse tempo, a fim de estabelecer uma correta correspondência entre as variáveis do processo.

Este valor foi obtido cronometrando-se o tempo gasto para a leitura de um determinado número de dados, e em seguida é estabelecida uma relação proporcional entre este número de dados e apenas um. Com o tempo gasto para a aquisição de um dado, é possível relacionar o número de pontos adquiridos com a variável tempo.

Verificou-se que o sinal recebido apresenta oscilações devidas a pulsações da bomba centrífuga e outras variações inerentes ao processo de bombeamento. Esta oscilação indica um período de 40 leituras. A fim de se eliminar o efeito de oscilação, calcula-se a média a cada 40 pontos amostrados, ou seja, um ponto exposto na tela do vídeo representa uma média de 40 dados de leitura do processo.

Conforme observado na Figura 5.2, mesmo utilizando a média dos dados referentes a 40 pontos, observam-se variações nesses valores. Por isso, é necessário adotar-se um método de solucionar esse problema efetivamente, a fim de permitir um estudo mais adequado dos resultados. Para esse propósito adotou-se uma técnica de condicionamento através da filtragem matemática dos dados, introduzido no próprio algoritmo de aquisição dos dados. A metodologia é apresentada a seguir.



(a) Sem Filtro

(b) Com Filtro

Fig. 5.2 - Comparação entre os dados obtidos sem e com filtro

5.5 - FILTRAGEM DE DADOS

O transiente hidráulico causado por vazamentos pode ser confundido por ruídos devidos a operações normais da tubulação, por exemplo, parada e partida de bombas, fechamento de válvulas, ou até mesmo pequenas oscilações de vazão do processo. Para diferenciar entre estes diferentes tipos de sinais, é necessário adotar um método de filtragem de dados acoplado ao sistema de aquisição de dados, com o objetivo de minimizar oscilações nos sinais recebidos. A seguir, serão apresentadas as técnicas de filtragem de sinais, e em seguida será discutida aquela introduzida no programa de aquisição de dados.

5.5.1 - 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:

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t) \quad (5.2)$$

onde x é o valor medido, y o valor filtrado e τ , uma constante de tempo do filtro.

5.5.2 - Filtros Digitais

Nesta seção, iremos apresentar os principais tipos de filtros digitais que se utilizam para condicionar os sinais digitais enviado 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, como se um filtro exponencial simples atuasse no sinal de saída de outro.

5.5.2.1 - Filtro Exponencial Simples

Vamos denotar as variáveis medidas do experimento como x_{n-1} , x_n ... e os correspondentes valores filtrados como y_{n-1} , y_n ..., onde n

refere-se a amostragem corrente instantânea. A equação diferencial no passo de tempo n pode ser aproximada pela diferença finita em dois passos de tempos sucessivos:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t} \quad (5.3)$$

Substituindo 5.2 em 5.3 e modificando $y(t)$ por y_n e $x(t)$ por x_n temos:

$$\tau_F \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t} + y_n = x_n \quad (5.4)$$

Rearranjando:

$$y_n = \frac{\Delta t}{\tau_F + \Delta t} x_n + \frac{\tau_F}{\tau_F + \Delta t} y_{n-1} \quad (5.5)$$

Vamos definir:

$$\alpha = \frac{1}{\tau_F / \Delta t + 1} \quad (5.6)$$

onde $0 < \alpha \leq 1$. Então:

$$1 - \alpha = 1 - \frac{1}{\tau_F / \Delta t + 1} = \frac{\tau_F}{\tau_F + \Delta t} \quad (5.7)$$

Portanto:

$$y_n = \alpha x_n + (1-\alpha)y_{n-1} \quad (5.8)$$

A última equação indica que o valor filtrado é uma soma ponderada do corrente valor medido x_n e o valor filtrado a amostragem no instante anterior y_{n-1} . Esta operação é também chamada de suavização única exponencial. Casos limitantes para α são:

$\alpha = 1$: não filtragem (o resultado do filtro é a própria medida)

$\alpha = 0$: a medição é ignorada

5.5.2.2 - Filtro Exponencial Duplo

Um outro filtro digital é o exponencial duplo ou de segunda ordem, que oferece algumas vantagens pela eliminação de ruídos de maiores frequências. O filtro de segunda ordem é equivalente a dois filtros de primeira ordem em série, isto é, trata do sinal de saída do filtro exponencial na eq. 5.8. O filtro de segunda ordem pode ser expresso como:

$$\bar{y}_n = \gamma y_n + (1-\gamma)\bar{y}_{n-1} \quad (5.9)$$

$$\bar{y}_n = \gamma \alpha x_n + \gamma(1-\alpha)y_{n-1} + (1-\gamma)\bar{y}_{n-1} \quad (5.10)$$

Escrevendo a equação do filtro na eq. 5.9 para o instante de amostragem anterior, temos:

$$\bar{y}_{n-1} = \gamma y_{n-1} + (1-\gamma)\bar{y}_{n-2} \quad (5.11)$$

Isolando y_{n-1} :

$$y_{n-1} = \frac{1}{\gamma} \bar{y}_{n-1} - \frac{1-\gamma}{\gamma} \bar{y}_{n-2} \quad (5.12)$$

Substituindo 5.12 em 5.10 e rearranjando, obtem-se a seguinte equação para o filtro exponencial duplo:

$$\bar{y}_n = \gamma \alpha x_n + (2-\gamma-\alpha)\bar{y}_{n-1} - (1-\alpha)(1-\gamma)\bar{y}_{n-2} \quad (5.13)$$

Uma simplificação comum é considerar $\gamma = \alpha$, fornecendo:

$$\bar{y}_n = \alpha^2 x_n + 2(1-\alpha)\bar{y}_{n-1} - (1-\alpha)^2 \bar{y}_{n-2} \quad (5.14)$$

A vantagem do filtro exponencial duplo sobre o exponencial simples é que este fornece melhor filtragem de maiores frequências de ruídos especialmente se $\gamma = \alpha$ e a desvantagem é a forma mais complicada da equação de segunda ordem, mas isso não chega a ser um empecilho, e portanto no nosso trabalho optou-se pelo uso desse último tipo de filtro, no qual se conseguem melhores resultados.

Após estudos com diferentes valores da constante α , concluiu-se que um valor intermediário de 0,5 produz melhores resultados. Logo, a medida filtrada é resultado de uma média ponderada entre o corrente valor medido x_n e os valores filtrados nos instantes anteriores \bar{y}_{n-1} e \bar{y}_{n-2} .

No primeiro e segundo instante de leitura, é necessário considerar o valor filtrado como sendo o próprio valor lido, já que a equação do filtro duplo exponencial utiliza a medida filtrada nos dois instantes anteriores (\bar{y}_{n-1} e \bar{y}_{n-2}), conforme se observa na eq. 5.14, e portanto, naqueles instantes, estes valores não existem. A partir do terceiro valor lido, a filtragem é feita através da equação do filtro duplo exponencial.

5.6 - PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

O programa para aquisição de dados, versão 1.0, mostrado no apêndice A, foi escrito em linguagem de programação turbo C e apresenta as seguintes etapas:

- leitura e filtragem dos dados no regime estacionário,
- construção do gráfico para o regime estacionário,
- abertura da válvula solenóide,
- leitura e filtragem dos dados no regime transiente,
- construção do gráfico para o regime transiente,
- fechamento da válvula solenóide,
- escolha de uma entre as três opções: início do processo, arquivo de resultados e retorno ao programa de aquisição de dados.

A leitura e filtragem dos dados é feita através da sub-rotina leitura(). A leitura utiliza a sub-rotina read_anl(), onde é

fornecido como parâmetro de entrada o número do canal ao qual está ajustado o multiplexador e esta retorna o valor da conversão. A filtragem dos dados, conforme exposto acima, é conduzida através da equação do filtro duplo exponencial com α igual a 0,5.

A abertura ou fechamento da válvula solenóide é realizada pela sub-rotina `write_dig()`, onde o parâmetro fornecido é 0 (zero) ou 1 (um), conforme se deseja abrir ou fechar a válvula respectivamente.

As sub-rotinas `read_anl()` e `write_dig()` foram fornecidas pelo fabricante da placa AD/DA e adaptadas para uso do programa de aquisição de dados. Estas funcionam em conjunto com outras sub-rotinas de tratamento AD/DA, como componentes do programa de aquisição de dados.

A construção do gráfico é feita em duas etapas: primeiramente uma sub-rotina chamada `eixos()` traça os eixos x e y, em seguida outra, que utilizando os dados adquiridos pela sub-rotina `leitura()`, desenha o ponto, tendo-se introduzido a abscissa x e ordenada y, previamente convertidas em unidades compatíveis com as coordenadas da tela gráfica.

Após a construção do gráfico no regime transiente, dependendo da opção escolhida, serão arquivados os dados obtidos, reiniciado ou finalizado o sistema de aquisição de dados.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E ANÁLISE

6.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos pelos programa de simulação e sistema de aquisição de dados em tempo real. Estes resultados servirão para análise individualmente e comparação entre si. O objetivo da análise é permitir um estudo detalhado das variáveis que afetam diretamente o fenômeno do vazamento, a fim estabelecermos um conclusão a respeito dos problemas de detecção e localização do vazamento numa tubulação.

6.2 - SIMULAÇÃO DE VAZAMENTO EM TUBULAÇÕES

O programa computacional para simulação do processo foi escrito em linguagem turbo C. O objetivo desse programa é fornecer o perfil da pressão e velocidade do fluido ao longo da tubulação em função do tempo, quando se sucede um vazamento com uma determinada vazão e posição de ruptura da tubulação.

Para isso, foi elaborado um programa com as seguintes etapas:

- Introdução dos dados,
- Cálculo do regime estacionário,
- Cálculo do regime transiente.

Os dados utilizados, conforme seus valores da montagem experimental estão apresentados na tabela 6.1.

O módulo de elasticidade do PVC rígido (E) foi retirado da referência 5, e a relação de Poisson (μ) da ref. 6 juntamente com o

Tabela 6.1 - Características da tubulação e do fluido

Dados do tubo	Dados da água
$L_{eq} = 36.75 \text{ m}$	$\rho = 1 \text{ g/cm}^3$
$D = 2.127 \text{ cm}$	$\mu = 1 \text{ cp}$
$\epsilon = 0.25 \text{ cm}$	$K = 2.19 \text{ GPa}$
$E = 3.00 \text{ GPa}$	
$\mu = 0.46$	

módulo de elasticidade da água (K). As outras propriedades da água (densidade e viscosidade) foram consideradas de fato conhecidas.

6.2.1 - Determinação do Comprimento Equivalente da Tubulação

O comprimento do tubo reto é de 20 m. Entretanto, como descrito no capítulo referente à montagem experimental, a tubulação consta de várias curvas padrões de 90°, por isso é necessário determinarmos o comprimento equivalente da mesma considerada. Foi realizado um experimento com este objetivo. O experimento foi feito variando-se a vazão da bomba, lendo-se as pressões manométricas do medidor de orifício e do tubo em U, que mede a perda de carga nas extremidades de entrada e saída da tubulação.

Através da análise da equação 6.1, observa-se que a perda de carga é uma função linear de $V^2 f$. Portanto, o gráfico de ΔH vs $V^2 f$ (Fig. 6.1) nos fornece uma reta que passa pela origem e de coeficiente angular igual a $L/2gD$. Através do coeficiente angular dessa reta, obtém-se o comprimento equivalente experimentalmente que inclui o comprimento de tubo reto mais o relativo aos acidentes.

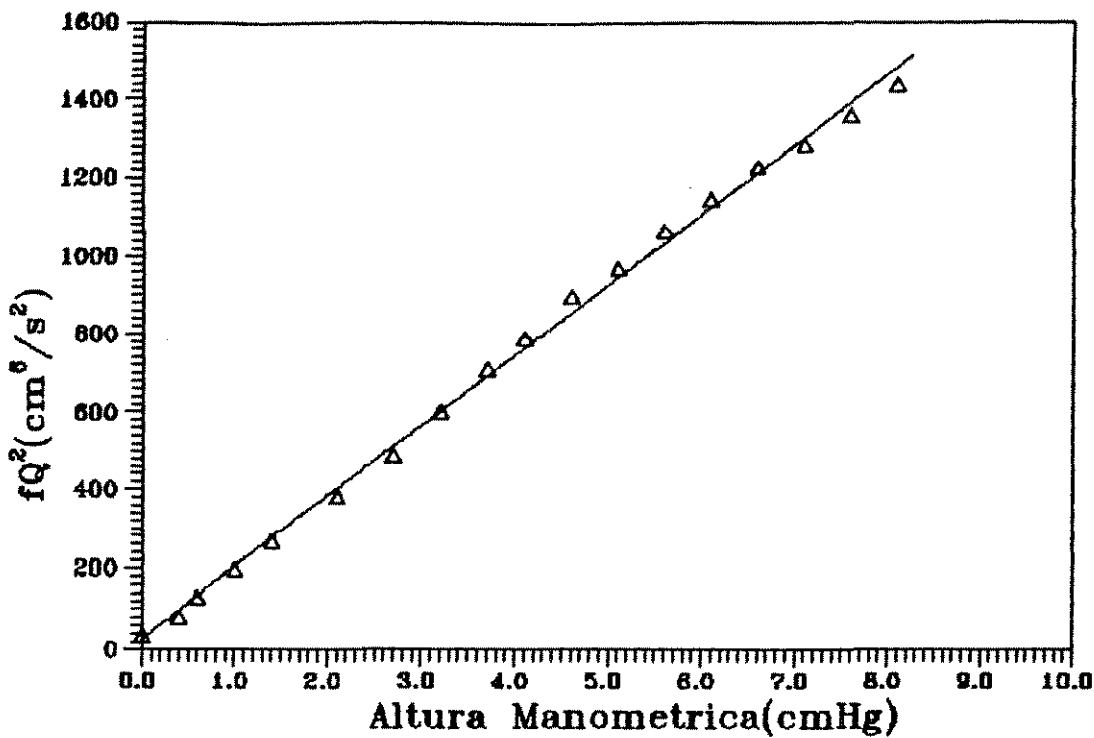


Fig. 6.1 - Gráfico para a determinação do Comprimento Equivalente

6.2.2 - Análise do Regime Estacionário de Escoamento

No regime estacionário, a equação de perda de carga descreve o perfil da queda de pressão ao longo de uma tubulação reta em função da velocidade do fluido.

$$\Delta H = \frac{fLV^2}{2gD} \quad (6.1)$$

onde ΔH é a perda de carga entre um determinado ponto a uma distância x e outro medido, V a velocidade do fluido no regime estacionário e f o fator de atrito calculado pela equação de Churchill.

Com a equação acima, determina-se o perfil da pressão ao longo do conduto no instante $t = 0$ para um tubo reto.

6.2.3 - Análise do Regime Transiente de Escoamento

A partir do instante de ruptura da tubulação, é estabelecido um transiente hidráulico. As equações que regem o fenômeno foram apresentadas no capítulo 2. Estas equações serão resolvidas pelo método das características com intervalo de integração dado por:

$$\Delta t = \frac{L}{an} \quad (6.2)$$

onde n é o número de divisões da tubulação (igual a 100 unidades) e a a velocidade da onda no transiente hidráulico calculada pela equação de Streeter-Wylie.

O cálculo do regime transiente provocado pelo vazamento é feito primeiramente com a determinação das variáveis nos pontos internos das fronteiras ao longo do tubo reto, e em seguida é necessário definir as condições de contorno do problema em estudo. Para um caso geral de processo de transporte de fluido, tem-se um reservatório localizado a montante, uma válvula a jusante e um vazamento numa posição intermediária. As equações dessas condições de contorno foram apresentadas no capítulo 4. Assim, o perfil das variáveis em toda extensão da tubulação é determinado.

Para realizar uma análise mais apurada, é necessário um estudo dos resultados numa ampla faixa valores. Por isso, variou-se o número de Reynolds (Re) em 6000, 8000, 10000 e 12000, e a vazão de vazamento em 10, 20, 30, 40 e 50 % da vazão nominal do fluxo. A posição do vazamento foi definida em 5, 10 e 15 m da entrada da tubulação. Todos estes valores foram utilizados em função de terem sido adotados no experimento. Os resultados estão ilustrados a

partir da Fig. 6.2.

Figs. 6.2 a 6.6.13 - Gráficos de Perda de carga vs Tempo, para os Resultados do cálculo de simulação

