

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 25.07.02

Ass.: 

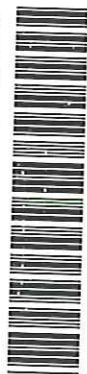
**“ESTUDO ANALÍTICO E EXPERIMENTAL DOS FENÔMENOS
TRANSITÓRIOS DURANTE O ENCHIMENTO DE TUBULAÇÕES
RAMIFICADAS.”**

JEFFERSON LUÍS COUTINHO

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos - Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Doutor em Hidráulica e
Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Hans George Arens

DEDALUS - Acervo - EESC



31100037044


São Carlos

2002

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JEFFERSON LUÍS COUTINHO**

Tese defendida e julgada em 19-07-2002 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Tit. **HANS GEORGE ARENS (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO




Prof. Tit. **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



Prof. Dra. **LUÍSA FERNANDA RIBEIRO REIS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado




Prof. Dr. **PODALVYRO AMARAL DE SOUZA**
(Escola Politécnica/USP)

Aprovado



Prof. Dr. **CARLOS AUGUSTO CARVALHO MAGALHÃES**
(Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP/Botucatu)

APROVADO



Prof. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Aos meus pais, Sebastião e Emilia, à
minha irmã, Rosenéia e à minha
namorada, Geisa pelo amor, apoio e
compreensão dedicados.*

*Ao meu orientador e amigo Prof. Dr.
Hans George Arens, a quem devo
grande parte dos méritos deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Hans George Arens pela orientação segura e precisa fornecida durante a elaboração deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida durante a fase inicial da pesquisa.

À Caixa Econômica Federal, pela compreensão dispensada durante a elaboração desta Tese.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP pela colaboração e amizade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	vii
RESUMO.	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4. MÉTODO	9
4.1. Considerações gerais	9
4.2. Estudos preliminares para a montagem experimental.....	9
4.3. Modelagem matemática.....	14
4.3.1. Hipóteses básicas.....	14
4.3.2. Modelo rígido.....	16
4.3.3. Método numérico para a solução das equações diferenciais.....	19
4.4. Experimento proposto – considerações.....	24
4.4.1. Especificação dos equipamentos e materiais.....	27
4.4.1.1. Medidor de Vazão	27
4.4.1.2. Medidor de Pressão	29
4.4.1.3. Sensor de Passagem.....	30
4.4.1.4. Placa de Aquisição de Dados	31
4.4.1.5. Tubulação.....	31
5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA INICIAL	32
6. ENSAIOS.....	38