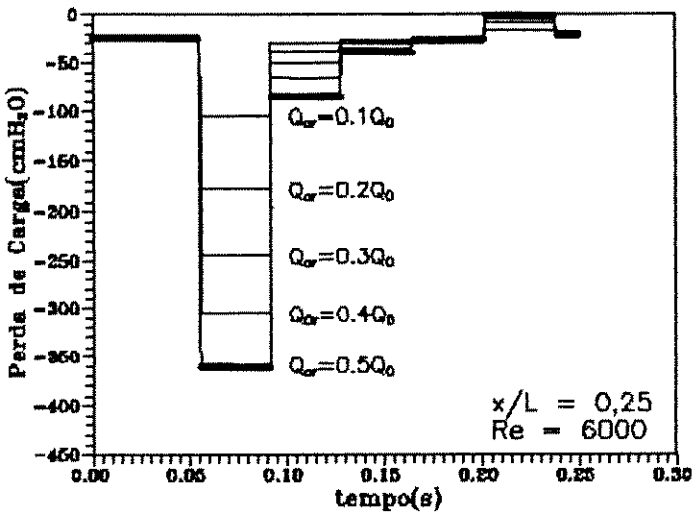


Fig. 6.2

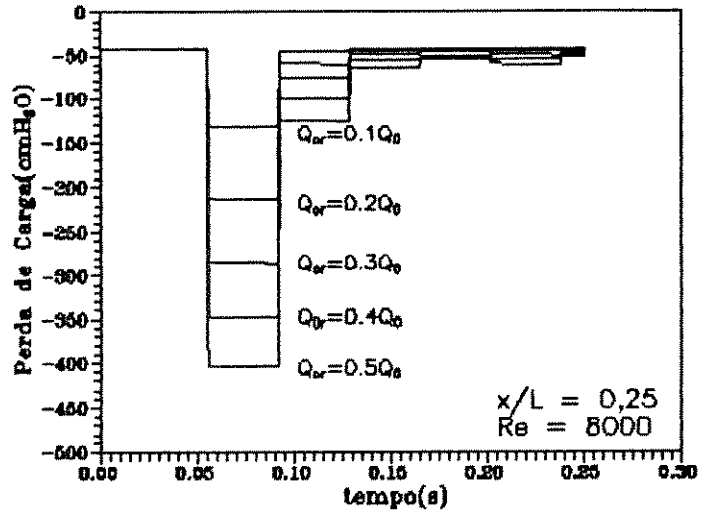


Fig. 6.3

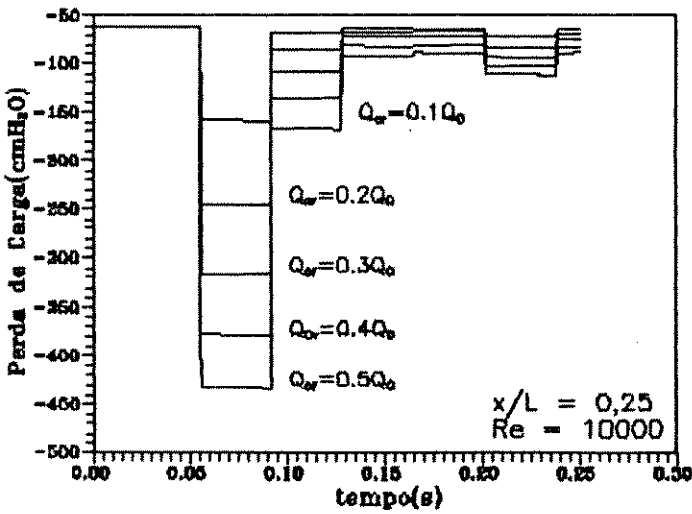


Fig. 6.4

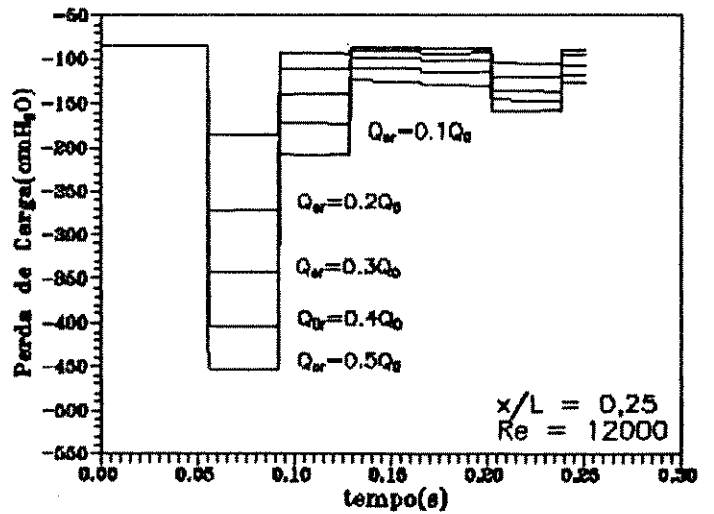


Fig. 6.5

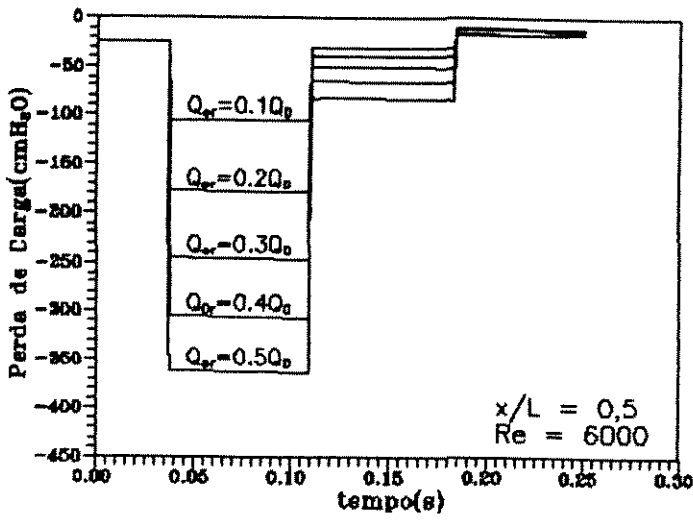


Fig. 6.6

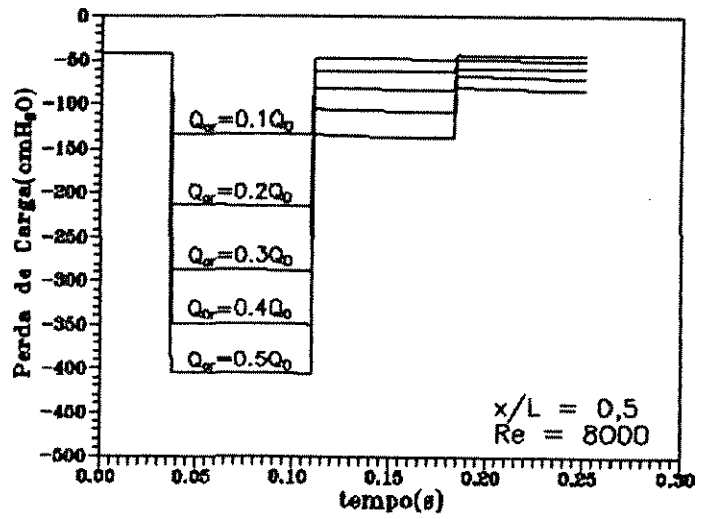


Fig. 6.7

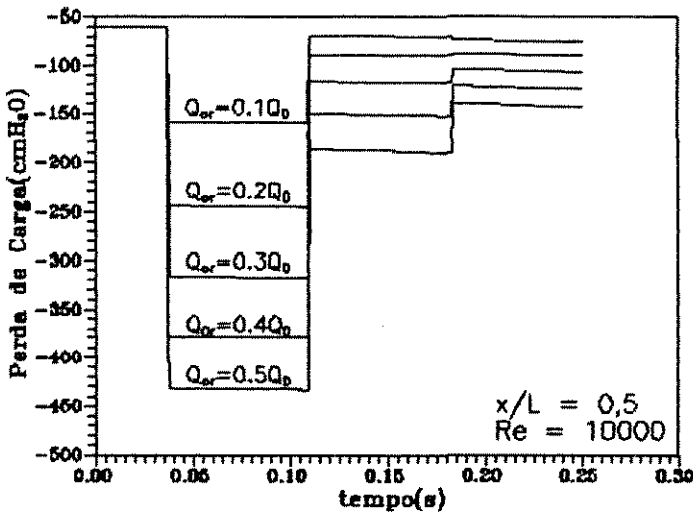


Fig. 6.8

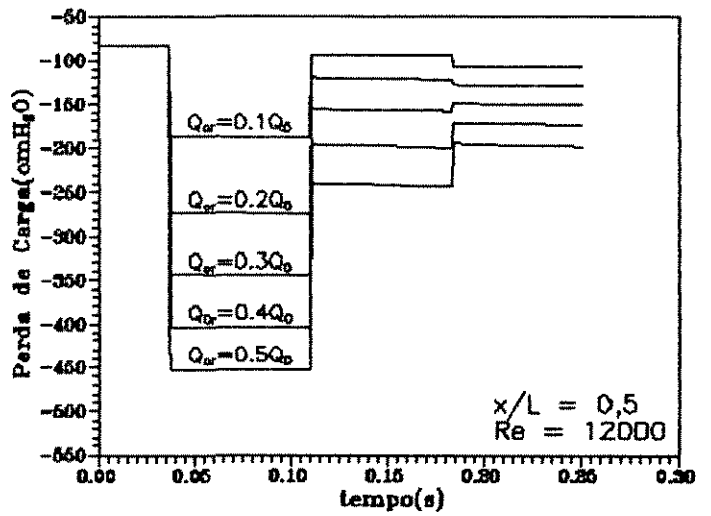


Fig. 6.9

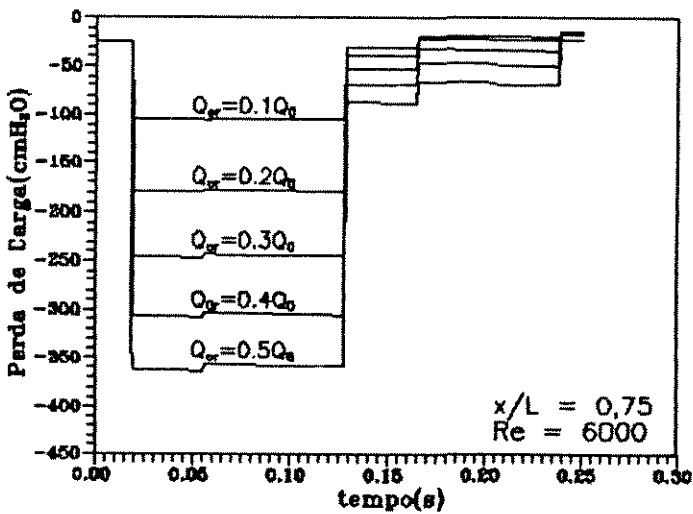


Fig. 6.10

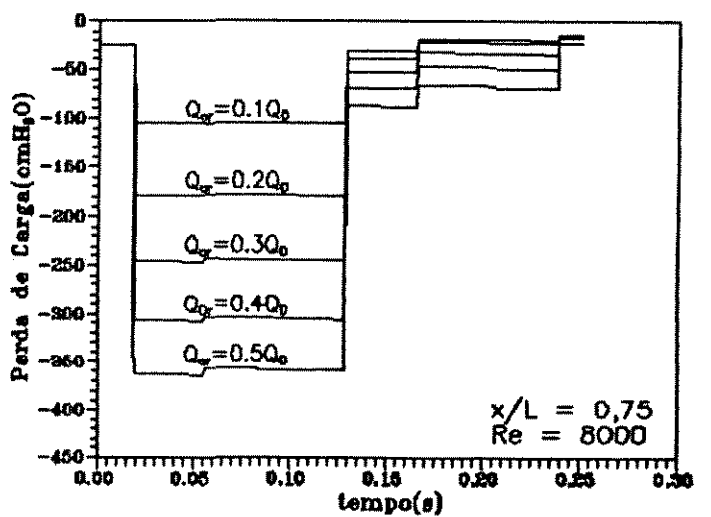


Fig. 6.11

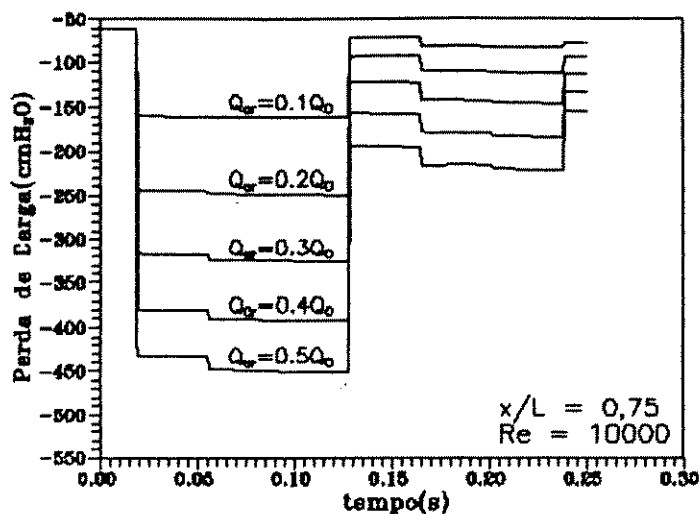


Fig. 6.12

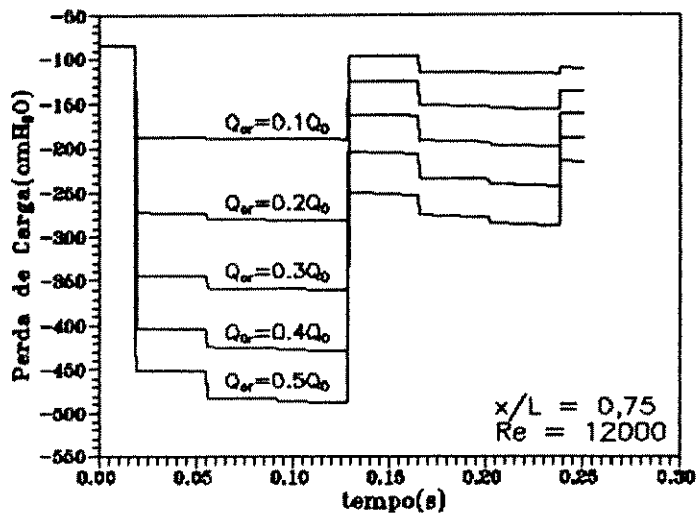


Fig. 6.13

6.3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais foram obtidos pelo sistema de aquisição de dados por computador, conforme mostrado no capítulo anterior. Os dados de pressão foram coletados em tempo real a partir da abertura da válvula solenóide.

Para o estudo dos dados, deverá ser feito o experimento com vários números de Reynolds e vazões de vazamento em diferentes posições, conforme a montagem do equipamento. A válvula solenóide e a válvula gaveta são acopladas em uma das três saídas laterais fixas na tubulação. A faixa de trabalho desses parâmetros estão apresentados na Tab. 6.2.

Tabela 6.2 - Faixa de valores operacionais

Vazão nominal de fluido(cm^3/s)				Número de Reynolds(Re)
100				6000
133				8000
167				10000
200				12000
Vazão de vazamento(cm^3/s)				Razão de vazamento(Q_v/Q_0)
Re				0,1
6000	8000	10000	12000	0,2
10	13,3	16,7	20	0,3
20	26,6	33,4	40	0,4
30	40	50	60	0,5
40	53,2	66,8	80	
50	66,5	83,5	100	
Posição do vazamento(m)				x/L
0				0
5				0,25
10				0,5
15				0,75

A sistemática experimental é, estando a bomba ligada, fixar uma vazão da água, ou número de Reynolds, correspondente a uma determinada altura manométrica do medidor de orifício previamente calibrado e iniciar o programa de aquisição de dados. A tela do monitor de vídeo fornece uma instrução para acionar uma tecla e iniciar a leitura de dados. Imediatamente, os dados em regime estacionário são mostrados em forma de gráfico de diferença de pressão (perda de carga) versus tempo, indicando um valor constante.

O procedimento é seguido sempre através de instruções no vídeo, as quais determinam o início do regime transiente, acionando-se uma tecla que enviará uma ordem para a válvula solenóide ser aberta, caracterizando o vazamento (o sinal digital enviado pelo microcom-

putador será convertido em sinal analógico, correspondente a 5 volts, pela placa digital-analógica, que irá atuar na abertura da válvula solenóide). Os dados são lidos e mostrados na tela gráfica do monitor de vídeo e posteriormente arquivados para estudos posteriores.

Em cada posição do vazamento e vazão do processo, procurou-se determinar a menor vazão de vazamento possível de se observar a variação do perfil de pressão, ora constante, a qual caracteriza o vazamento. Isto é feito para se obter a mínima vazão de vazamento detectável. A vazão do vazamento é ajustada através de uma válvula gaveta instalada após à válvula solenóide.

O mesmo procedimento é realizado, ajustando-se a vazão do vazamento em 10, 20, 30, 40 e 50 % da vazão nominal do processo, variando-se o Re em 8000, 8000, 10000 e 12000, garantindo-se o estabelecimento do regime de fluxo turbulento.

Após todos esses experimentos, o conjunto válvula solenóide e válvula gaveta é transferido para outra saída lateral, e o mesmo procedimento é repetido.

Os resultados adquiridos estão apresentados em forma de gráficos de diferença de pressão versus tempo a partir da Fig. 6.14.

Figs. 6.14 a 6.109 - Gráfico de Perda de Carga vs Tempo,
para os resultados experimentais
obtidos por aquisição de dados

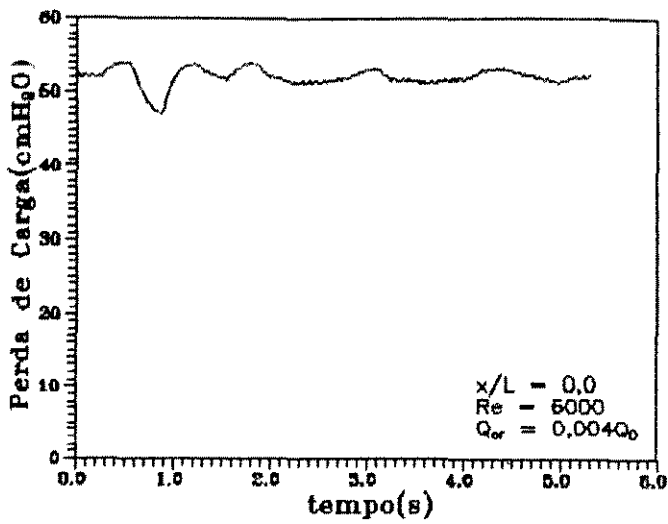


Fig. 6.14

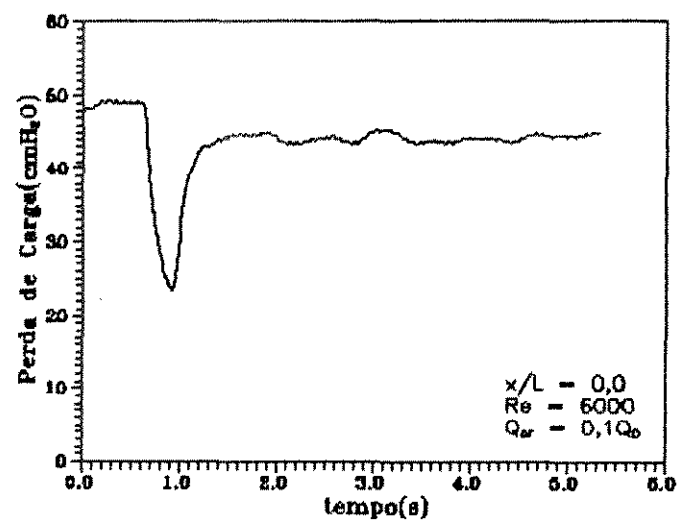


Fig. 6.15

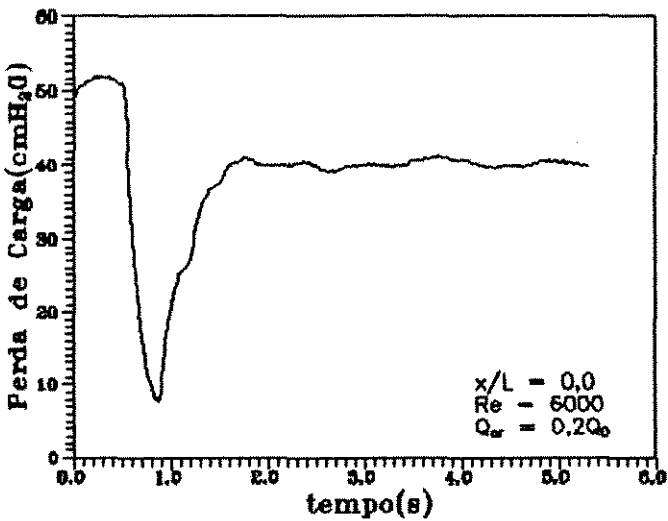


Fig. 6.16

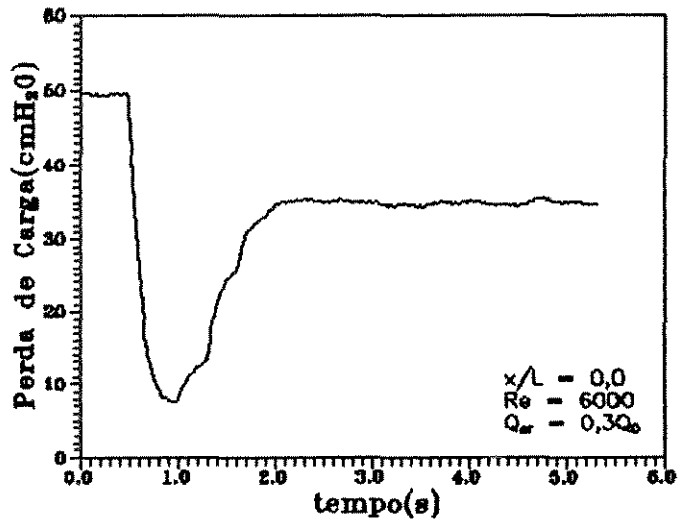


Fig. 6.17

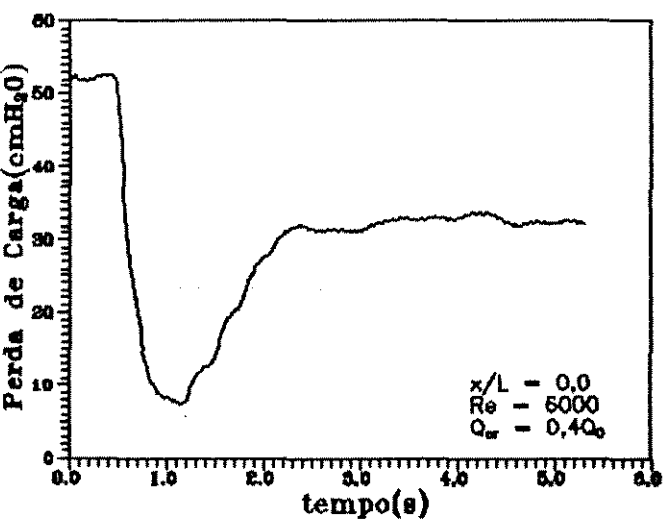


Fig. 6.18

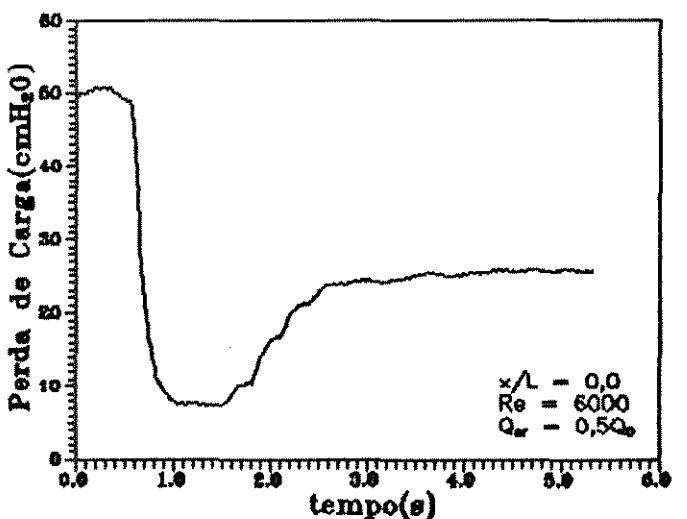


Fig. 6.19

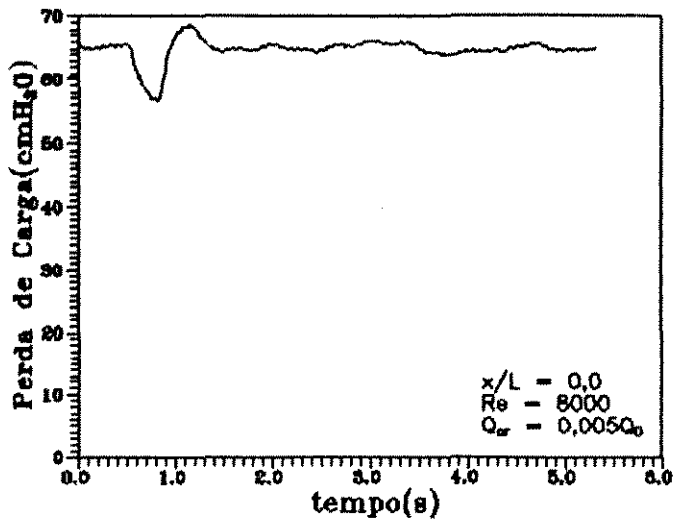


Fig. 6.20

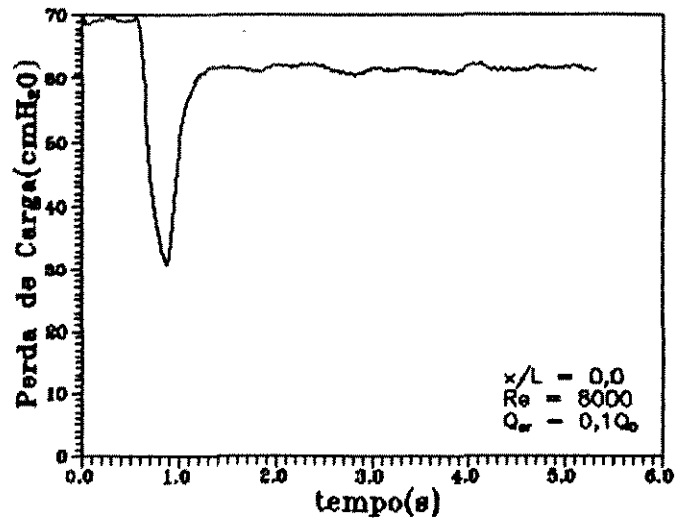


Fig. 6.21

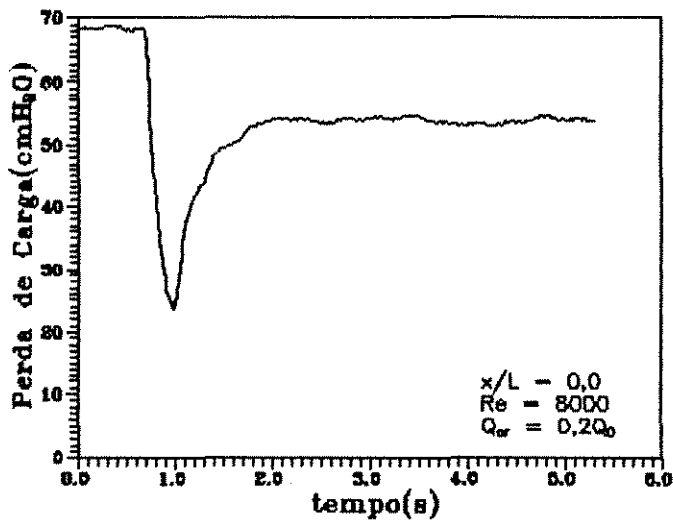


Fig. 6.22

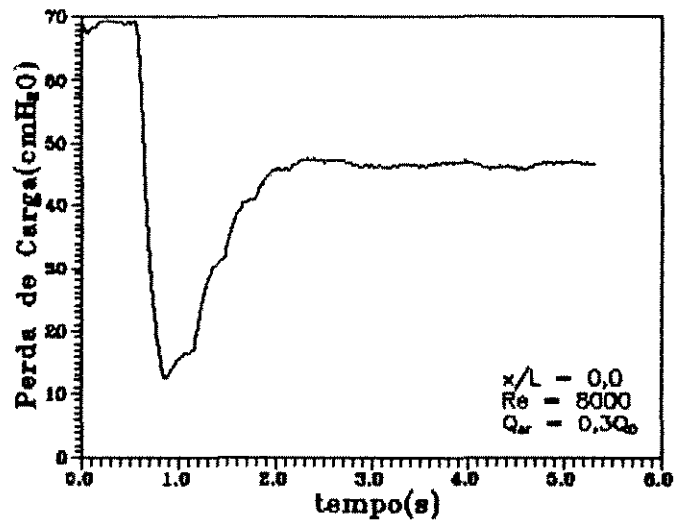


Fig. 6.23

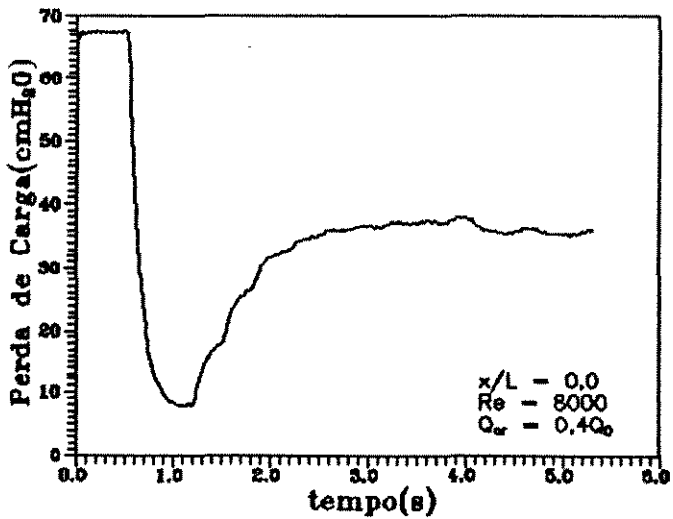


Fig. 6.24

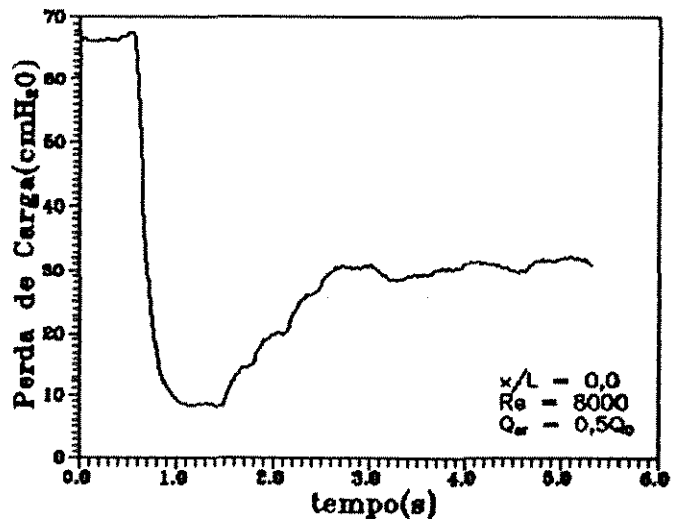


Fig. 6.25

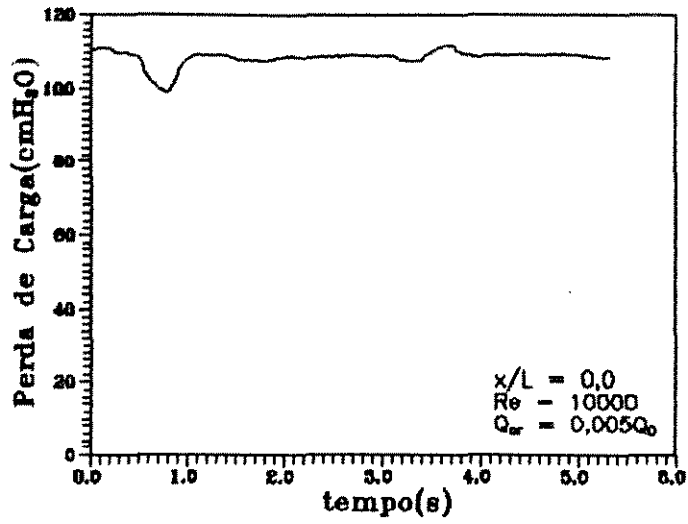


Fig. 6.26

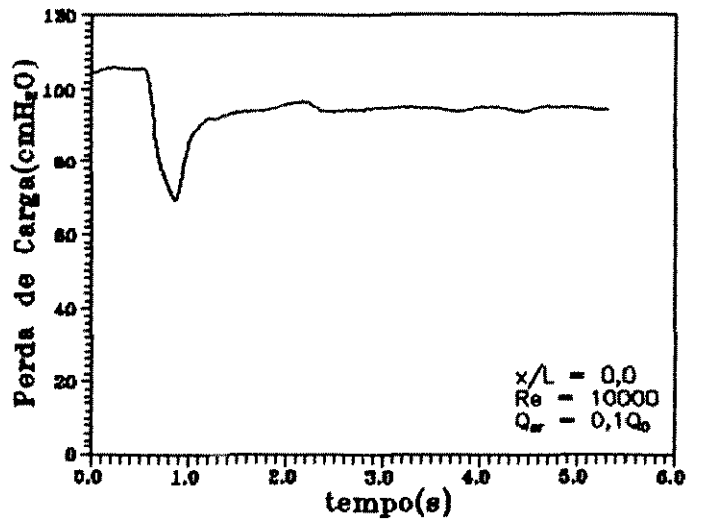


Fig. 6.27

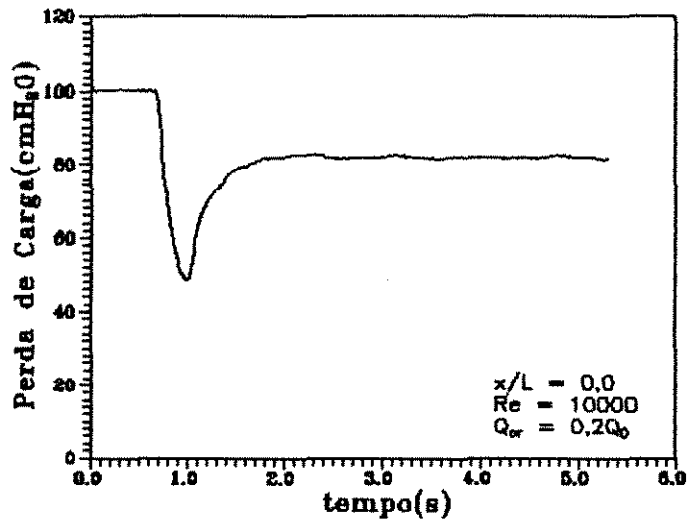


Fig. 6.28

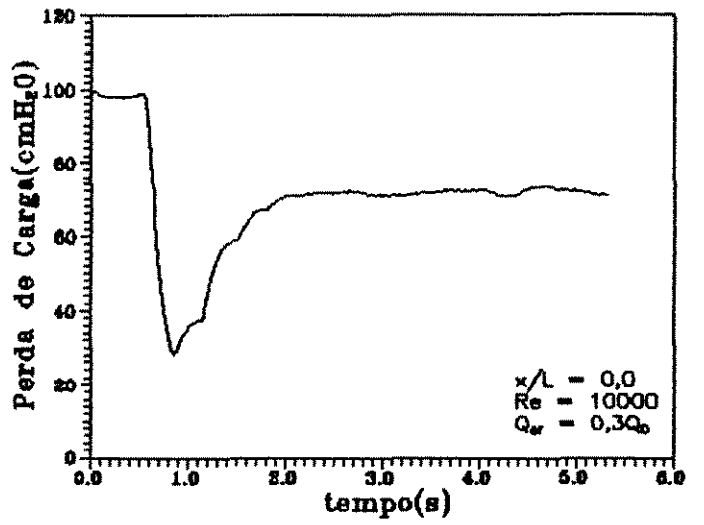


Fig. 6.29

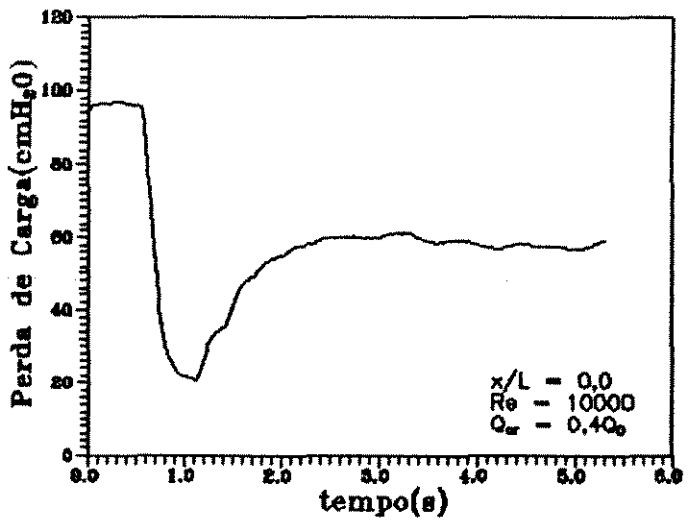


Fig. 6.30

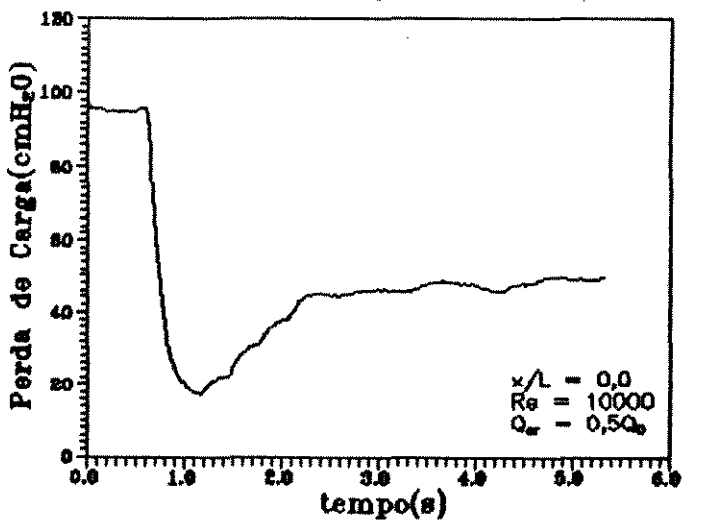


Fig. 6.31

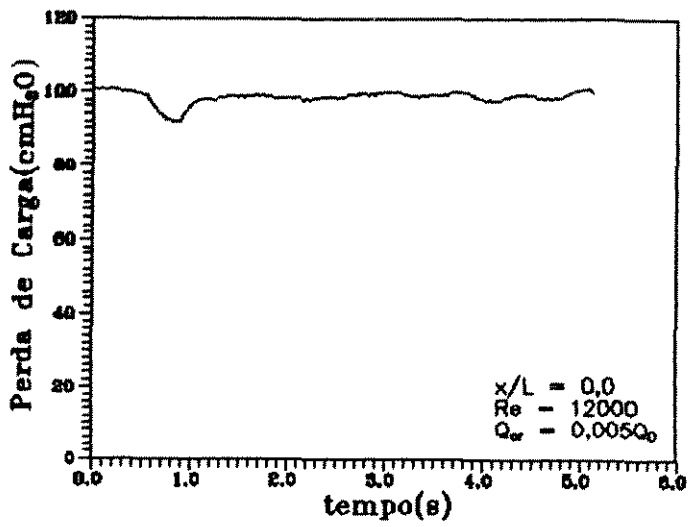


Fig. 6.32

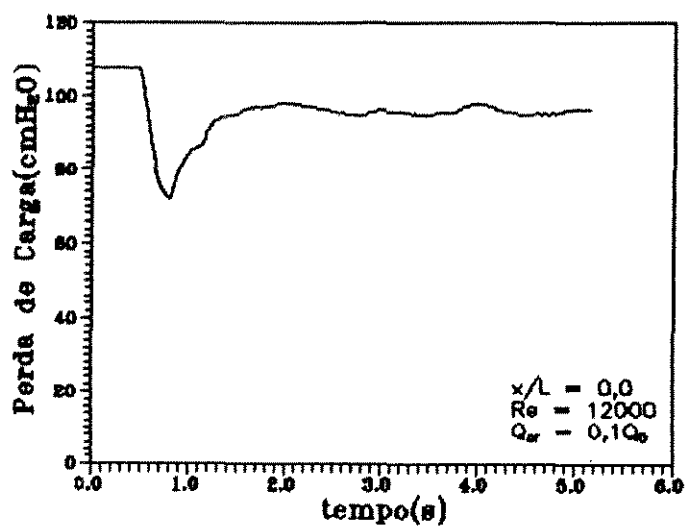


Fig. 6.33

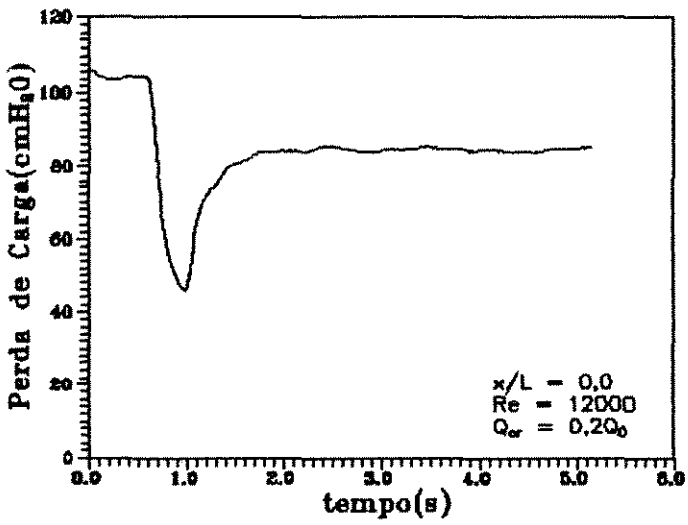


Fig. 6.34

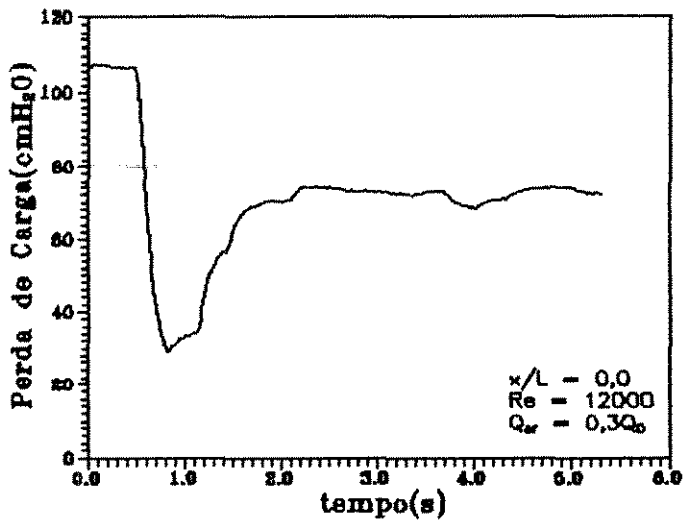


Fig. 6.35

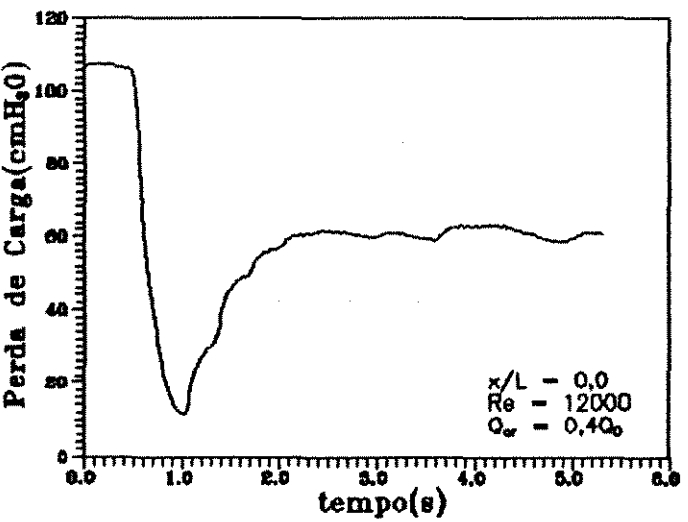


Fig. 6.36

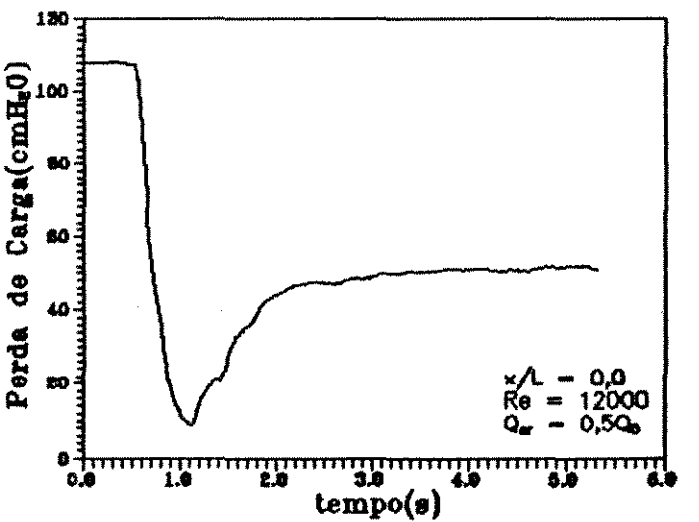


Fig. 6.37

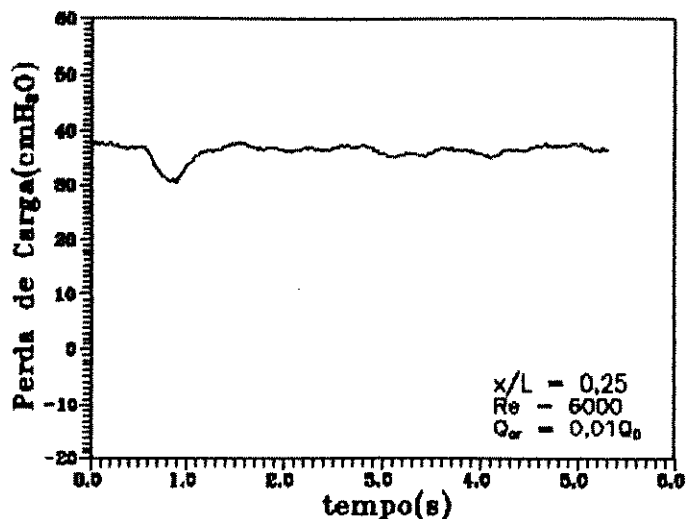


Fig. 6.38