6.1. Ensaio Preliminar	40
6.2. Ensaio com a Configuração Básica.....	43
6.2.1. Procedimentos e Resultados	44
1.3. Ensaio com acréscimo de um tubo de 10 m.....	54
1.3.1. Procedimentos e Resultados –Tubo 10 m	56
1.4. Ensaio com Redução	64
1.4.1. Procedimentos e Resultados	64
1.5. Ensaio com Cotovelo e Redução	73
1.5.1. Procedimentos e Resultados	74
1.6. Ensaio com conexão em “T” passagem direta e lateral	79
1.6.1. Procedimentos e Resultados	80
6.7. Ensaio com conexão em “T” passagem bilateral.....	84
6.8. Ensaio com Conexão em “Y”: redução na passagem direta	93
6.8.1. Procedimentos e Resultados	94
6.9. Ensaio com Conexão em “Y”: redução na passagem lateral.....	101
6.9.1. Procedimentos e Resultados	102
6.10. Análise do efeito dos parâmetros ajustados.....	109
6.10.1. Efeito do ajuste do L_0 (comprimento de aceleração)	109
6.10.2. Estudo das velocidades iniciais no T e Y	114
7. CONCLUSÕES.....	118
8. RECOMENDAÇÕES.....	119
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120
ANEXO A:Método Runge-Kutta para N equações diferenciais simultâneas	123
ANEXO B: Relatório Fotográfico	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Experimento realizado por LIOU & HUNT (1996)	6
Figura 2 – Esquema estudado por MARTIN (1976)	7
Figura 3 – Esquema do sistema básico para montagem no laboratório.....	10
Figura 4 – Esquema montado por MAGALHÃES (1999)	13
Figura 5 – Diagrama de forças sobre um elemento cilíndrico de fluido	17
Figura 6 – Configuração física para o equacionamento básico.....	20
Figura 7 – Modelo para aplicação das Equações 21 e 22.	23
Figura 8 – Ilustração da junção entre as tubulações 1, 2 e 3.....	23
Figura 9 – Esquema final proposto para montagem no laboratório	26
Figura 10 – Evolução da velocidade da coluna líquida para o caso 1	33
Figura 11 – Evolução da velocidade da coluna líquida para o caso 2.....	34
Figura 12 – Evolução da velocidade da coluna líquida para o caso 3.....	35
Figura 13 – Configuração utilizada no caso 3	36
Figura 14 – Posição da frente líquida em cada tubo para o caso 2.	37
Figura 15 – Pressão (mH ₂ O) no tubo 1 nos 3 casos, até t = 3,04 s	37
Figura 16 – Configuração do ensaio preliminar	39
Figura 17 – Configuração básica comum aos ensaios	39
Figura 18 – Evolução da velocidade do escoamento (ajuste 1)	42
Figura 19 – Evolução da velocidade do escoamento (ajuste 2)	43
Figura 20 – Ligação do manômetro ar/água.....	44
Figura 21 – Fator de atrito em função da velocidade conforme eq. (33).....	49
Figura 22 – K x Reynolds para um cotovelo de 45° - PORTO (1997).....	50
Figura 23 – Dados experimentais e modelo com fator de atrito cte.....	52
Figura 24 – Dados experimentais e modelo com fator de atrito = f(V).....	53
Figura 25 – Comparação entre os modelos com f = cte e f = f(V).....	54
Figura 26 – Configuração dos ensaios com tubo de 10 m (D ₁ = D ₂)	55
Figura 27 – Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 0 voltas).....	56

Figura 28 – Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 7 voltas).....	57
Figura 29 – Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 8 voltas).....	58
Figura 30 – Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 9 voltas).....	59
Figura 31 – Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 10 voltas).....	61
Figura 32 – Resultado do modelo com redução de K em R1 (10 voltas).....	61
Figura 33 – Resultados dos ensaio com tubo de 10 m (R1 = 11 voltas)	63
Figura 34 – Configuração do ensaio com redução na canalização.....	65
Figura 35 – Ensaio com redução: velocidade e posição (R1 = 0 voltas).....	66
Figura 36 – Ensaio com redução: Pressões (R1 = 0 voltas).....	67
Figura 37 – Ensaio com redução: velocidade e posição (R1 = 7 voltas).....	67
Figura 38 – Ensaio com redução: Pressões (R1 = 7 voltas).....	68
Figura 39 – Ensaio com redução: velocidade e posição (R1 = 8 voltas).....	68
Figura 40 – Ensaio com redução: Pressões (R1 = 8 voltas).....	69
Figura 41 – Ensaio com redução: velocidade e posição (R1 = 9 voltas).....	69
Figura 42 – Ensaio com redução: Pressões (R1 = 9 voltas).....	70
Figura 43 – Ensaio com redução: velocidade e posição (R1 = 10 voltas).....	70
Figura 44 – Ensaio com redução: Pressões (R1 = 10 voltas).....	71
Figura 45 – Ensaio com redução: velocidade e posição (R1 = 11 voltas).....	71
Figura 46 – Ensaio com redução: Pressões (R1 = 11 voltas).....	72
Figura 47 – Configuração do ensaio - cotovelo com redução.....	73
Figura 48 – Ensaio com cotovelo e redução: V e S (R1 = 0 voltas).....	75
Figura 49 – Ensaio com cotovelo e redução: Pressões (R1 = 0 voltas).....	75
Figura 50 – Ensaio com cotovelo e redução: V e S (R1 = 7 voltas).....	76
Figura 51 – Ensaio com cotovelo e redução: Pressões (R1 = 7 voltas).....	76
Figura 52 – Ensaio com cotovelo e redução: V e S (R1 = 9 voltas).....	77
Figura 53 – Ensaio com cotovelo e redução: Pressões (R1 = 9 voltas).....	77
Figura 54 – Pressões interligadas (ensaio com cotovelo: R1 = 0 voltas)	78
Figura 55 – Configuração do ensaio com T passagem direta	79
Figura 56 – Ensaio com T direto: velocidade (R1 = 0 voltas)	81
Figura 57 – Ensaio com T direto: posição (R1 = 0 voltas)	81