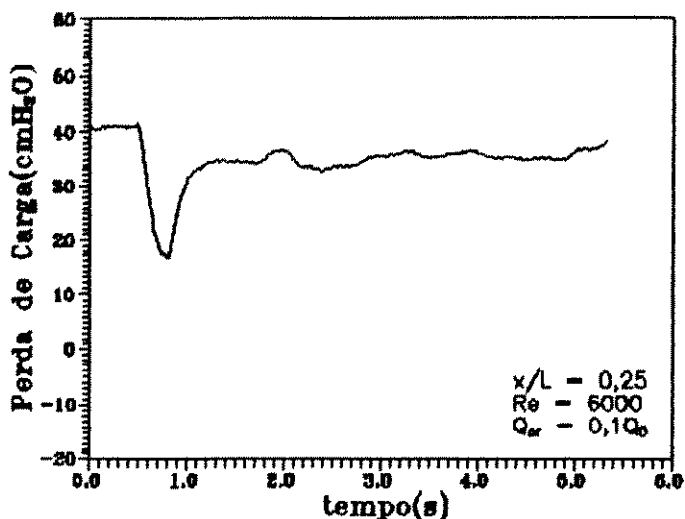


Fig. 6.39

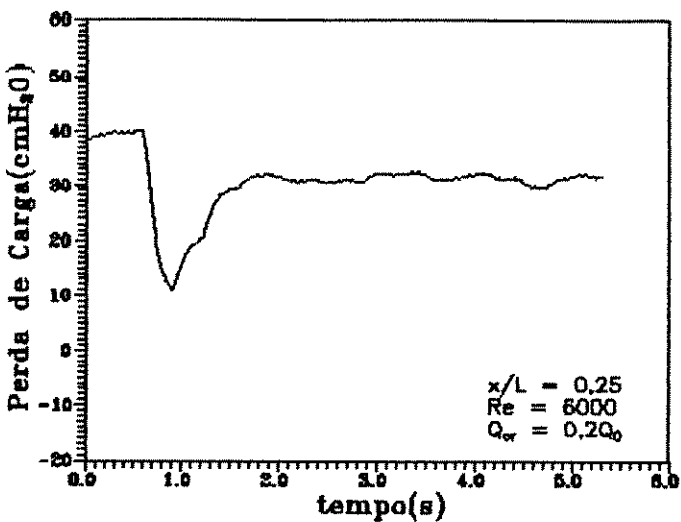


Fig. 6.40

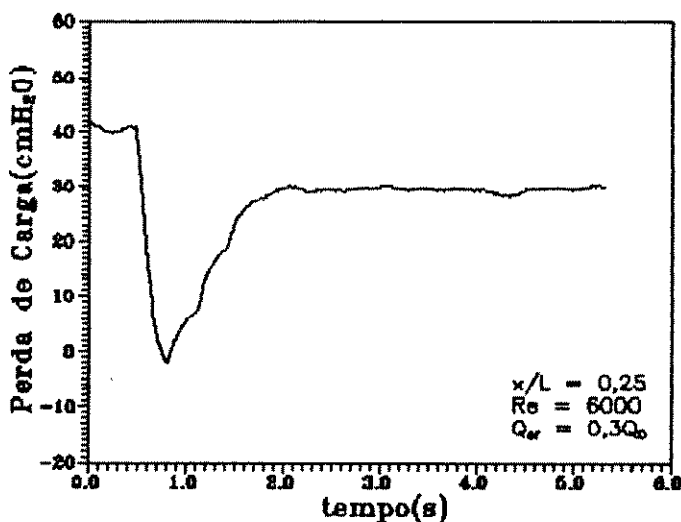


Fig. 6.41

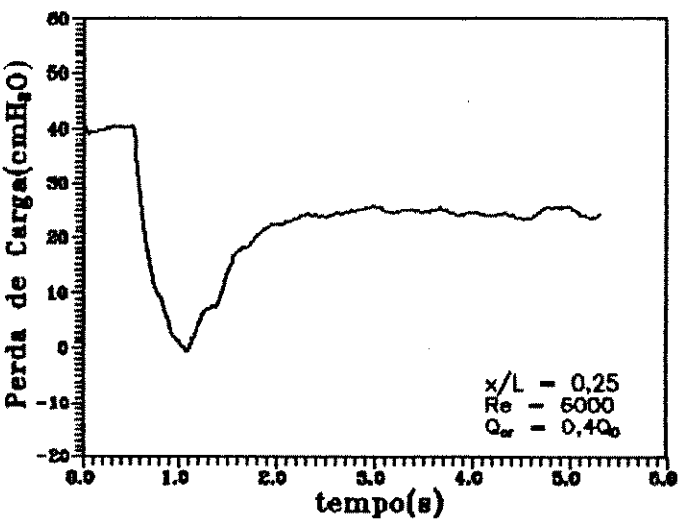


Fig. 6.42

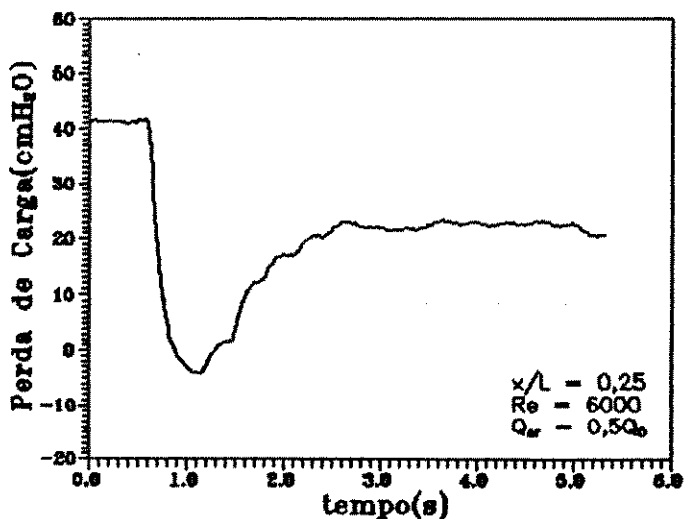


Fig. 6.43

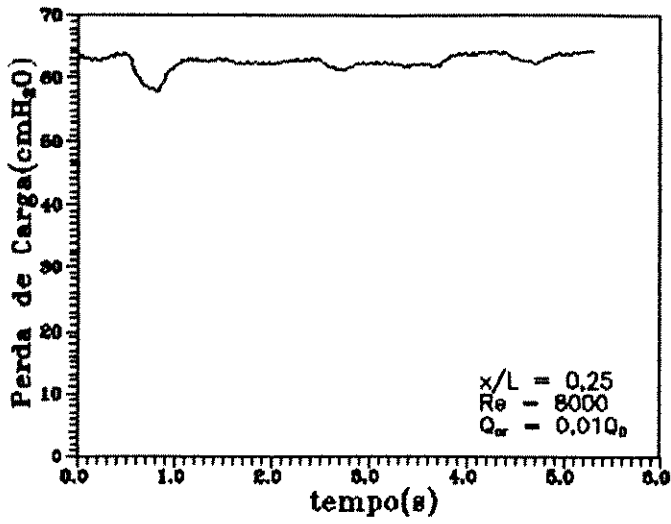


Fig. 6.44

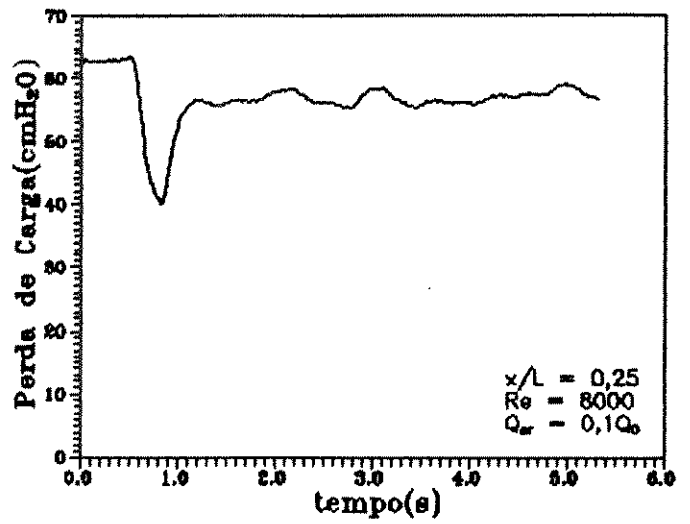


Fig. 6.45

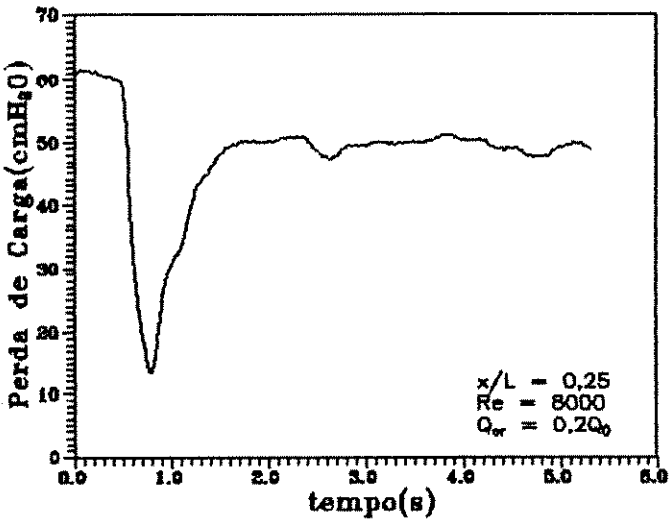


Fig. 6.46

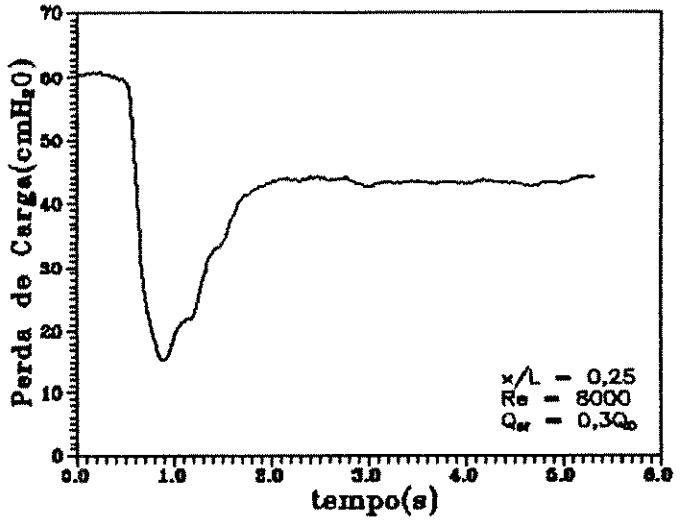


Fig. 6.47

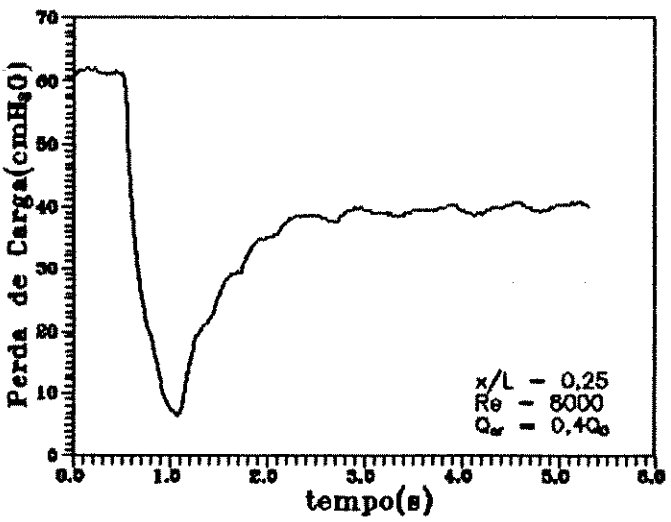


Fig. 6.48

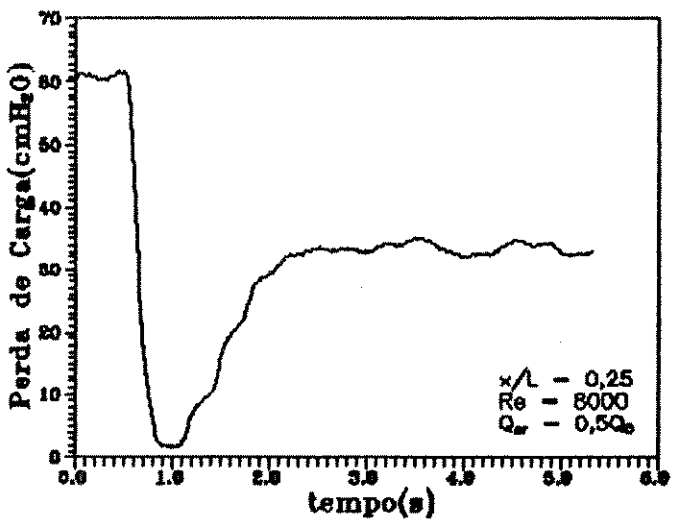


Fig. 6.49

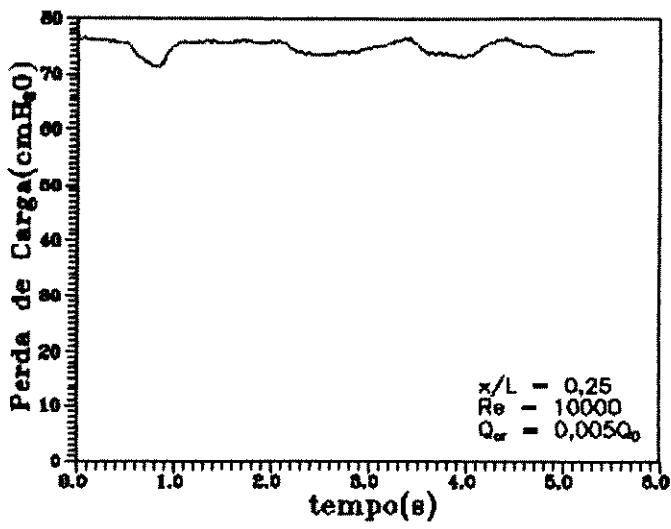


Fig. 6.50

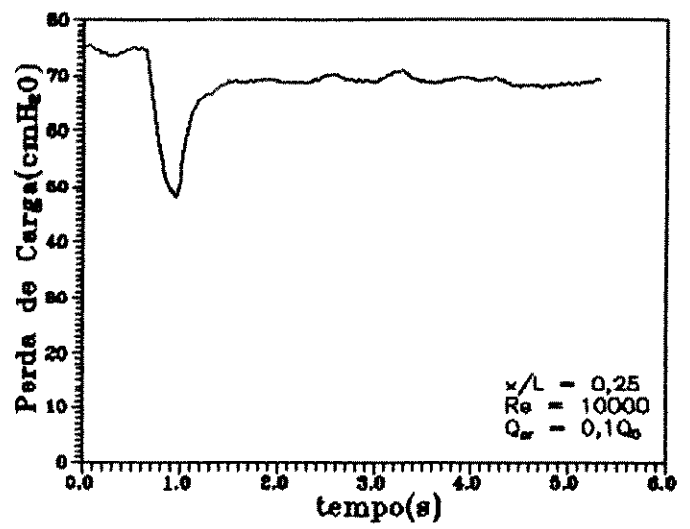


Fig. 6.51

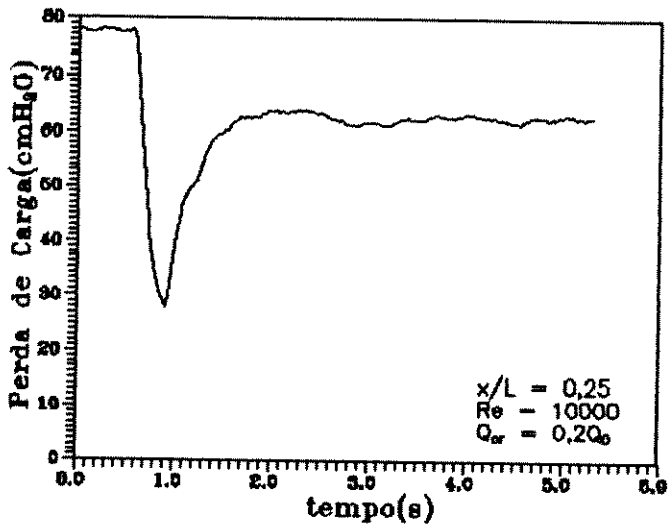


Fig. 6.52

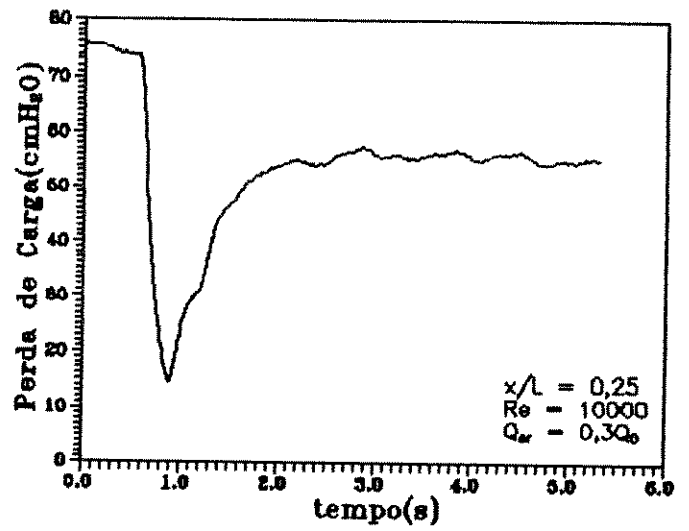


Fig. 6.53

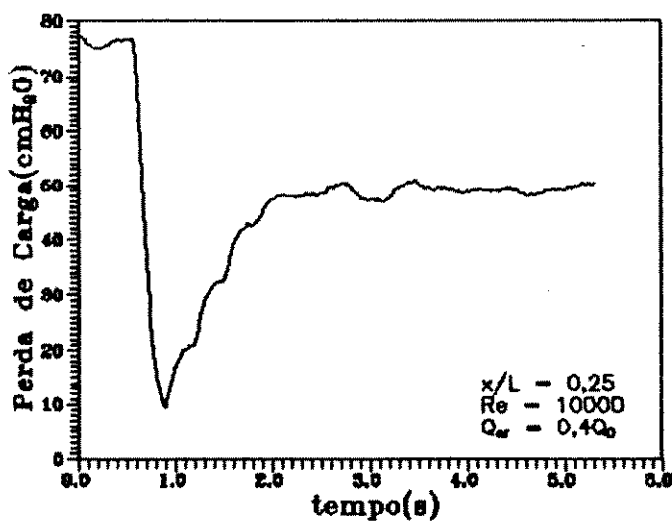


Fig. 6.54

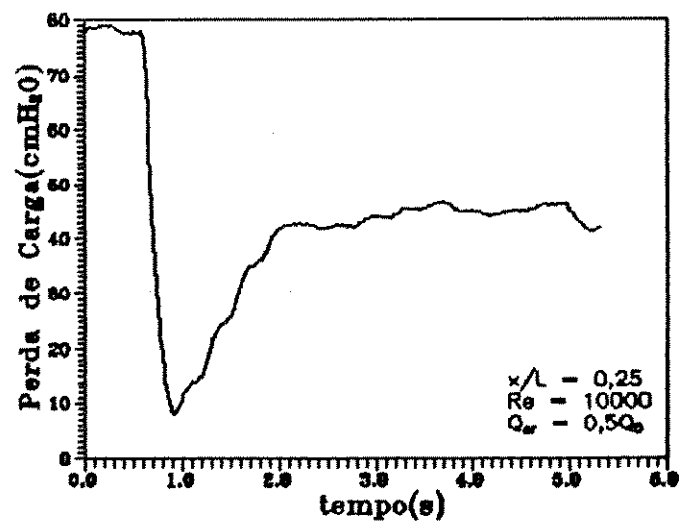


Fig. 6.55

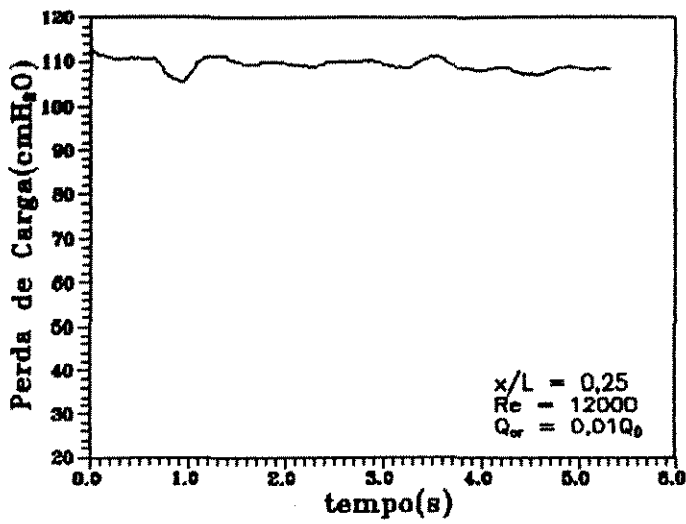


Fig. 6.56

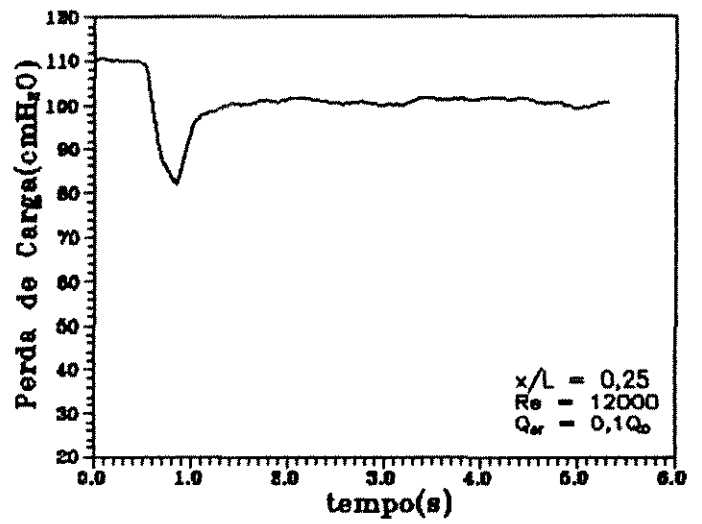


Fig. 6.57

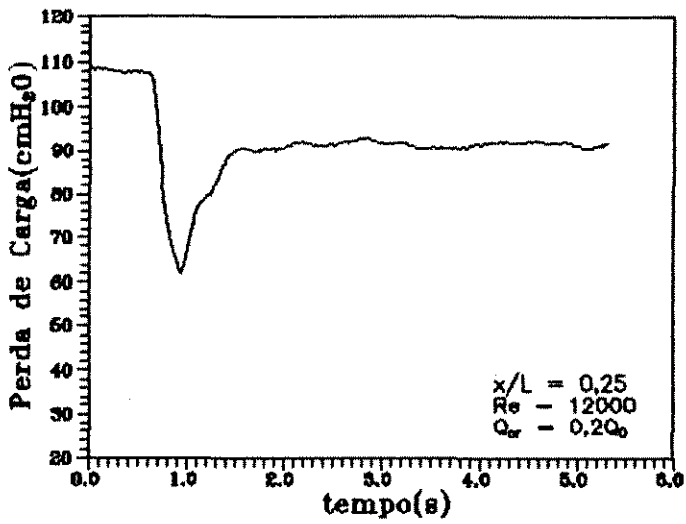


Fig. 6.58

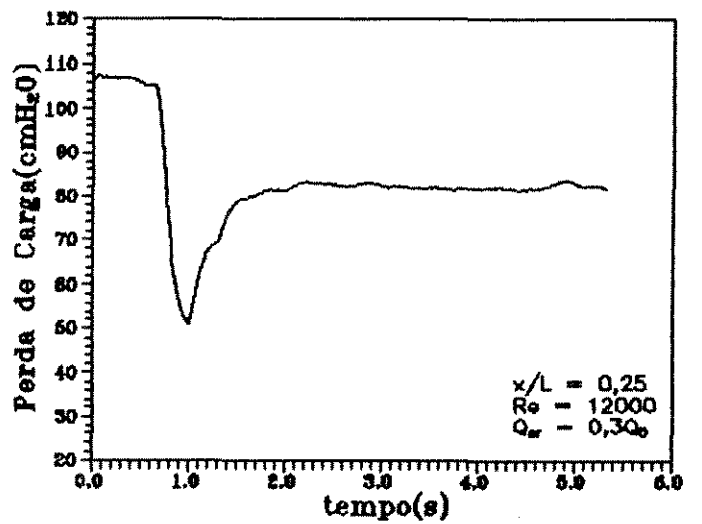


Fig. 6.59

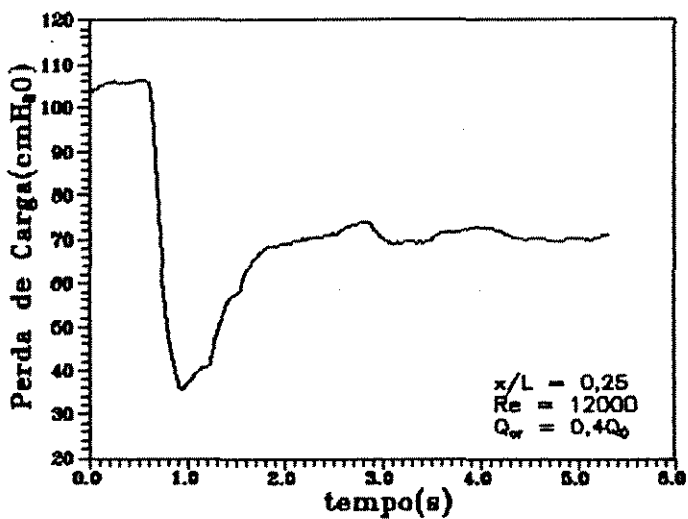


Fig. 6.60

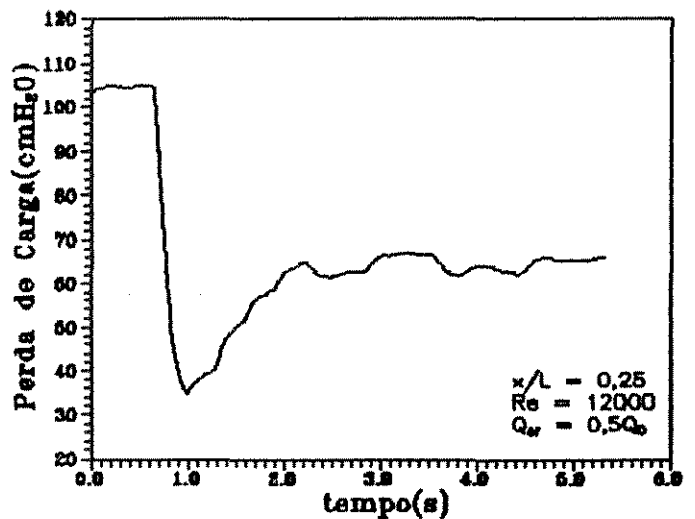


Fig. 6.61

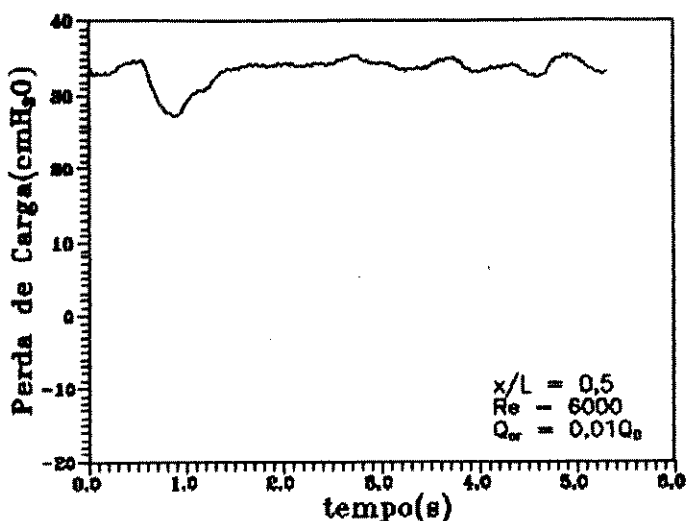


Fig. 6.62

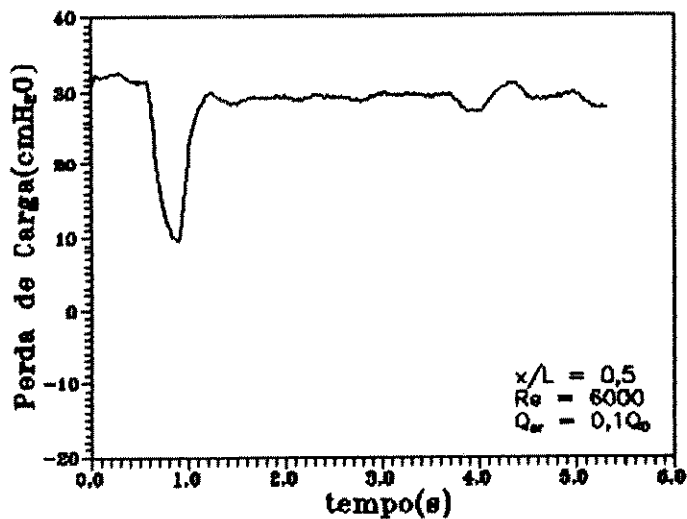


Fig. 6.63