Figura 58 – Ensaio com T direto: Pressões (R1 = 0 voltas).....	82
Figura 59 – Ensaio com T direto: velocidade (R1 = 7 voltas).	82
Figura 60 – Ensaio com T direto: posição (R1 = 7 voltas).	83
Figura 61 – Ensaio com T direto: Pressões (R1 = 7 voltas).....	83
Figura 62 – Configuração do ensaio com T passagem bilateral	85
Figura 63 – Ensaio com T bilateral: velocidade (R1 = 0 voltas).....	85
Figura 64 – Ensaio com T bilateral: posição (R1 = 0 voltas).....	86
Figura 65 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 2 (R1 = 0 voltas)	86
Figura 66 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 3 (R1 = 0 voltas)	87
Figura 67 – Ensaio com T bilateral: velocidade (R1 = 7 voltas).....	87
Figura 68 – Ensaio com T bilateral: posição (R1 = 7 voltas).....	88
Figura 69 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 2 (R1 = 7 voltas)	88
Figura 70 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 3 (R1 = 7 voltas)	89
Figura 71 – Ensaio com T bilateral: velocidade (R1 = 8 voltas).....	89
Figura 72 – Ensaio com T bilateral: posição (R1 = 8 voltas).....	90
Figura 73 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 2 (R1 = 8 voltas)	90
Figura 74 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 3 (R1 = 8 voltas)	91
Figura 75 – Ensaio com T bilateral: velocidade (R1 = 9 voltas).....	91
Figura 76 – Ensaio com T bilateral: posição (R1 = 9 voltas).....	92
Figura 77 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 2 (R1 = 9 voltas)	92
Figura 78 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 3 (R1 = 9 voltas)	93
Figura 79 – Configuração do ensaio com Y com redução na passagem direta	94
Figura 80 – Y com redução direta: velocidade (R1 = 0 voltas)	95
Figura 81 – Y com redução direta: posição (R1 = 0 voltas)	95
Figura 82 – Y com redução direta: pressões tubo 2 (R1 = 0 voltas)	96
Figura 83 – Y com redução direta: pressões tubo 3 (R1 = 0 voltas)	96
Figura 84 – Y com redução direta: velocidade (R1 = 7 voltas)	97
Figura 85 – Y com redução direta: posição tubo 2 (R1 = 7 voltas)	97
Figura 86 – Y com redução direta: posição tubo 3 (R1 = 7 voltas)	98
Figura 87 – Y com redução direta: pressões tubo 2 (R1 = 7 voltas)	98

Figura 88 – Y com redução direta: pressões tubo 3 (R1 = 7 voltas)	99
Figura 89 – Y com redução direta: velocidade (R1 = 9 voltas)	99
Figura 90 – Y com redução direta: posição (R1 = 9 voltas)	100
Figura 91 – Y com redução direta: pressões tubo 2 (R1 = 9 voltas)	100
Figura 92 – Y com redução direta: pressões tubo 3 (R1 = 9 voltas)	101
Figura 93 – Configuração do ensaio com Y (redução na passagem lateral)..	102
Figura 94 – Y com redução lateral: velocidade (R1 = 0 voltas)	103
Figura 95 – Y com redução lateral: posição (R1 = 0 voltas)	103
Figura 96 – Y com redução lateral: pressões (R1 = 0 voltas)	104
Figura 97 – Y com redução lateral: velocidade (R1 = 7 voltas)	104
Figura 98 – Y com redução lateral: posição (R1 = 7 voltas)	105
Figura 99 – Y com redução lateral: pressões (R1 = 7 voltas)	105
Figura 100 – Y com redução lateral: velocidade (R1 = 8 voltas)	106
Figura 101 – Y com redução lateral: posição (R1 = 8 voltas)	106
Figura 102 – Y com redução lateral: pressões (R1 = 8 voltas)	107
Figura 103 – Y com redução lateral: velocidade (R1 = 9 voltas)	107
Figura 104 – Y com redução lateral: posição (R1 = 9 voltas)	108
Figura 105 – Y com redução lateral: pressões (R1 = 9 voltas)	108
Figura 106 – Ensaio com redução: efeito do comprimento L_o no reservatório (R1 = 0 voltas).....	109
Figura 107 – Ensaio com redução: efeito do comprimento L_o na própria redução (R1 = 0 voltas)	110
Figura 108 – Efeito do comprimento L_o na passagem direta do T, sendo L_o na passagem lateral igual a 0,2 m (R1 = 0 voltas).....	111
Figura 109 – Efeito do comprimento L_o na passagem lateral do T, sendo L_o na passagem direta igual a 0,2 m (R1 = 0 voltas).....	111
Figura 110 – Efeito do comprimento L_o na passagem direta e passagem lateral do T com variações idênticas (R1 = 0 voltas)	112
Figura 111 – Efeito do comprimento L_o na passagem direta do Y, sendo L_o na passagem lateral igual a 0,2 m (R1 = 0 voltas).....	112

Figura 112 – Efeito do comprimento L_0 na passagem lateral do Y, sendo L_0 na passagem direta igual a 0,2 m ($R1 = 0$ voltas).....	113
Figura 113 – Efeito do comprimento L_0 na passagem direta e passagem lateral do Y com variações idênticas ($R1 = 0$ voltas).....	113
Figura 114 – Geometria para estabelecimento das condições de contorno ...	115
Figura 115 – Efeito das diferentes velocidades iniciais no T passagem direta ($R1 = 0$ voltas).....	116
Figura 116 – Efeito das diferentes velocidades iniciais no Y passagem direta com redução ($R1 = 0$ voltas).....	116
Figura 117 – Efeito das diferentes velocidades iniciais no Y passagem lateral com redução ($R1 = 0$ voltas).....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores tabelados de K	41
Tabela 2– Valores tabelados de K para o experimento b.....	45
Tabela 3– Valores para o fator de atrito.....	47
Tabela 4– Perda localizada em válvula de gaveta em função do n° de voltas .	55
Tabela 5– Dimensões utilizadas na montagem com tubo de 10 m	55
Tabela 6– Parâmetros dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 0 voltas).....	56
Tabela 7– Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 0 voltas).	57
Tabela 8– Parâmetros dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 7 voltas).....	58
Tabela 9– Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 7 voltas).	58
Tabela 10– Parâmetros dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 8 voltas).	59
Tabela 11– Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 8 voltas).	59
Tabela 12– Parâmetros dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 9 voltas).	60
Tabela 13– Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 9 voltas).	60
Tabela 14– Parâmetros dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 10 voltas).	62
Tabela 15– Resultados do ajuste dos ensaios conforme Figura 31	62
Tabela 16– Resultados do ajuste dos ensaios conforme Figura 32	62
Tabela 17– Parâmetros dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 11 voltas).	63
Tabela 18– Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 11 voltas).....	63
Tabela 19– Dimensões utilizadas na montagem apresentada na Figura 34.....	65
Tabela 20 – Nível Z_R do reservatório utilizado nos ensaios	65
Tabela 21– Dimensões utilizadas na montagem apresentada na Figura 47.....	73
Tabela 22– Dimensões utilizadas na montagem apresentada na Figura 55.....	79
Tabela 23– Dimensões utilizadas na montagem apresentada na Figura 62.....	84
Tabela 24– Dimensões utilizadas na montagem apresentada na Figura 79.....	93
Tabela 25– Dimensões utilizadas na montagem apresentada na Figura 93...	101