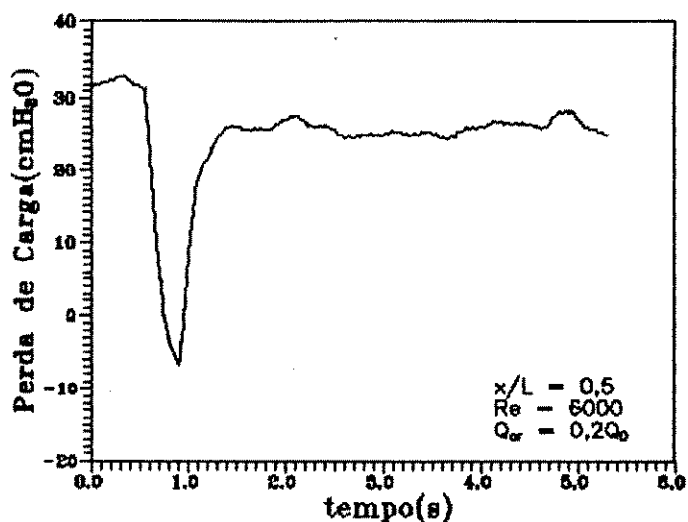


Fig. 6.64

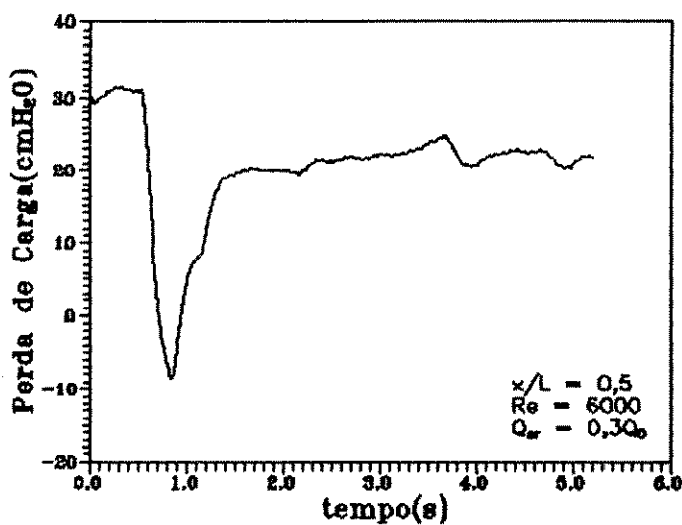


Fig. 6.65

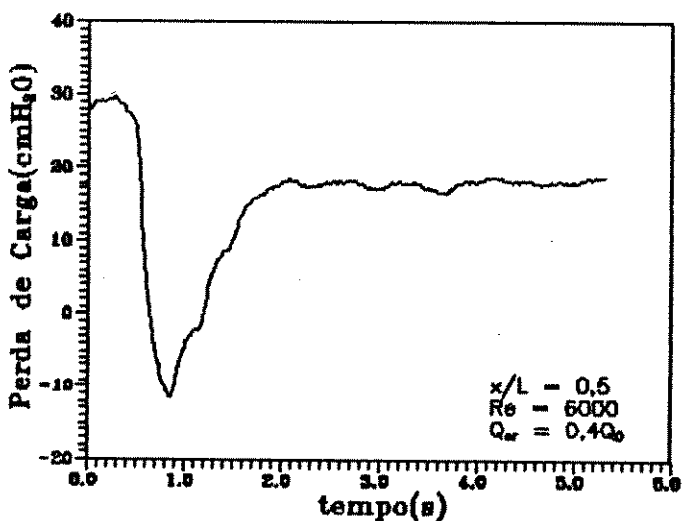


Fig. 6.66

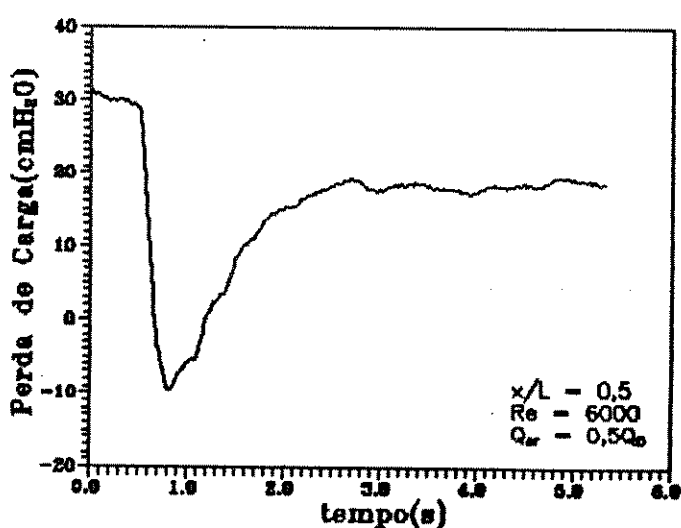


Fig. 6.67

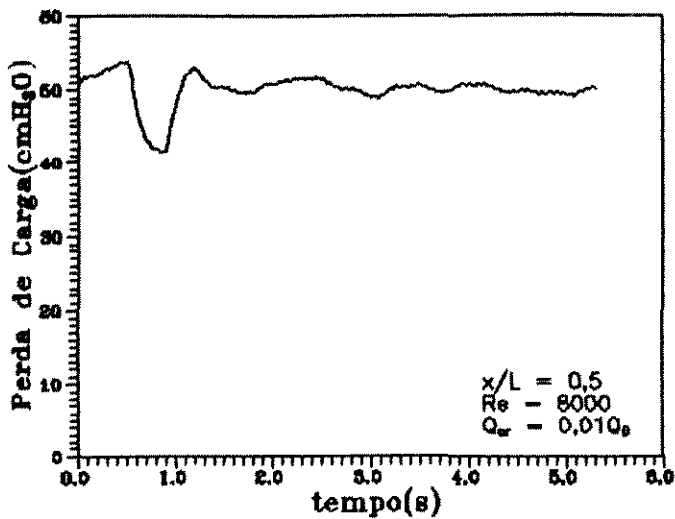


Fig. 6.68

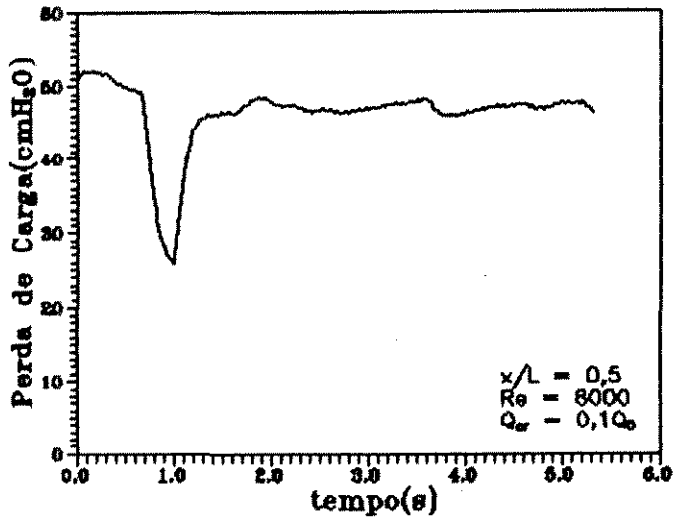


Fig. 6.69

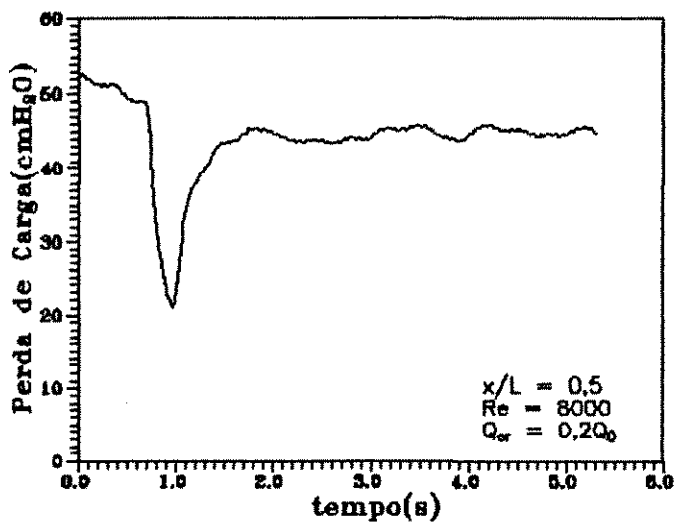


Fig. 6.70

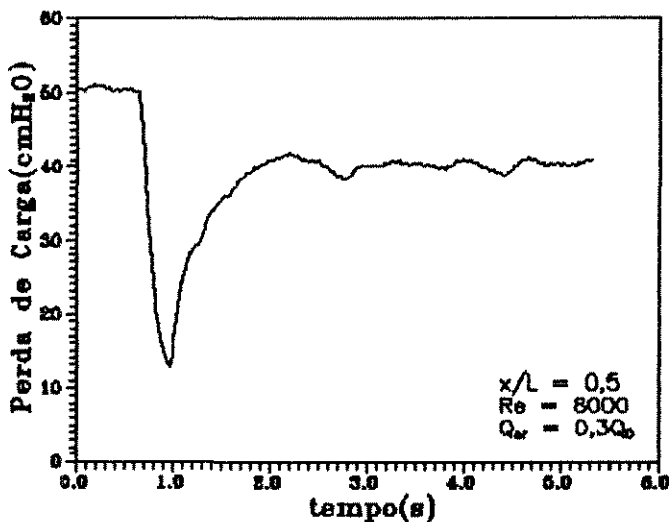


Fig. 6.71

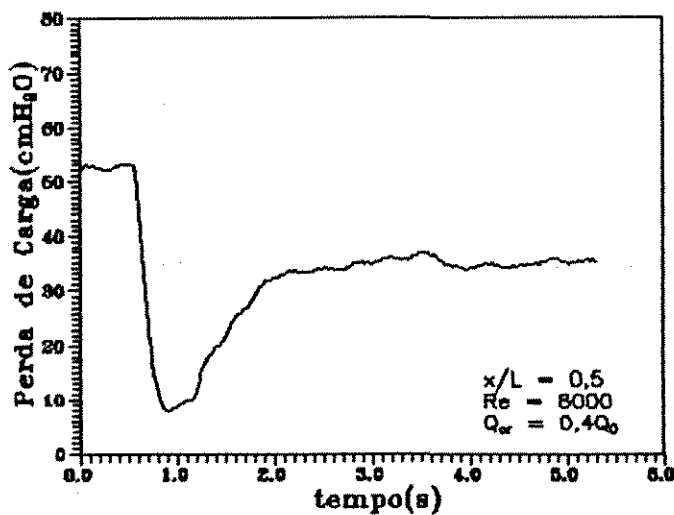


Fig. 6.72

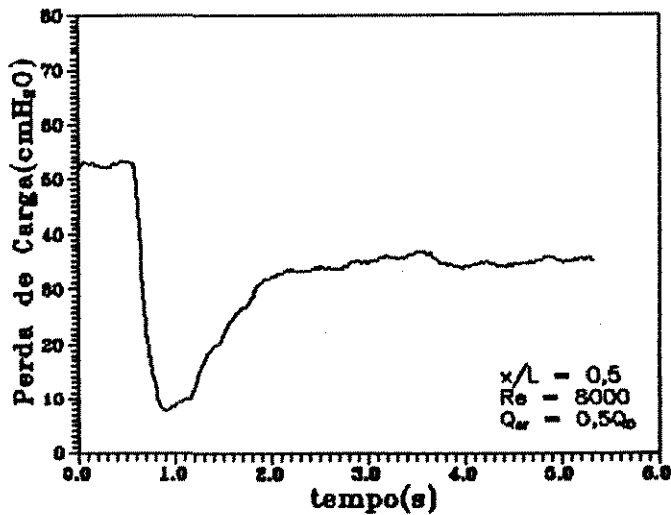


Fig. 6.73

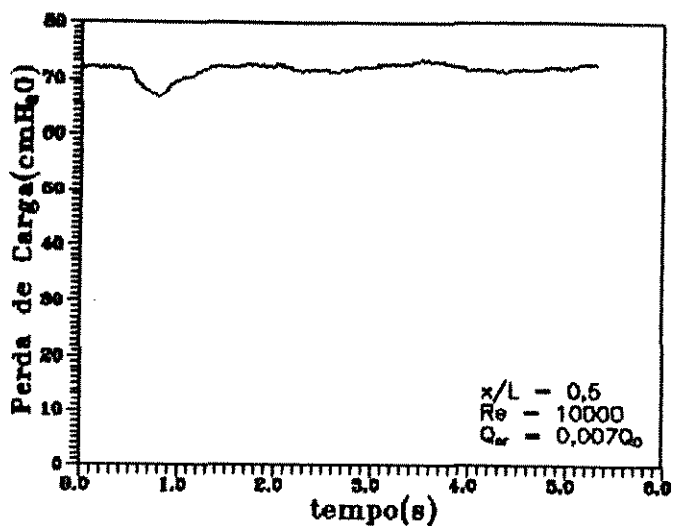


Fig. 6.74

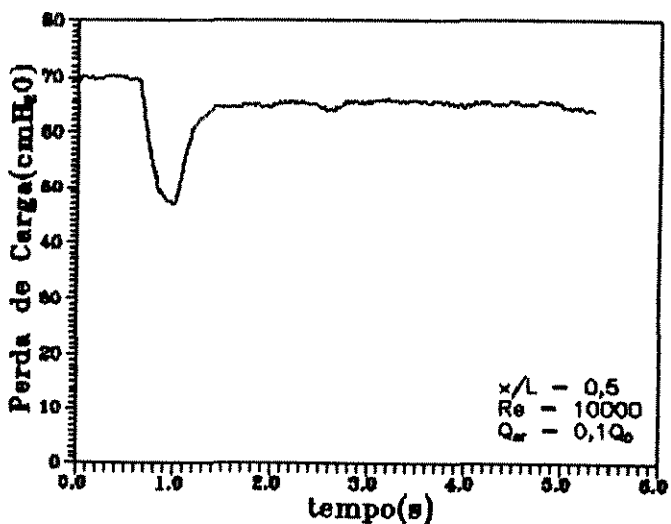


Fig. 6.75

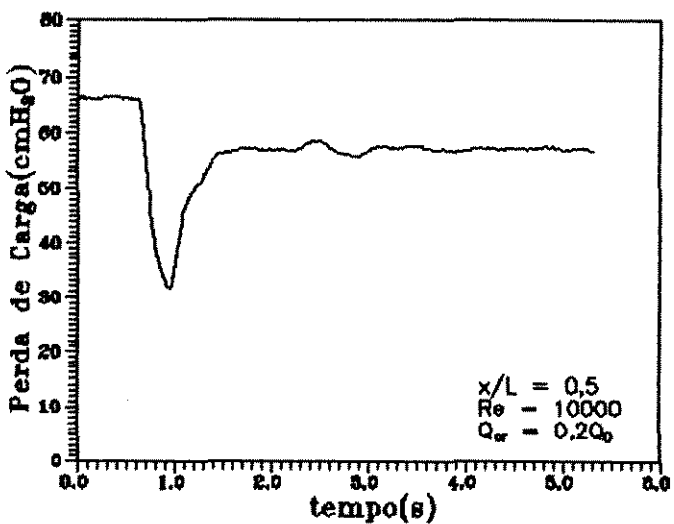


Fig. 6.76

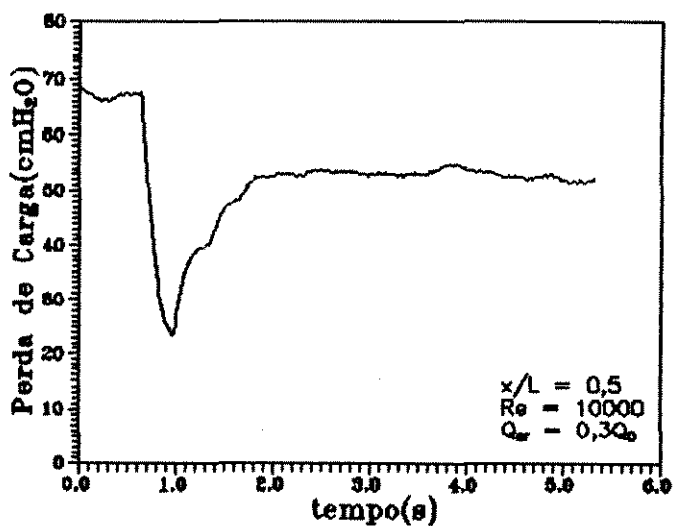


Fig. 6.77

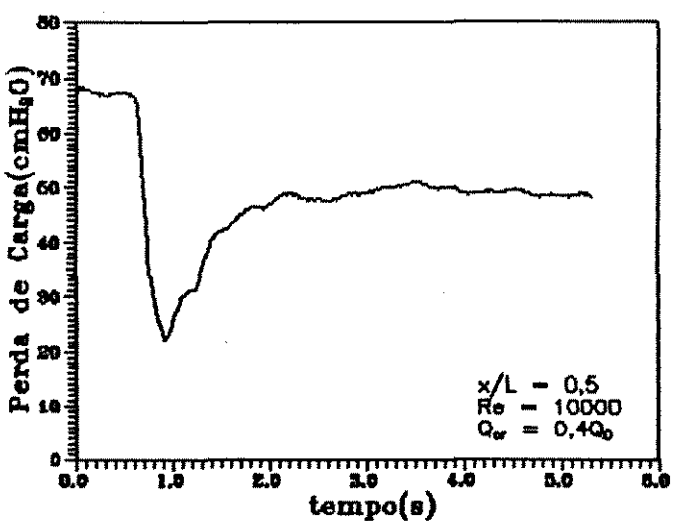


Fig. 6.78

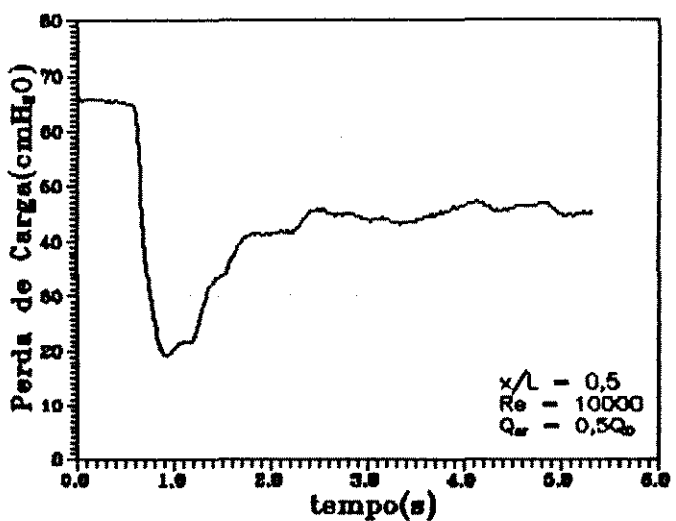


Fig. 6.79

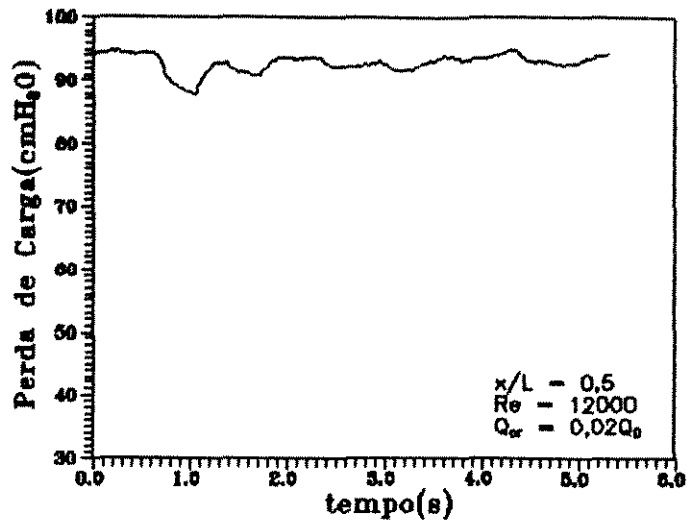


Fig. 6.80

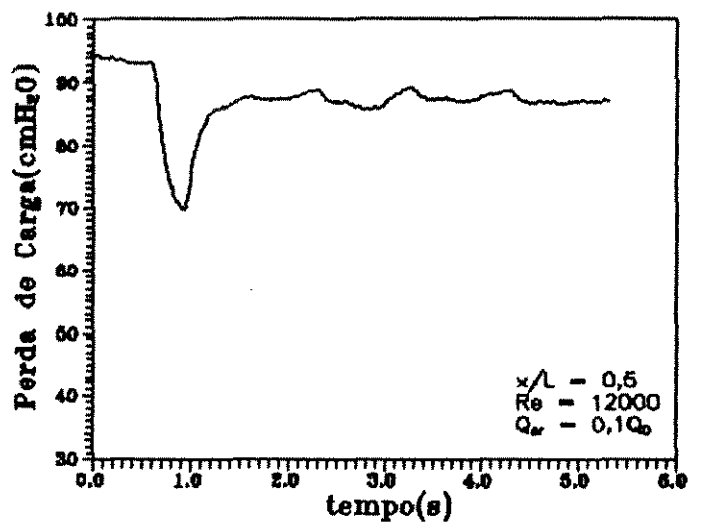


Fig. 6.81

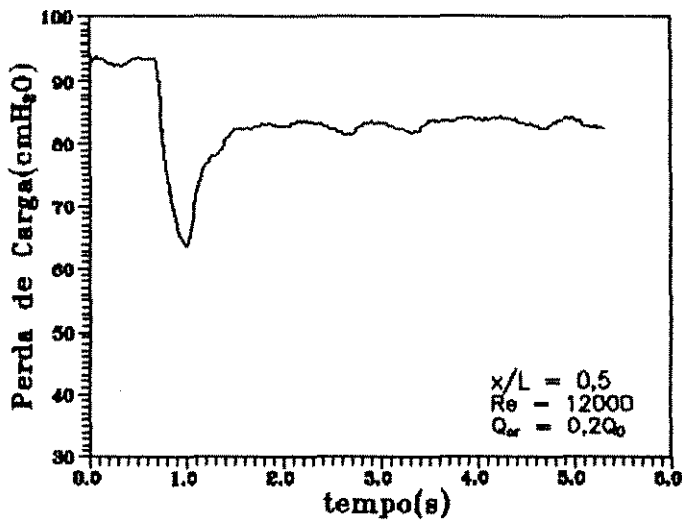


Fig. 6.82

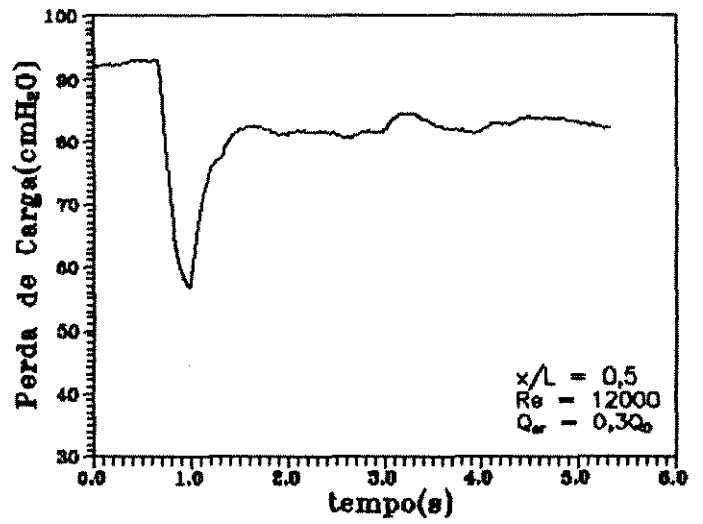


Fig. 6.83

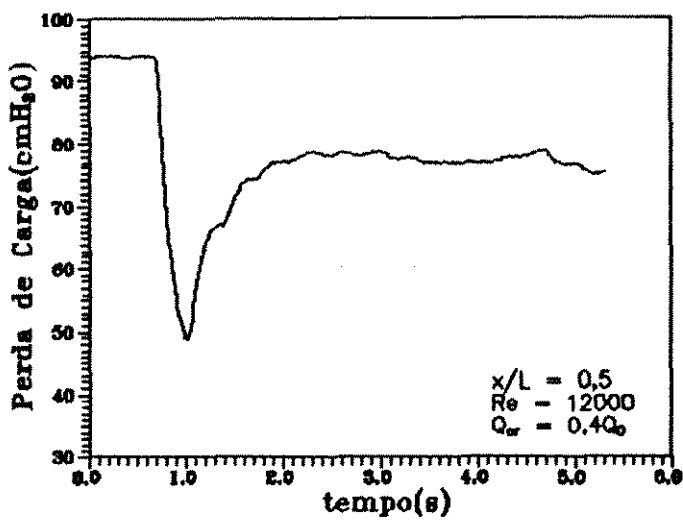


Fig. 6.84

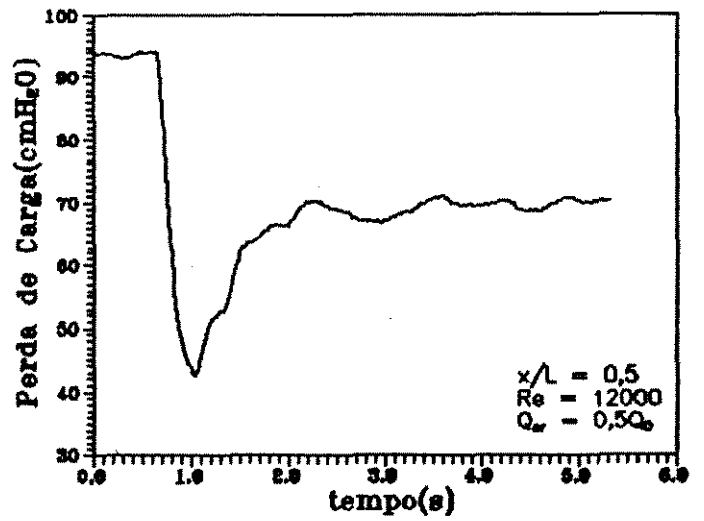


Fig. 6.85

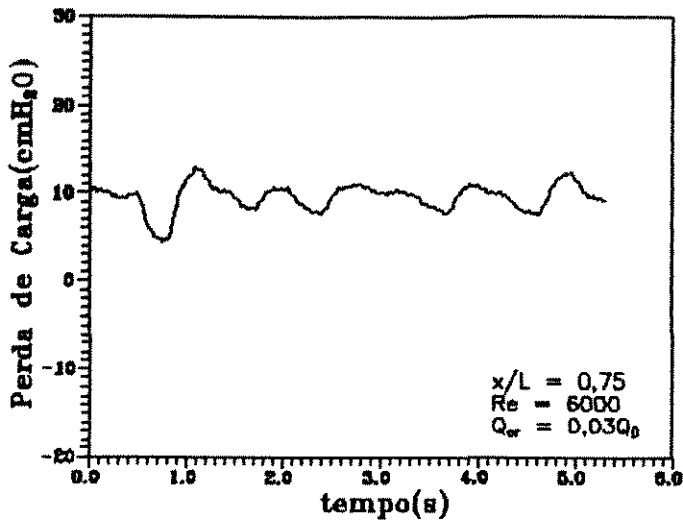


Fig. 6.86

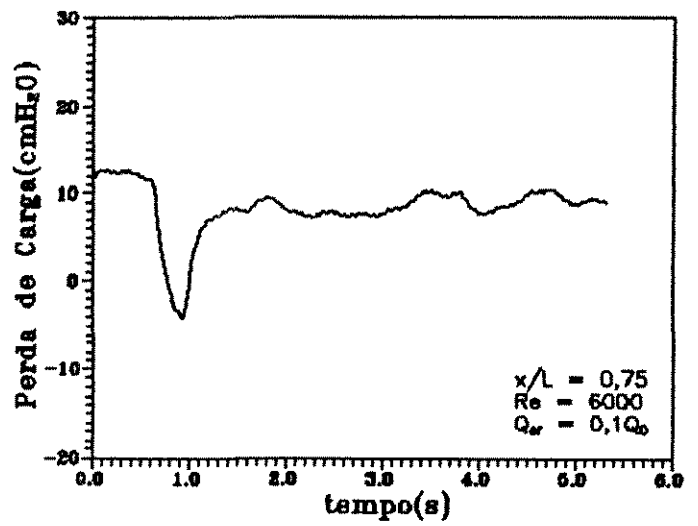


Fig. 6.87

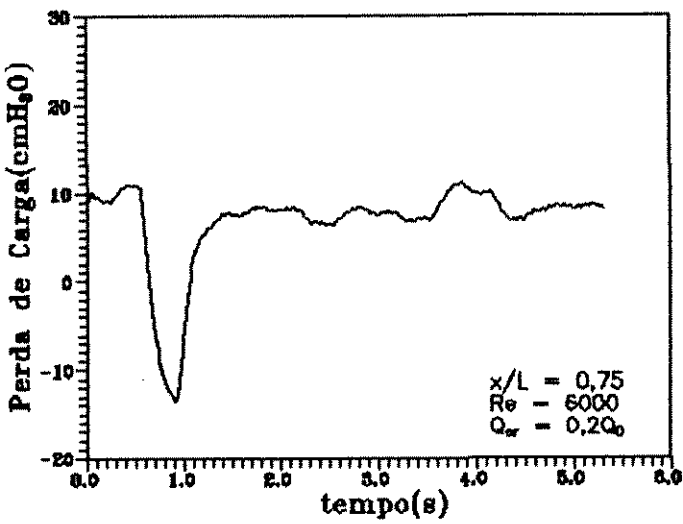


Fig. 6.88

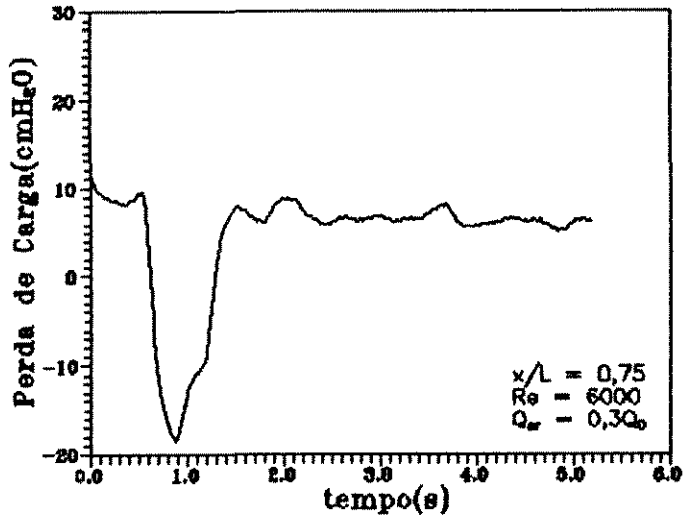


Fig. 6.89

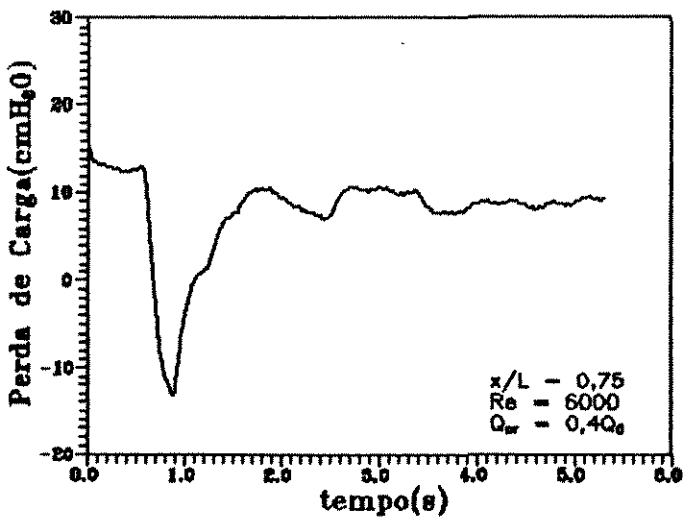


Fig. 6.90

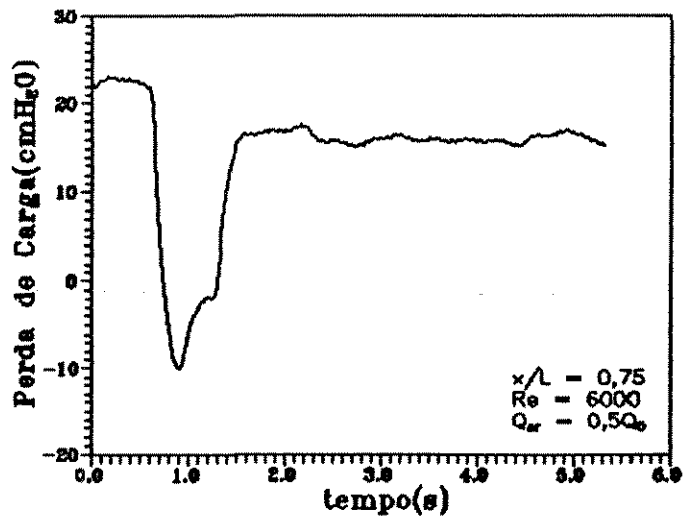


Fig. 6.91

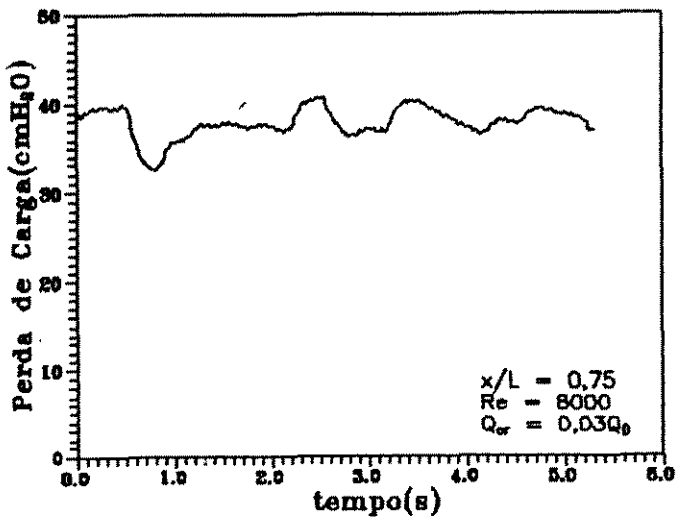


Fig. 6.92

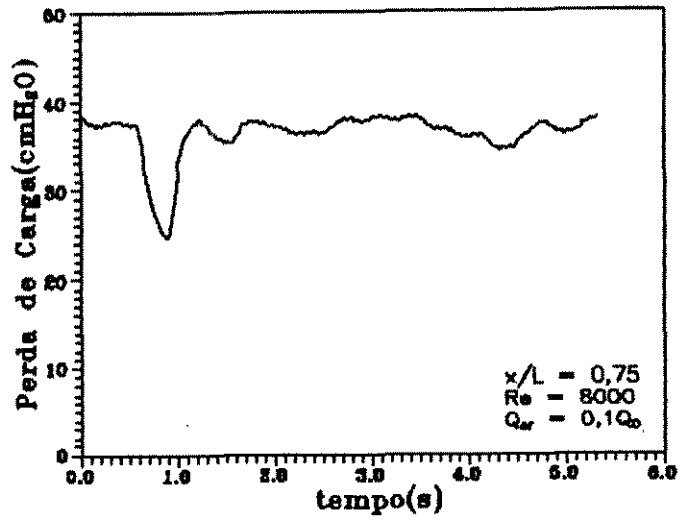


Fig. 6.93

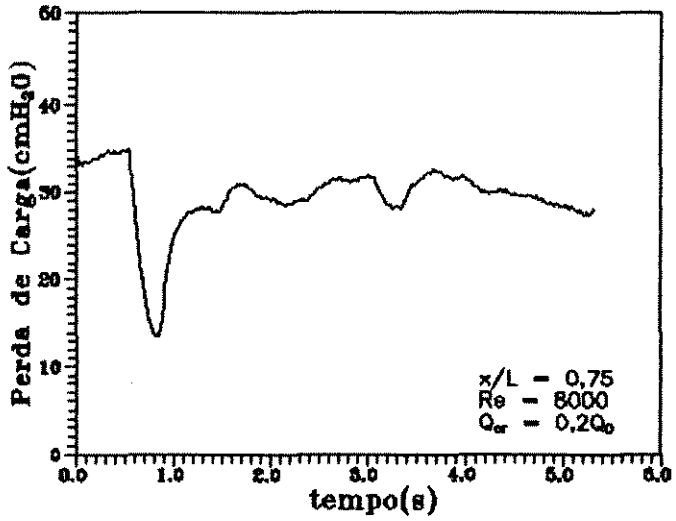


Fig. 6.94

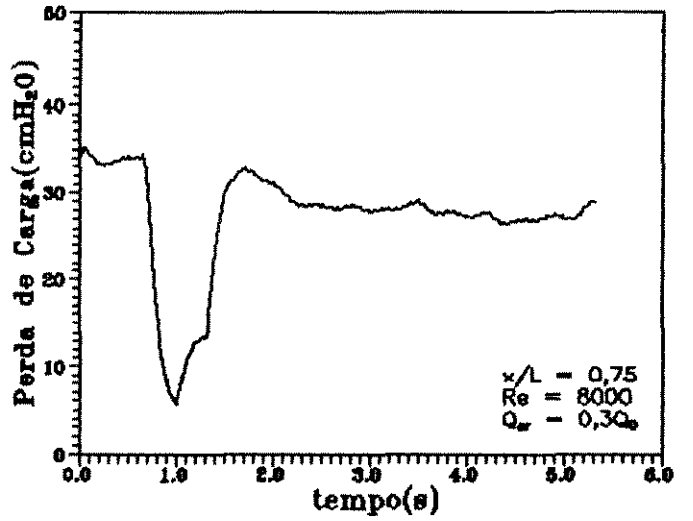


Fig. 6.95

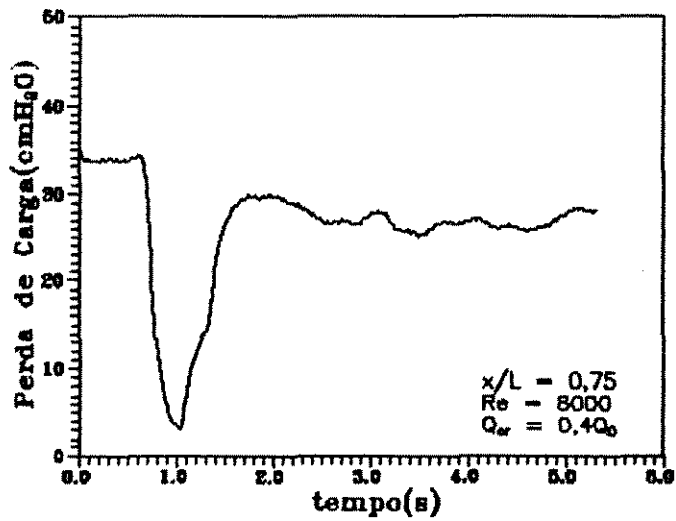


Fig. 6.96

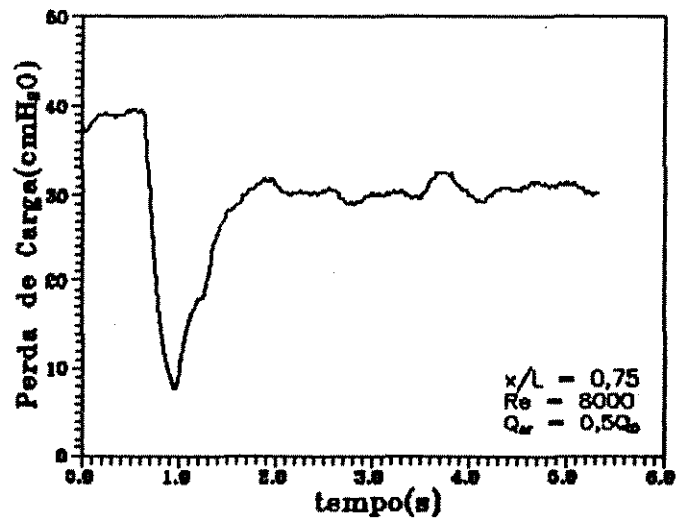


Fig. 6.97

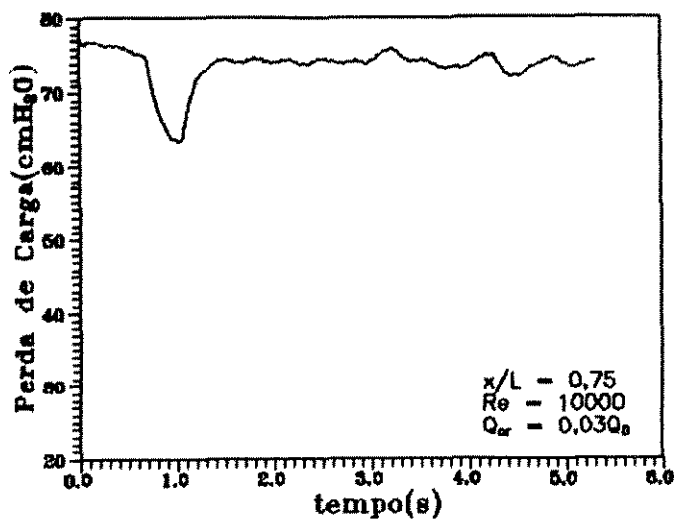


Fig. 6.98

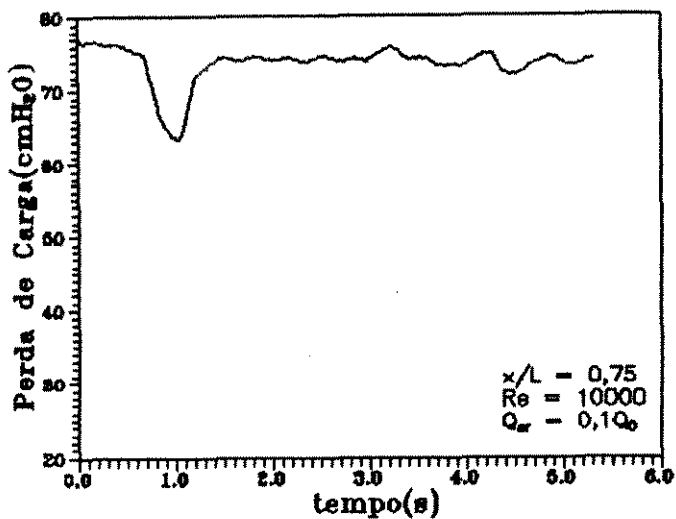


Fig. 6.99

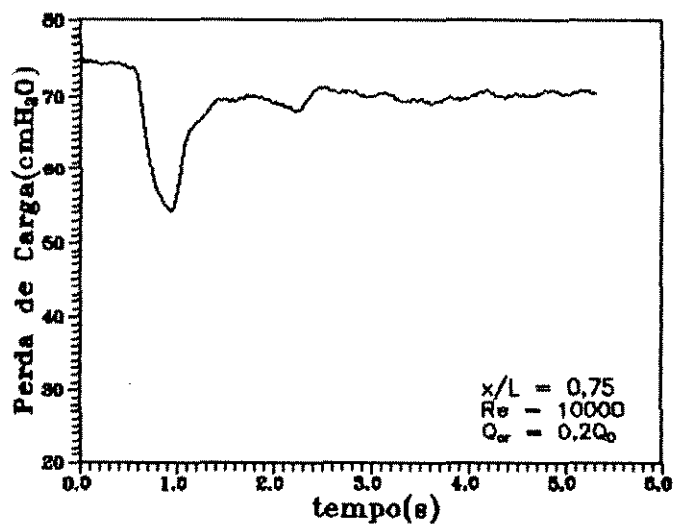


Fig. 6.100

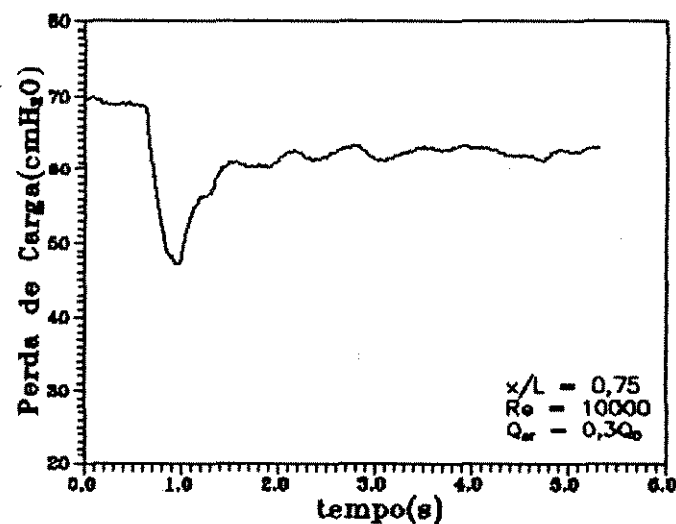


Fig. 6.101

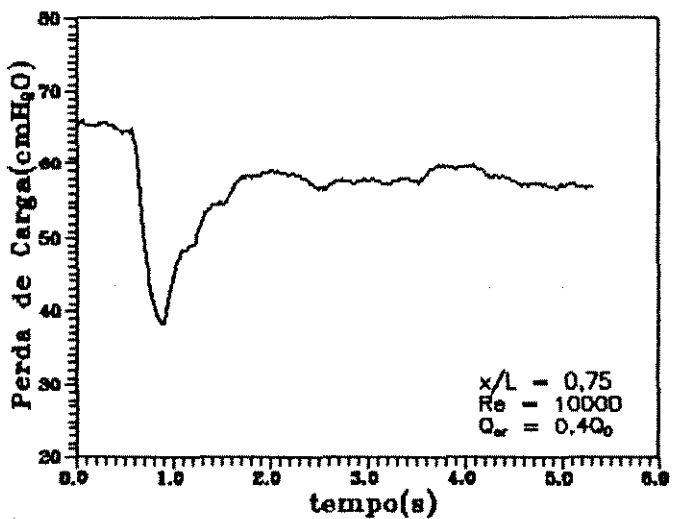


Fig. 6.102

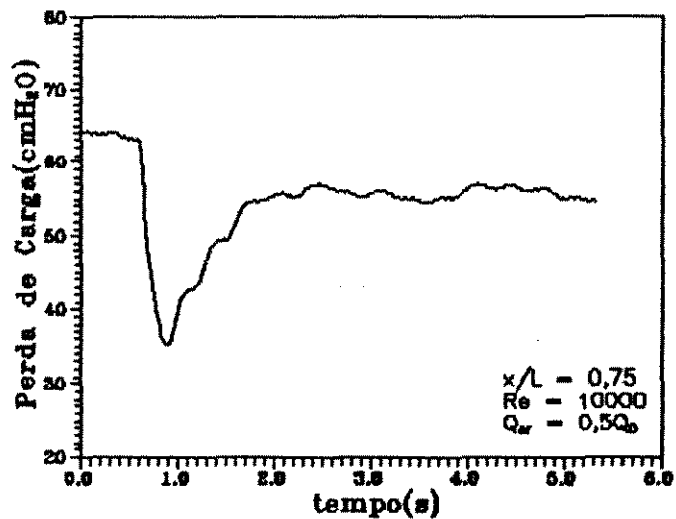


Fig. 6.103

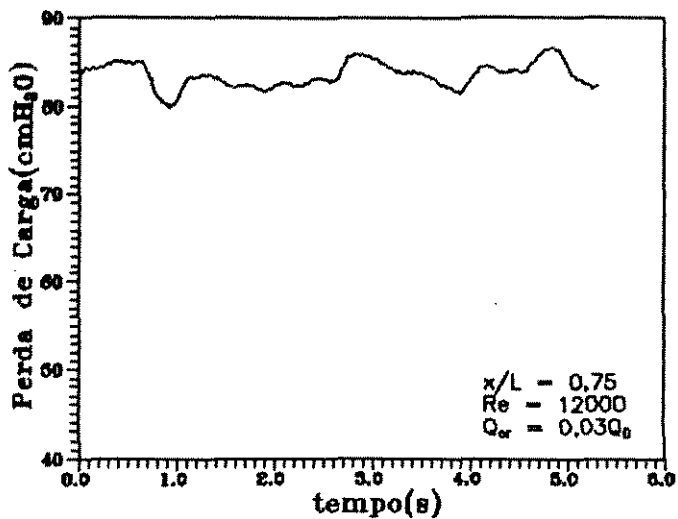


Fig. 6.104

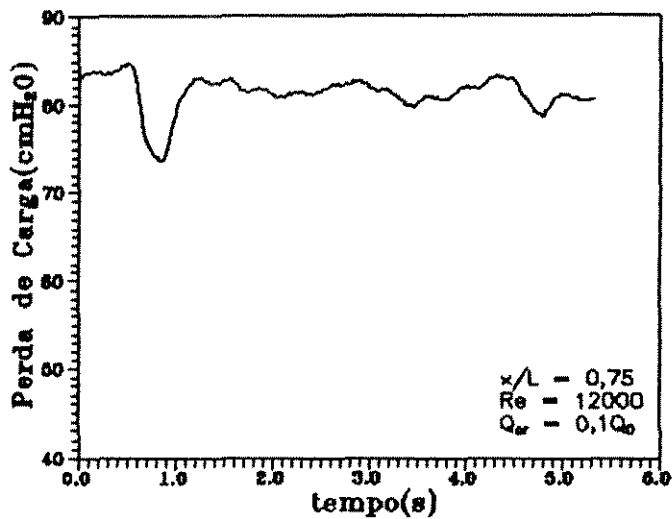


Fig. 6.105

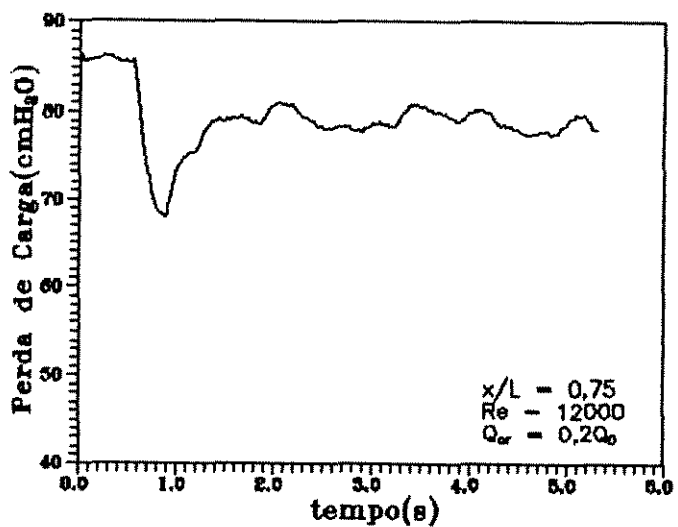


Fig. 6.106

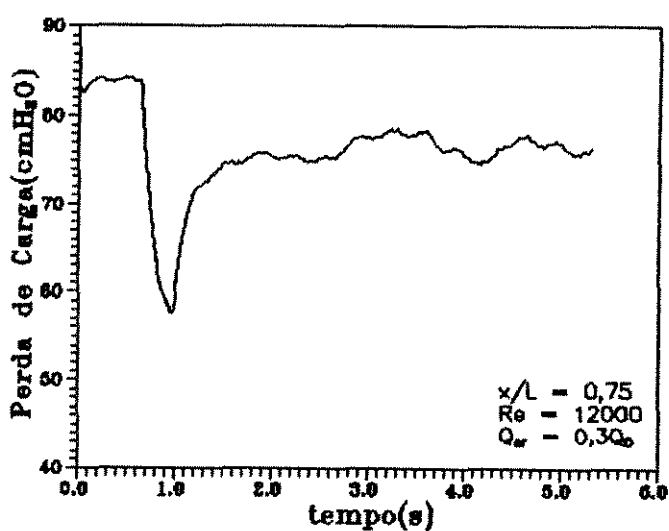


Fig. 6.107

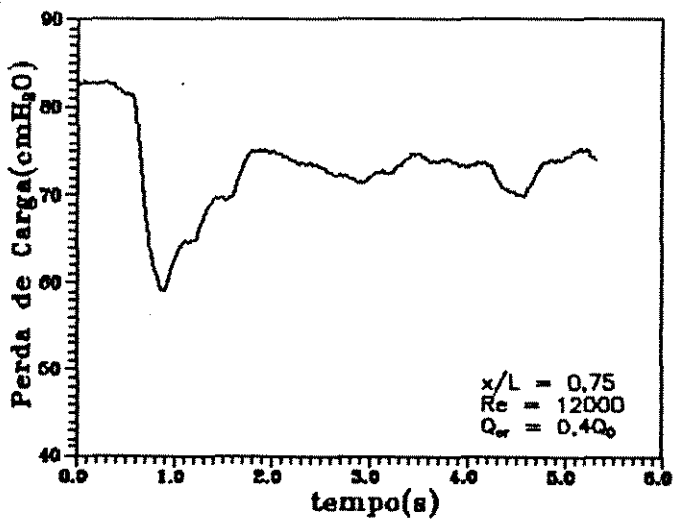


Fig. 6.108

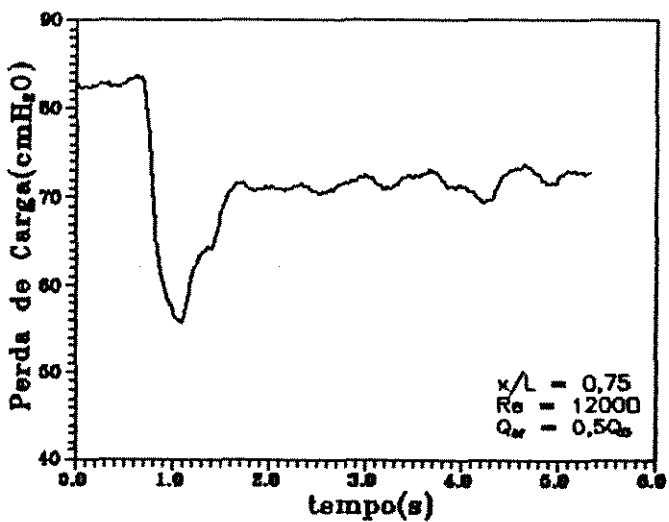


Fig. 6.109

6.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os gráficos apresentados nas Fig. 6.2 a 6.13 mostram os resultados obtidos pela simulação do modelo desenvolvido, conforme exposto anteriormente.