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- A - área da seção transversal do tubo; ampere (unid. de medida de corrente)
- D - diâmetro interno do conduto
- f - fator de atrito de Darcy-Weisbach
- F - força
- g - aceleração da gravidade
- H - nível d'água no reservatório em relação a seu fundo
- H_0 - carga inicial de pressão
- K - coeficiente de perda de carga localizada
- K_c - expoente politrópico
- L - comprimento da coluna líquida
- L_0 - comprimento fictício que leva em conta a aceleração do fluido a montante do tubo
- mH_2O - unidade de medida de pressão (metro de coluna de água)
- P - pressão
- P_0 - pressão inicial
- Q - vazão
- Vol - volume
- Rey - número de Reynolds
- R-K-4 - Runge-Kutta de 4ª ordem
- R-K-N - Runge-Kutta-Nyström
- S_0 - posição inicial
- S_1 - posição da frente em relação a origem do tubo 1
- S_2 - posição da frente em relação a origem do tubo 2
- S_3 - posição da frente em relação a origem do tubo 3
- SC - superfície de controle
- t - tempo
- V - velocidade média do escoamento em cada instante

VC - volume de controle

x - comprimento da coluna líquida em função do tempo

z - distância em relação a um plano horizontal de referência (energia de posição)

z_R - nível do reservatório em relação a um plano horizontal de referência (energia de posição)

α - ângulo entre o eixo da tubulação e um plano horizontal de referência

β - ângulo entre duas tubulações adjacentes

ε - rugosidade absoluta da tubulação

γ - peso específico da água

ρ - massa específica da água

τ - tensão de cisalhamento

RESUMO.

COUTINHO, J. L. *Estudo analítico e experimental dos fenômenos transitórios durante o enchimento de tubulações ramificadas*. 2002. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Atualmente, os avanços tecnológicos, especialmente dos recursos computacionais, possibilitam a realização de cálculos cada vez mais complexos. Em função destes avanços, transitórios hidráulicos antes desprezados ou estimados de forma rudimentar já podem ser calculados, especialmente nos casos em que o comportamento dos transitórios é crítico. Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de métodos de cálculo que permitam prever quantitativamente tais transitórios uma vez que não há solução analítica para este problema. Neste trabalho são estudadas as condições de contorno para a utilização do modelo rígido de coluna líquida e sua respectiva solução numérica para o cálculo de transitórios durante o enchimento de uma tubulação com ramificação. Os modelos matemáticos foram testados em laboratório sob diversas condições, comprovando a viabilidade da utilização das ferramentas teóricas e numéricas desenvolvidas.

Palavras-chave: transitórios hidráulicos, escoamento não permanente.

ABSTRACT

COUTINHO, J. L. *Analytic and experimental study of the transitory phenomena during filling of pipelines with ramifications*. 2002. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Nowadays there have been many technological advances, especially related to computational resources, that make possible more complex and huge calculations. Due to these advances, the evaluation of hydraulics transients, which have been disregarded or roughly estimated, is allowed to be more precisely performed especially when transient phenomena have significant importance. Then, the development of calculating methods that evaluates these transients effects becomes necessary once the analytic solution to these problems does not exist. This work presents the study of the boundary conditions of the rigid model applied to the fluid column and its numeral solution in order to calculate the transient behavior during filling of pipeline with ramifications. The results of mathematical models were compared with those from laboratory experiments under several conditions proving the feasibility of theoretical and numeral models.

Palavras-chave: hydraulic transients, unsteady flow.