6.4.1 - Transiente Hidráulico

Cada gráfico, para um dado Re , inclui cinco curvas diferentes, sendo que cada curva é traçada para uma determinada relação de vazamento.

Analisando o comportamento de um modo geral das curvas apresentadas, observa-se que a pressão é inicialmente constante, e após um determinado instante ocorre uma súbita queda, mantendo-se invariável nesse valor, até um intervalo de tempo. A pressão novamente aumenta instantaneamente, num valor inferior ao do início do fenômeno, tornando-se relativamente constante até o final. A queda da perda de carga se justifica pela redução da velocidade provocada pelo vazamento.

6.4.2 - Efeito da Razão de Vazamento

Com relação às curvas para diferentes razões de vazamento, verifica-se que estas apresentam um mínimo de pressão diretamente proporcional à quantidade de líquido vazando. A carga maior de fluido escoando através do furo produz uma maior variação na

velocidade nominal de fluido da tubulação, conseqüentemente a variação da pressão entre os dois pontos nas extremidades da tubulação durante o regime transiente será maior.

6.4.3 - Efeito do Número de Reynolds

Para situações em diferentes valores de Re , quanto maior a velocidade maior será a queda de pressão do escoamento, o que é facilmente justificável pela equação da perda de carga a qual denota a proporcionalidade direta entre essas grandezas.

6.4.4 - Efeito da Posição do Vazamento

Alterando-se a posição do vazamento, nota-se uma variação no tempo de queda da perda de carga, o qual é o tempo em que a onda do transiente leva para chegar até as extremidades onde são calculadas as pressões, a partir do ponto onde ocorre o vazamento. Quanto mais próximo estiver esta posição mais rapidamente a onda de pressão alcançará as extremidades.

6.4.5 - Análise Conjunta do Efeito da Razão de Vazamento e Número de Reynolds para os Resultados de Simulação

A fim de se analisar o efeito da razão de vazamento e número de Reynolds, foram representadas nas figuras 6.110 e 6.111 a queda de pressão mínima atingida na tubulação e a variação da perda de carga

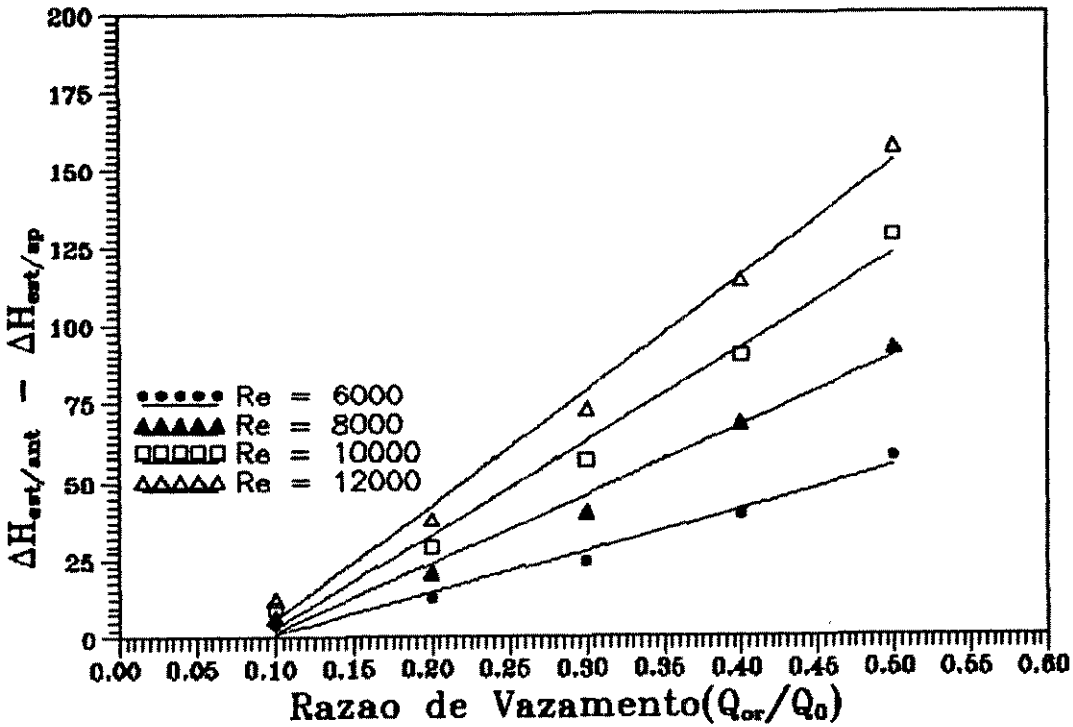


Fig. 6.110 - Efeito do número de Reynolds e Razão de vazamento nos resultados de simulação ($\Delta H_{esp/ant} - \Delta H_{esp/op} \times Q_{or}/Q_0$)

entre o instante antes do vazamento e após ocorrer a estabilização da pressão, uma vez terminada a oscilação devida à onda de choque.

A figura 6.110 mostra a variação da perda de carga entre o instante antes do vazamento e após ocorrer a estabilização da pressão em função da razão de vazamento para diversos valores do número de Reynolds. Os resultados demonstram que existe uma correspondência linear e diretamente proporcional entre essas grandezas e que quanto maior o número de Reynolds maior será essa variação para uma determinada razão de vazamento. Portanto, é possível construir ábacos com objetivo de se determinar a vazão de vazamento, tendo-se a variação da diferença de pressão entre o instante

antes do vazamento e após ocorrer a estabilização da pressão, para um determinado número de Reynolds.

Com relação à Fig. 6.111, os resultados demonstram que a relação entre o valor mínimo da perda de carga e a razão de vazamento é linear e inversamente proporcional, e que quanto maior o número de Reynolds menor será a perda de carga mínima para uma dada razão de vazamento. O mesmo tipo de gráfico pode ser traçado com o objetivo de se obter a razão de vazamento, analogamente feito para a variação de pressão.

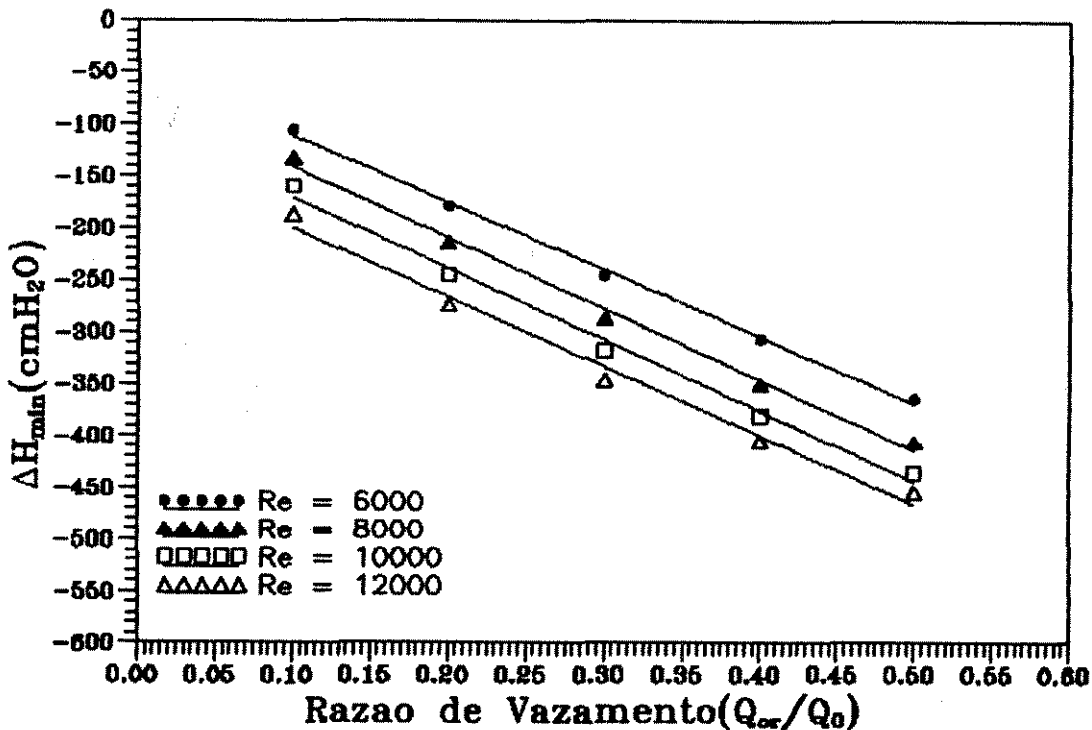


Fig. 6.111 - Efeito do número de Reynolds e Razão de vazamento nos resultados de simulação ($\Delta H_{min} \times Q_{or}/Q_0$)

Os resultados apresentados foram obtidos para um vazamento em $x/L = 0,5$ e resultados semelhantes são obtidos para outros valores de x/L .

6.5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, será discutido o comportamento do perfil da perda de carga obtido por aquisição de dados, bem como, compararemos esses resultados com os de simulação, abordando os pontos principais de divergência entre esses resultados.

Com os resultados experimentais, é possível obtermos conclusões bastante positivas, pois estes refletem uma realidade prática do fenômeno do vazamento.

6.5.1 - Perfil da Queda de Pressão

Comparando-se os gráficos dos resultados de simulação com os experimentais, verifica-se que os primeiros apresentam uma forma idealizada, tendo uma queda e subida instantânea, conforme discutido anteriormente. Nos gráficos dos resultados experimentais, a pressão demora um tempo finito para alcançar um valor estável, condizente com a realidade.

Outra questão a ser considerada é que, em se tratando dos valores quantitativos, o perfil da perda de carga em função do tempo para os resultados experimentais diferiu razoavelmente em relação ao perfil teórico. As questões levantadas a seguir, esclarecem estas discordâncias.

A diferença de pressão no sistema de aquisição de dados foi medida entre o início e o final da tubulação, onde não existe condições de contorno que pudessem fornecer equações que relacionassem as variáveis do processo. No caso da simulação, nas

extremidades onde foi medida a perda de carga, foram estabelecidas condições de contorno adequadas à resolução do problema, como um reservatório a montante e uma válvula a jusante. Portanto, o modelo de simulação teórica não foi uma representação exata do modelo experimental, mesmo porque, na montagem experimental, a tubulação constou de curvas não reconhecidas no modelo teórico, que neste caso foi estimado uma tubulação como sendo de tubo reto.

Wiggert [1985] estudou o efeito da restrição de joelho sobre o transiente de pressão. Tradicionalmente, para se analisar o comportamento do transiente hidráulico, as equações do movimento e da continuidade são resolvidas sem considerar o deslocamento estrutural do tubo. O fluido é assumido escoar através de um tubo reto e rígido.

Recentemente, existe uma preocupação de que o comportamento do transiente hidráulico numa tubulação, que não é rígida nem tampouco linear, pode diferir daquela predita por uma análise de tubo rígido tradicional. Discute-se que as forças dinâmicas exercidas pelo fluido sobre acessórios, onde a direção ou a área de escoamento variam (joelhos, tês, válvulas e redutores), pode colocar o tubo em movimento e tal movimento pode alterar o transiente hidráulico.

O movimento do tubo é causado por forças dinâmicas no fluido e na parede do tubo. A amplitude e frequência do movimento são funções das propriedades mecânicas e condições do suporte da tubulação. Análises precisas do transiente de pressão em tubulação requerem formulação dos mecanismos pelo qual líquido e tubo estão acoplados, e incorporação de parâmetros que descrevem a estrutura do tubo.

Um objetivo desse estudo foi conduzir um experimento que isolasse o mecanismo de interação líquido-tubo. Restrições estruturais de um joelho foi a variável independente. Adicionalmente, um modelo numérico foi desenvolvido que incorpora parâmetros estruturais necessários para representar os mecanismos de acoplamento.

A conclusão que o autor obteve de seu trabalho é que o transiente de pressão em tubulação é uma função de restrições estruturais de joelhos. Se fixado rigidamente, um joelho causa alterações não apreciáveis no transiente de pressão gerado por um rápido fechamento de uma válvula. Entretanto, se o suporte é afrouxado, alterações significativas são observadas.

Portanto, como no nosso trabalho não foi considerado a influência de qualquer tipo de acidente nas equações desenvolvidas, este foi um fator que gerou algum tipo divergência entre os resultados teóricos e experimentais.

6.5.2 - Tempo de Resposta do Sistema e Localização do Vazamento

Como já discutido anteriormente, o tempo de queda da perda de carga no gráfico visualizado, está intimamente relacionado com a posição do vazamento. Por isso, é necessário discutirmos sobre esta informação fornecida pelo gráfico.

O experimento foi construído em escala de laboratório, e possui dimensões reduzidas em comparação com uma tubulação industrial. O comprimento da tubulação, sendo de pequeno valor, produz um tempo reduzido de chegada da onda de queda de pressão nas extremidades da tubulação, não permitindo uma nítida diferenciação entre os diver-

tos tempos de queda da perda de carga para as diferentes posições do vazamento, apresentando valores muitas vezes iguais sem qualquer relação com a posição do vazamento, podendo ser confundidos entre si. Em outras palavras, como a ordem de grandeza das unidades é muito pequena (o tempo está na ordem de micro-segundos), e como o tempo de demora entre a leitura de um e outro dado é comparável com o tempo de chegada da onda do transiente hidráulico, não é possível haver uma diferenciação clara entre várias posições de vazamento.

Se compararmos os valores das abscissas (tempo) para os resultados teóricos e experimentais, observamos uma ordem de grandeza bem superior para os resultados experimentais. O que se notou é que mesmo colocando o vazamento na posição $x/L = 0$, ou seja, no ponto extremo onde se mede a perda de carga, obteve-se um perfil análogo ao verificado nas outras posições, isto é, existiu um tempo considerável de queda do perfil de pressão, o que não deveria ocorrer, pois a onda se propaga nos dois sentidos com a mesma velocidade. Então, essa queda de pressão deveria ser instantânea. Esse tempo pode ser interpretado como um tempo de atraso na resposta do sistema de aquisição de dados, o que seria um 'tempo morto'.

Portanto, nos gráficos apresentados, podemos caracterizar um dado tempo de atraso referente ao sistema de aquisição de dados e um tempo de chegada da onda de queda de pressão correspondente a uma determinada posição do vazamento.

6.5.3 - Efeito da Razão de Vazamento e Número de Reynolds nos Resultados Experimentais

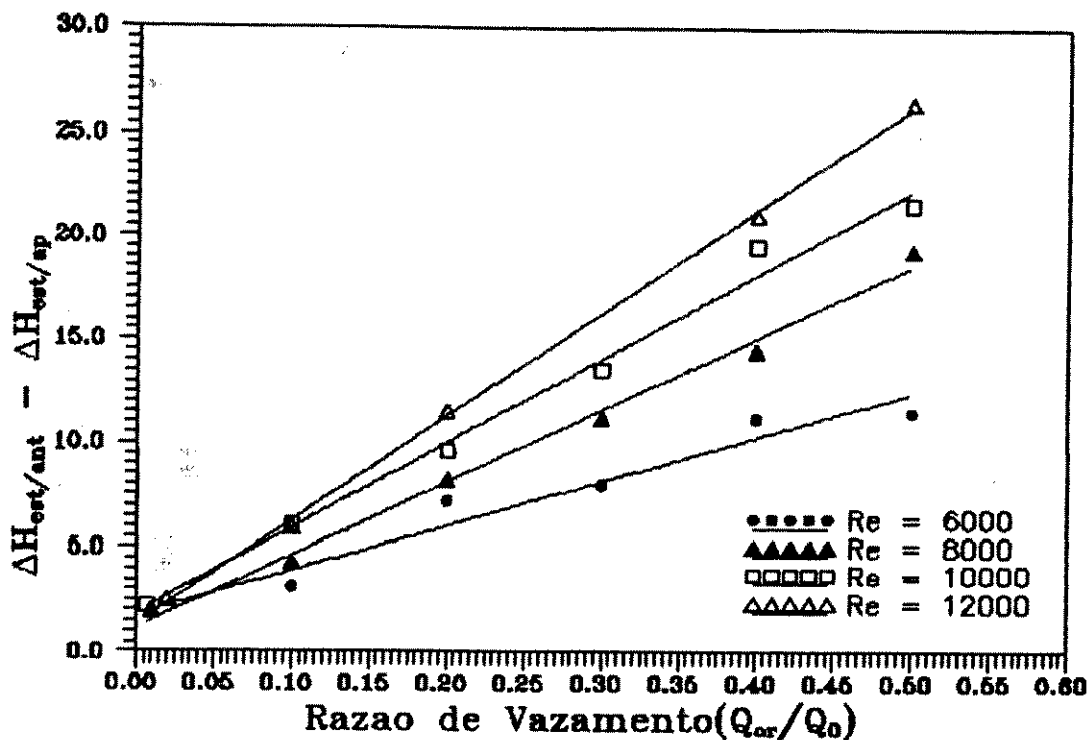


Fig. 6.112 - Efeito do número de Reynolds e Razão do vazamento nos resultados experimentais ($\Delta H_{est/ant} - \Delta H_{est/sp} \times Q_{or}/Q_0$)

Nas figuras 6.112 e 6.113, são apresentados o efeito do número de Reynolds e razão de vazamento sobre a variação da queda de pressão posterior à estabilização da onda do transiente hidráulico, bem como sobre os valores de pressão mínima atingida pela onda de choque.

Os resultados experimentais aqui ilustrados, embora diferentes em valor absoluto quando comparados com os valores de simulação (Fig. 6.110 e 6.111), apresentou uma variação de acordo com a previsão teórica, sendo as diferenças devidas ao fato de que os valores calculados referem-se a uma tubulação com condições de contorno bem definidas, o que não é possível ser determinado no modelo experimental e outras questões já salientadas anteriormente.

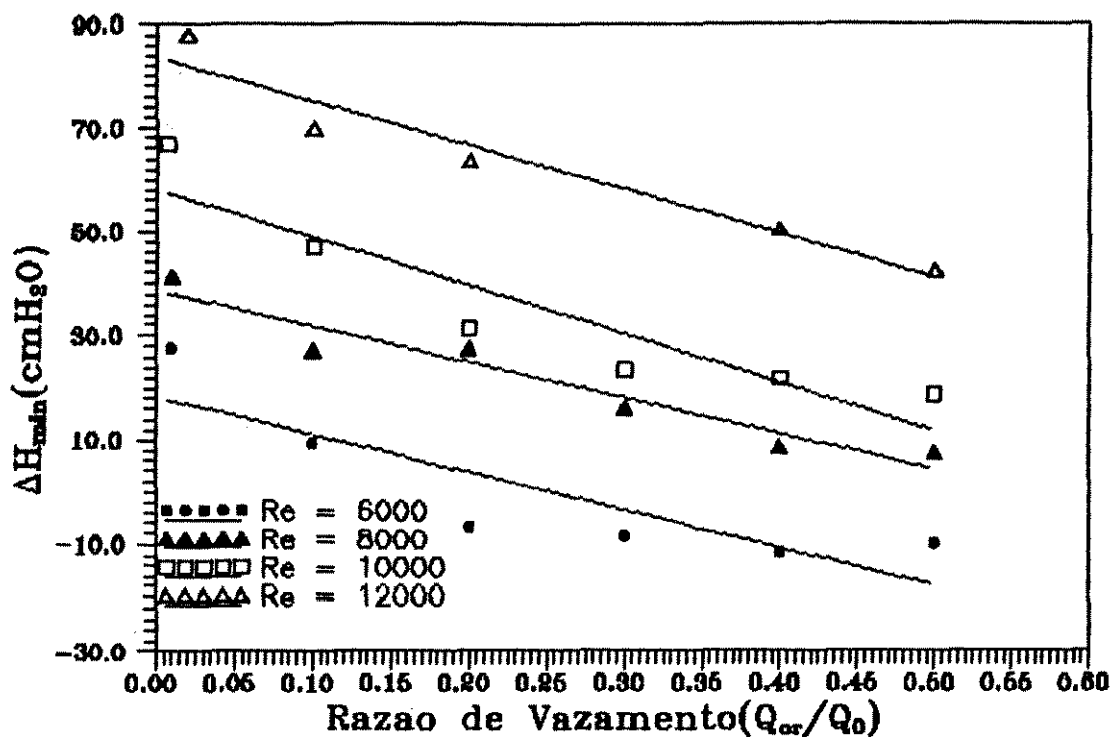


Fig. 6.113 - Efeito do número de Reynolds e Razão de vazamento nos resultados experimentais ($\Delta H_{min} \times Q_{cr}/Q_0$)

Os resultados das Figs. 6.112 e 6.113 referem-se a um vazamento em $x/L = 0,5$ e resultados semelhantes são obtidos para outros valores de x/L .

6.5.4 - Vazão Mínima de Vazamento Detectável

Existe uma preocupação muito grande com relação à mínima vazão de vazamento detectável. Devido à dinâmica de fluxo inerente e à superposição de ruídos, de um modo geral, somente vazamentos superiores a 2 %, para o caso de líquidos, podem ser detectados, utilizando métodos simples de detecção de vazamentos.

No nosso trabalho, foi alcançado um progresso considerável com

relação a esse objetivo. Nos gráficos apresentados, percebe-se a queda no perfil da perda de carga, que caracteriza o vazamento, em até 0,5 % da vazão nominal de escoamento. Portanto, é possível detectar com precisão satisfatória vazamentos mínimos de 0,5 %, o que demonstra ser um resultado bastante positivo se compararmos com a literatura.

6.6 - CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nos permitem concluir da importância do método desenvolvido, sobretudo devida às facilidades de instalação de medição e fundamentalmente devida à sua aplicabilidade numa grande faixa de condições experimentais.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 - CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados podemos concluir que:

- Os resultados obtidos nos permitem concluir sobre a importância do método de detecção de vazamento desenvolvido, sobretudo devida às facilidades de instalação, de medição e fundamentalmente à sua aplicabilidade numa grande faixa de condições operacionais.
- Foi possível, através da análise dos resultados experimentais, obter detecção de vazamentos mínimos de 0,5% com precisão satisfatória, o que demonstra ser um resultado bastante positivo se compararmos com a literatura.
- A análise dos resultados nos permitiu propor uma técnica de dimensão de vazamento através da construção de curvas que aglutinam as principais variáveis que influenciam o fenómeno do vazamento.

7.2 - SUGESTÕES

Para dar continuidade ao trabalho aqui descrito, podemos sugerir que:

- 1) No modelo de simulação, seja considerada a influência de acidentes nas equações desenvolvidas, através do estudo do deslocamento estrutural do tubo não rígido e não retilíneo.
- 2) Seja utilizado o sistema de aquisição de dados em tempo real, em conjunto com o modelo de simulação numérica do transiente hidráulico, no qual forneça como condições de contorno valores medidos

das variáveis nas extremidades da tubulação. Sendo assim, o sistema de aquisição de dados seria utilizado como suporte para a solução do problema do transiente hidráulico.

3) Seja utilizado um sistema de aquisição de dados em cada extremidade da tubulação, onde se possa medir, em tempo real, a pressão absoluta nas duas posições de fronteira, obtendo-se informações de como a onda do transiente hidráulico se propaga individualmente em cada extremidade da tubulação.

Cabe ainda ressaltar que o estudo rigoroso envolvendo todos os mecanismos pelos quais propriedades da estrutura do tubo influenciam o transiente hidráulico, transmitindo ondas torsionais na parede do tubo e ondas de compressão axial no fluido e na parede do tubo, foge ao escopo deste trabalho.

APÊNDICE A

PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

```

/*-----*/

/* PROGRAMA PARA AQUISICAO DE DADOS - VERSAO 1.0 */

/*-----*/

#include "conio.h"
#include "dos.h"
#include "stdlib.h"
#include "stdio.h"
#include "graphics.h"
#include "ctype.h"
#include "math.h"
#include "wcalc.h"
#include (bios.h)

#define ADLSB 0 /* Porta de leitura do lsb do conv ad */
#define ADM5B 1 /* Porta de leitura do msb do conv ad */
#define ADOFF 2 /* Porta para ajuste de offset */
#define ADSTS 4 /* Porta de controle do modo de operacao */
#define DAM5B 6 /* Porta de escrita do msb do conversor da */
#define DAL5B 7 /* Porta de escrita do lsb do conversor da */
#define CTL 8 /* Porta de controle do mux de ent/saida e dos 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 (i=sample) */
#define BSHSA 0x08 /* Bit de controle do sample-holds das saidas(i=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 0-4V */
#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; /* Codigo de erro */
unsigned char modoper; /* Byte que contem o modo de operacao da placa */
unsigned int read_anl(),adj_offset();
unsigned char offset;
int get_key();
void leitura();
void grafico();
void eixos();
void arquivo();
void selchda();
void write_dig();

/*-----*/

/* PROGRAMA PRINCIPAL */

/*-----*/

void main()
{
    char loop, inicio;
    int i, input;
    float w[500], 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"); /* inicializacao do modulo grafico */
leitura(w,volt_estac);
cleardevice();
eixos();              /* construcao dos eixos x e y do grafico */
outtextxy(250,190,"ESTADO ESTACIONARIO");
grafico(w);           /* construcao do grafico para os dados nao filtrados */
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 tecla");
outtextxy(300,90,"para iniciar regime transiente");
getch();
cleardevice();
write_dig(1);         /* abertura da valvula solenoide */
leitura(w,volt_trans); /* leitura dos dados no estado transiente */
eixos();
outtextxy(250,185,"ESTADO TRANSIENTE");
grafico(w);
grafico(volt_trans);
outtextxy(350,10,"Para continuar aperte uma tecla");
getch();
write_dig(0);         /* fechamento da valvula solenoide */
cleardevice();
outtextxy(250,80,"F1 - INICIO DO PROCESSO");
outtextxy(250,90,"F2 - ARQUIVO DE RESULTADOS");
outtextxy(250,100,"F3 - RETORNO AO PROGRAMA");
loop:
input = get_key();    /* selecao da tecla acionada */
switch(input)
{
  case F1 :
    goto inicio;
  case F2 :
    arquivo(w,volt_trans);
    goto inicio;
  case F3 :
    break;
}
if((input != F1) & (input != F2) & (input != F3))
{
  outtextxy(250,110,"-----");
  outtextxy(250,120,"Entre de novo com a opcao ");
  goto loop;
}
closegraph();        /* finalizacao do modulo grafico */
}
/*-----*/
/* SUBROTINA DE LEITURA E FILTRAGEM DOS DADOS */
/*-----*/
void leitura(float x[500],float y[500])
{
  int i,j;
  float alfa,soma;
  alfa = 0.5;
  for(i=0;i(500;i++)
  {
    soma = 0.0;
    for(j=0;j(40;j++) soma = soma + read_anl(0,offset); /* leitura dos dados */
    y[i] = soma/40.0*(5000.0/4095.0);
    x[i] = y[i];
    if(i > 1) y[i] = alfa*alfa*y[i] + 2.0*(1.0-alfa)*y[i-1] - /* filtragem */
                (1.0-alfa)*(1.0-alfa)*y[i-2];          /* dos dados */
  }
}

```

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

```
/* SUBROTINA DE CONSTRUCAO DO GRAFICO */
```

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

```
void grafico(float y[500])
{
  int i,ix,ponto[600];
  for(i=0;i(500;i++)
  {
    ix = i + 80;          /* coordenada x */
    ponto[ix] = 160.0 - 0.03*y[i]; /* 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(80,0,80,160); /* linha vertical */
  line(80,160,600,160); /* linha horizontal */
  for(i=0.0;i(=500.00;i=i+98.89) /* divisoes do eixo x */
  {
    ix = i + 80;
    line(ix,160,ix,163);
    ticx = 0.015168*i;
    gcvt(ticx,3,&buf);
    outtextxy(ix+2,175,&buf);
  }
  ticy = 12.0;
  for(i=0;i(=150;i=i+30) /* divisoes do eixo y */
  {
    iy = i + 10;
    line(75,iy,80,iy);
    ticy = ticy - 2.0;
    gcvt(ticy,3,&buf);
    outtextxy(50,iy+4,&buf);
  }
  setttextjustify(1,0);
  setttextstyle(0,0,1);
  outtextxy(500,185,"tempo(s)"); /* titulo do eixo x */
  setttextjustify(1,1);
  setttextstyle(0,1,1);
  outtextxy(15,80,"altura manometrica(cmHg)"); /* titulo do eixo y */
  setttextstyle(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 x[500],float y[500])
{
  FILE *arq1;
  char arq[15],esco;
  int i;
  clrscr();
  do
  {
    delline();
    printf("\n      De o nome do arquivo de dados : ");
    scanf("%s",&arq);
    if((arq1 = fopen(arq,"rt")) != NULL)
    {
      printf("\n      Arquivo ja existente. Destruir (S/N) ? ");
      esco = tolower(getche());
      fclose(arq1);
    }
  }
  while(esco == 'n');
  arq1 = fopen(arq,"wt");
  clrscr();
  for(i=0;i<350;i++)
  {
    fprintf(arq1," %f \n",0.015168*(i+1));
    fprintf(arq1," %f \n",12.6*(-2.67278+0.0024234*y[i]));
    fprintf(arq1," %f \n",12.6*(-2.67278+0.0024234*x[i]));
  }
}
-----*/

/* INICIO DAS ROTINAS DE TRATAMENTO DA AD/DA */
-----*/

/* SELECAO DO CANAL DO MUX DE 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); /* Seleciona o canal */
  modoper |= BSHEAN;        /* Introduz bit de sample */
  outportb(base + ADSTS,modoper); /* Sample-hold da inan1 em sample */
  modoper &= ~BSHEAN;       /* Retira bit de sample */
  outportb(base + ADSTS,modoper); /* Sample-hold da inan1 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 (bdachan0-2) */
                           /* Seleciona o canal+sample-hold corresp */
  chda |= BSHSA;          /* Introduz o bit de sample */
  outportb(base + CTL,chda); /* Coloca o sample-hold do canal em sample */
}
-----*/

/* ROTINA DE ESPERA DO FIK DA CONVERSAD */
-----*/

```

```

wait_eoc()
{
  unsigned register int ciclos,status;
  for (ciclos = TIME_OUT;ciclos;ciclos --)
    return;
}

/*-----*/

/* ROTINA DE LEITURA DO CONVERSOR */

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

/*-----*/

unsigned int read_an(unsigned char canal,unsigned char offset)
{
  unsigned int dado;
  unsigned int dadols,dadoms;
  selchad(canal);
  outportb(base+ADOFF,offset); /* Normaliza 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 bit's mais signific. */
  dadols = inportb(base+ADLSB); /* le os 8 bit's menos signific. */
  dado = (dadoms << 8) + dadols;
  return (dado);
}

/*-----*/

/* ESCREVE O VALOR DE 'dado' NA SAIDA ANALOGICA DE 'canal' */

/*-----*/

void write_an(unsigned int dado,unsigned char canal)
{
  unsigned char dadols,dadoms;
  dadols = dado; /* Inicia o deslocamento do dado */
  dadoms = dado >> 8; /* Desloca os dois bits mais signific. */
  outportb(base + DALSB,dadols); /* Escreve byte menos significativo */
  outportb(base + DAMSB,dadoms); /* Escreve byte mais significativo */
  selchda(canal); /* Transf para o canal de saida 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
200h -> Se em 4 tentativas de ajustar o offset isto nao
for conseguido
Num -> De 0h a 0FFh que e' o valor para 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 5 V ? */
trigger = 0xa00;          /* sim, armazene a00h como valor de comparacao */
else
trigger = 0xb33;
inatural = read_anl(7,140); /* le a ent de refer. centrando o offset */
if(inatural < (trigger - 0x100)) /* existe a referencia de (3500mV)? */
return(0x100);          /* nao,retorne uma condicao de erro */
for(i=0;flag ==0;++i)      /* inicio do integ. p/ busca do pto otimo */
(
inatural = read_anl(7,(i&0xff)); /* tente com i valor deoffset */
for(delay=0;delay<50;++delay) /* rotina para atraso */
if(inatural == trigger) /* erro de leitura = zero? */
flag = 1;          /* termine a execucao, ponto encontrado */
if(i == 0x400)          /* feita o scan 4 vezes sem sucesso? */
return(0x200);      /* termine e retorne condicao de erro */
)
return (i-1);          /* termine e retorne o valor ajustado */
}

```

```

/*-----*/

```

```

/* ROTINA PARA SELECAO AUTOMATICA DO MODO DE OPERACAO
ACEITA OS SEGUINTEs PARAMETROS: */

```

```

/* n = 0 -) 0-5V (modo default)
n = 1 -) 1-5V
n = 2 -) 0-4V
n = 3 -) bipolar

```

```

OBS : modo de leitura do conversor : pooling */

```

```

/*-----*/

```

```

modo_oper(char n)
{
unsigned char masc;
masc=MASC0_5; /* default operacao de 0-5V */
switch(n) /* scan do modo de operacao alternativo */
{
case 1:
masc = MASC1_5;
break;
case 2:
masc = MASC0_4;
break;
case 3:
masc = MASCBIP;
break;
}
modoper = masc; /* armazena o modo de operacao setado */
outportb(base+ADSTS,masc); /* envia a placa */
return;
}

```

```

/*-----*/

```

APÊNDICE B

PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO DO VAZAMENTO

```

/* ----- */
/* ANÁLISE DO TRANSIENTE HIDRAULICO CAUSADO PELA RUPTURA DE UMA TUBULACAO
   NUM RESERVATORIO A MONTANTE E EMA VALVULA A JUSANTE DA TUBULACAO */
/* ----- */
#include <math.h>
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
void fator_de_atrito ();
void impress();
/* ----- */
/* PROGRAMA PRINCIPAL */
/* ----- */
void main()
{
  FILE *arq1;
  char esco1,esco2,arq[20];
  int i,j,k,nn,nt,np,n[2],cont_imp,inc_imp,imp,sim;
  float xl,l,a,d,ar,f,v0,q0,qor,hr,hs,hor,r,tmax,g,ca,cf,cn,cp,cv,cb,cc,dhf,t,dt;
  float ro,mi,re,rr,kf,kp,e,cl,rp;
  float q[2][100],v[2][100],h[2][100],qp[2][100],hp[2][100],y[2];
  clrscr();
/* ----- */
/* ENTRADA DE DADOS */
/* ----- */
  printf("\nEntre com a posicao do vazamento: x/L = ");
  scanf("%f", &xl);
  n[0] = xl*100;
  n[1] = 100 - n[0];
  nt = n[0] + n[1];
  inc_imp = 10;
  np = 2;
  imp = inc_imp*10;
  l = 36.75;
  d = .02127;
  ro = 1000.0;
  mi = 0.001;
  printf("\nEntre com o Numero de Reynolds: Re = ");
  scanf("%f", &re);
  v0 = mi*re/(ro*d);
  ar = .7854*d*d;
  q0 = v0*ar;
  printf("\nEntre com a Razao de vazamento: Qor/Q0 = ");
  scanf("%f", &r);
  qor = r*q0;
  kf = 2.19e09;
  kp = 3.0e09;
  e = 0.0025;
  rp = 0.46;
  cl = 2.0*e/d*(1.0+rp) + d/(d+e);
  a = sqrt(kf/(ro*(1.0 + kf*d/(kp*e)*cl)));
  rr = 0.0;
  hr = 10.333;
  g = 9.81;
  clrscr();
/* ----- */
/* OPCAO DE ARQUIVO (S/N)? */
/* ----- */
  printf("\n\n\n\n\n Deseja arquivar dados (S/N) ? " );

```

```

escol = tolower(getche());
sim = 0;
if(escol == 's')
{
    sim = 1;
    do
    {
        printf("\n\n\n      De o nome do arquivo de dados : ");
        scanf("%s",&arq);
        if((arq1 = fopen(arq,"rt")) != NULL)
        {
            printf("\n\n      Arquivo ja existente. Destruir (S/N) ? ");
            esco2 = tolower(getche());
        }
        else esco2 = 's';
    } while(esco2 == 'n');
    arq1 = fopen(arq,"wt");
}
clrscr();

/* ----- */
/* IMPRESSAO DOS DADOS */
/* ----- */

printf("Dados\n\n");
printf("L = %5.2f m\nD = %5.3f cm\nQ0 = %6.2f m/s\nHr = %6.3f m\n\n",L,d*100.0,q0*1e6,hr);
printf("Resultados do transiente hidraulico para um vazamento a %4.2f de L\n",x1);
printf("tempo x/1   .0   .1   .2   .3   .4   .5   .6   .7   .8   .9   1.\n");
printf("===== \n");

/* ----- */
/* ESTADO ESTACIONARIO */
/* ----- */

t = 0.0;
tmax = .25;
dt = 1/(a*nt);
fator_de_atrito(d,q0,ar,ro,mi,rr,dt,g);
f = y[0];
dhf = f/(2.*g*dt*ar*ar);
hs = hr - nt*dhf*q0*q0;
h[0][0] = hr;
for(i=0;i<np;i++)
{
    nn = n[i] + 1;
    for(j=0;j<nn;j++)
    {
        q[i][j] = q0;
        h[i][j] = h[i][0] - j*dhf*q0*q0;
    }
    h[i+1][0] = h[i][nn-1];
}

if(sim == 1)
{
/* ----- */
/* ARQUIVO DE RESULTADOS - ESTADO ESTACIONARIO */
/* ----- */

    nn = n[np-1];
    fprintf(arq1,"%f %f \n",t,(h[np-1][nn]-h[0][0])*100.0);
}

/* ----- */
/* IMPRESSAO DOS RESULTADOS - ESTADO ESTACIONARIO */
/* ----- */

impress(np,inc_imp,n,ar,t,q,h);

```



```

/* ----- */
/* ESTADO TRANSIENTE */
/* ----- */

ca = g*ar/a;
cv = q0*q0/(ca*hs);
nn = n[0];
hor = h[0][nn];
cb = qor*qor/(0.0*ca*ca*hor);
cont_imp = 0;
while(t<=tmax)
{
  t = t + dt;
}

/* ----- */
/* PONTOS INTERNOS */
/* ----- */

for(i=0;i<np;i++)
{
  nn = n[i];
  for(j=1;j<nn;j++)
  {
    fator_de_atrito(d,q[i][j],ar,ro,mi,rr,dt,y);
    cf = y[i];
    cn = q[i][j+1] - ca*h[i][j+1] - cf*q[i][j+1]*fabs(q[i][j+1]);
    cp = q[i][j-1] + ca*h[i][j-1] - cf*q[i][j-1]*fabs(q[i][j-1]);
    qp[i][j] = 0.5*(cp + cn);
    hp[i][j] = (cp - qp[i][j])/ca;
  }
}

/* ----- */
/* CONDICAO DE CONTORNO A MONTANTE */
/* ----- */

fator_de_atrito(d,q[0][0],ar,ro,mi,rr,dt,y);
cf = y[1];
cn = q[0][1] - ca*h[0][1] - cf*q[0][1]*fabs(q[0][1]);
hp[0][0] = hr;
qp[0][0] = cn + ca*hr;

/* ----- */
/* CONDICAO DE CONTORNO NO VAZAMENTO */
/* ----- */

nn = n[0];
fator_de_atrito(d,q[0][nn],ar,ro,mi,rr,dt,y);
cf = y[1];
cp = q[0][nn-1] + ca*h[0][nn-1] - cf*q[0][nn-1]*fabs(q[0][nn-1]);
fator_de_atrito(d,q[np-1][0],ar,ro,mi,rr,dt,y);
cf = y[1];
cn = q[np-1][1] - ca*h[np-1][1] - cf*q[np-1][1]*fabs(q[np-1][1]);
cc = (cn-cp)/(2.0*ca);
hp[0][nn] = cb - cc - sqrt(cb*(cb - 2.0*cc));
hp[np-1][0] = hp[0][nn];
qp[0][nn] = cp - ca*hp[0][nn];
qp[np-1][0] = cn + ca*hp[np-1][0];

/* ----- */
/* CONDICAO DE CONTORNO A JUSANTE */
/* ----- */

nn = n[np-1];
fator_de_atrito(d,q[np-1][nn],ar,ro,mi,rr,dt,y);
cf = y[1];

```

```

cp = q[ncp-1][cnn-1] + ca*h[ncp-1][cnn-1] - cf*q[ncp-1][cnn-1]*fabs(q[ncp-1][cnn-1]);
qp[ncp-1][cnn] = 0.5*(-cv + sqrt(cv*(cv + 4.0*cp)));
hp[ncp-1][cnn] = (cp - qp[ncp-1][cnn])/ca;
/* ----- */
/* ARMAZENAMENTO DAS VARIÁVEIS PARA O PRÓXIMO PASSO */
/* ----- */
for(i=0;i[ncp;i++)
(
  nn = n[i] + 1;
  for(j=0;j[nn;j++)
  (
    q[i][j] = qp[i][j];
    h[i][j] = hp[i][j];
  )
)
if(sim == 1)
(
/* ----- */
/* ARQUIVO DE RESULTADOS - ESTADO TRANSIENTE */
/* ----- */
  nn = n[ncp-1];
  fprintf(arq1, "%f %f \n", t, (h[ncp-1][cnn]-h[0][0])*100.0);
)
/* ----- */
/* IMPRESSÃO DOS RESULTADOS - ESTADO TRANSIENTE */
/* ----- */
cont_imp = cont_imp + 1;
if(cont_imp == imp)
(
  printf("-----\n");
  impress(ncp, inc_imp, n, ar, t, q, h);
  cont_imp = 0;
)
printf("-----\n");
fclose(arq1);
)
/* ----- */
/* SUBROTINA PARA O CÁLCULO DO FATOR DE ATRITO */
/* ----- */
void fator_de_atrito(a,b,c,d,e,f,g,y)
float a,b,c,d,e,f,g,y[2];
(
  float y1,y2,y3,y4,y5,y6;
  y1 = d*b*a/(c*e);
  y2 = pow(7.0/y1,0.9) + 0.27*f;
  y3 = pow(37530.0/y1,16.0);
  y4 = pow(-2.457*log(y2),16.0);
  y5 = 8.0*pow(pow(8.0/y1,12.0) + 1.0/(pow(y3+y4,1.5)),1.0/12.0);
  y6 = y5*g/(2.0*a*c);
  y[0] = y5;
  y[1] = y6;
)
/* ----- */
/* SUBROTINA DE IMPRESSÃO */
/* ----- */

```

```
void impress(np,in,n,ar,t,q,h)
int np,in,n[2];
float ar,t,q[2][100],h[2][100];
{
  int i,j,k,nn;
  float v[2][100];
  for(i=0;i<np;i++)
  {
    nn = n[i] + 1;
    for(j=0;j<nn;j++) v[i][j] = q[i][j]/ar;
  }
  printf("X5.3f V =",t);
  for(i=0;i<np;i++)
  {
    k = in*i/2;
    nn = n[i] + 1;
    for(j=k;j<nn;j=j+in) printf(" X5.2f",v[i][j]);
  }
  printf("\n      H =");
  for(i=0;i<np;i++)
  {
    k = in*i/2;
    nn = n[i] + 1;
    for(j=k;j<nn;j=j+in) printf(" X5.2f",h[i][j]);
  }
  printf("\n");
}
```

APÊNDICE C

CURVA DE CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE ORIFÍCIO

Tab. C.1 - Dados da Curva de Calibração do Medidor de Orifício

$\Delta H(\text{cmHg})$	$Q(\text{cm}^3/\text{s})$	Re
1,33	38,64	2313
2,43	60,76	3636
3,78	74,38	4452
8,25	115,54	6916
10,35	133,17	7971
13,38	145,76	8725
14,78	155,06	9292
20,18	179,74	10759
24,08	198,24	11869
27,25	207,83	12441
30,23	220,75	13214
34,65	235,51	14080
38,9	247,6	14822
41,73	257,72	15427
46,93	270,83	16212
51,5	288,89	17293

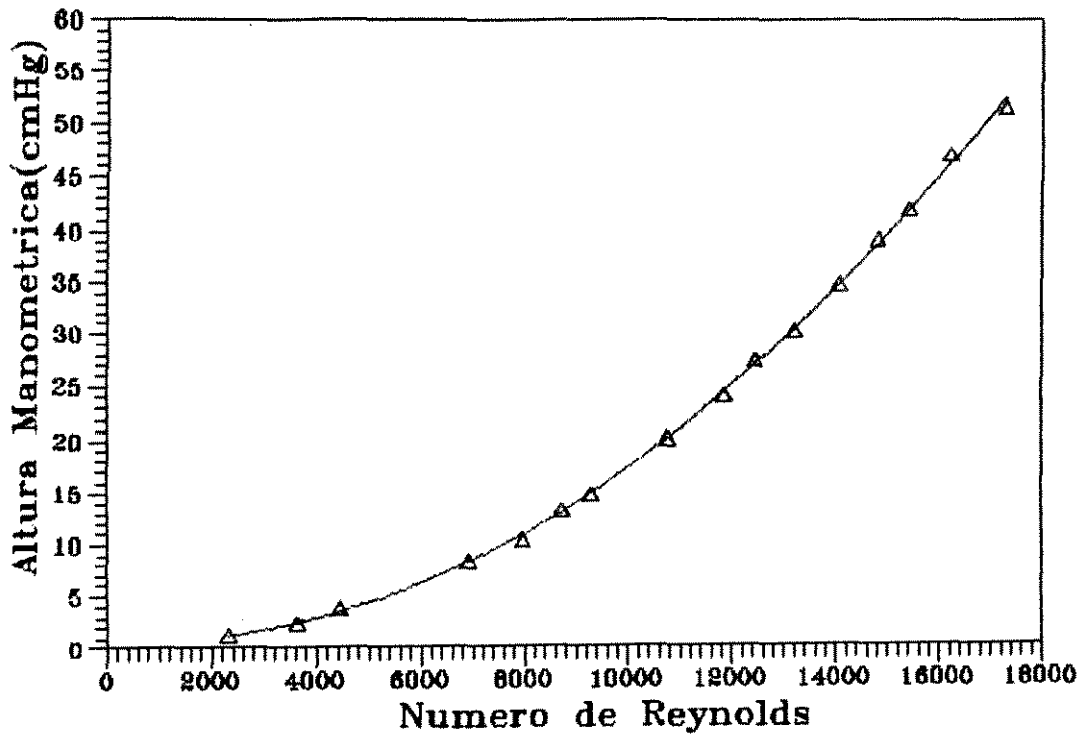


Fig. C.1 - Curva de Calibração do Medidor de Orifício

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

- 1 - BAGHDADI, A. H. A.; MANSY, H. A., 1988 - "Mathematical Model for Leak Location in Pipelines", *Appl. Math. Modelling*, 12 (1), pags. 25-30.
- 2 - BILLMANN, L.; ISERMANN, R., 1987 - "Leak Detection Methods for Pipelines", *Automatica*, 23 (3), pags. 381-385.
- 3 - FUKUDA, T.; MITSUOKA, T., 1986 - "Pipeline Inspection and Maintenance by Applications of Computer Data Processing and Robotic Technology", *Computers in Industry*, 7 (1), pags. 5-13.
- 4 - GALLY, M.; RIETORD, E., 1986 - "Détection et Localisation de Fuites en Écoulement Instationnaire Application aux Oléoducs et Gazoducs", *Revue Française de Mécanique*, 2, pags. 61-65.
- 5 - TITOW, W. V., 1984 - "PVC Technology - Fourth Edition", *Elsevier Applied Science Publishers Ltd*, pag. 1190.
- 6 - WATTERS, G. Z.; JEPSON, R.W.; FLAMMER, G. H., 1976 - "Water Hammer in PVC Reinforced Plastic Pipe", *Journal Hydraulics Division*, HY7 (7), pags. 831-843.
- 7 - WIGGERT, D. C.; HATFIELD, F. J.; OTWELL, R. S., 1985 - "The Effect of Elbow Restraint on Pressure Transients", *Transactions of ASME*, 107 (9), pags. 402-406.
- 8 - WIKE, A., 1986 - "SCADA - Based Leak Detection Systems", *Pipeline Gas Journal*, 213 (6), pags. 16-20.