1. INTRODUÇÃO

As instalações hidráulicas estão sujeitas a situações em que as condições do escoamento variam continuamente com o tempo. O termo transitório hidráulico é utilizado para este estado alterado do escoamento que ocorre entre dois estados permanentes. Os transitórios hidráulicos podem ser provocados, como exemplo, por manobras em válvulas e bombas.

Segundo TULLIS (1989), transitórios envolvendo mudanças relativamente lentas são chamados de ondas. Como exemplos pode-se citar: a oscilação num tubo em U; o estabelecimento do escoamento depois da abertura de uma válvula e a oscilação do nível d'água em chaminés de equilíbrio.

Para a análise destes casos é comum a utilização da “Teoria da Coluna Rígida”, que geralmente envolve a solução numérica de equações diferenciais. A teoria da coluna rígida ignora a compressibilidade do fluido e a elasticidade da tubulação. Portanto, assume-se que o fluido move-se como um corpo rígido e trata-se o fenômeno como uma oscilação de massa.

Nos casos em que a compressibilidade do fluido e a elasticidade da tubulação devem ser consideradas na análise do problema, utiliza-se o modelo elástico. A aplicação deste modelo também conduz a equações diferenciais, cuja solução, em geral, só é obtida através da utilização de métodos numéricos.

Atualmente o projetista dispõe de métodos numéricos e de computadores cada vez mais eficientes. Sendo assim, a análise dos fenômenos transitórios não deverá mais ser desprezada nos casos mais críticos, ou seja, quando o sistema hidráulico estiver sujeito a velocidades e pressões

transitórias superiores às que ocorrem no regime permanente, o que pode causar vibrações indesejáveis na tubulação, fadiga e ruptura dos materiais, causando o colapso do sistema.

A literatura relata exemplos de acidentes causados por transitórios hidráulicos, como ruptura de tubulações, rompimento de ancoragens, danos causados a equipamentos como bombas, turbinas, válvulas, entre outros. Isto mostra a importância de se considerar os transitórios no dimensionamento dos equipamentos hidráulicos.

Para que os problemas citados sejam minimizados, é necessário o estabelecimento de métodos de aplicação prática que permitam avaliar a magnitude das pressões e velocidades transitórias. Tais métodos devem ser ainda validados experimentalmente para garantir que as hipóteses simplificadoras, necessárias para a modelagem matemática, não afastem o modelo do fenômeno real.

Um caso de grande interesse em que ocorre um transitório hidráulico é o enchimento de tubulações, seja, por exemplo, pela abertura de uma válvula de um reservatório ou pela partida de um bomba.

Durante o enchimento da tubulação, com o avanço da coluna líquida, o ar é expelido através de dispositivos como válvulas de descarga de ar, ventosas e chaminés de equilíbrio. Se o avanço da frente da coluna líquida é significativo e sustentado, esta pode atingir altas velocidades. Segundo ALBERTSON & ANDREWS (1971), quando a coluna líquida alcança uma válvula de descarga de ar, um grande golpe de aríete (pressão excessiva) pode ocorrer. Conhecendo-se a velocidade e a aceleração do líquido em tais circunstâncias, pode-se estimar a magnitude da sobrepressão e, conseqüentemente, o golpe a que o sistema está sujeito.

Este trabalho colabora, de forma inédita, no entendimento de escoamentos não permanentes, dando subsídios no dimensionamento de sistemas em que a ocorrência de transitórios hidráulicos seja relevante, em

especial no estudo das condições de regime transiente em junções e em bifurcações, durante o enchimento de tubulações ramificadas.

2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é efetuar uma comparação da modelagem matemática com o estudo experimental dos fenômenos transitórios ocasionados pela operação de enchimento em tubulações ramificadas, com ênfase aos efeitos causados por junções (reduções e cotovelo) e bifurcações (T e Y), nos casos em que a frente está submetida à pressão atmosférica e que se possa garantir a integridade da coluna líquida. O estudo visa, também, expandir o modelo em questão para sistemas hidráulicos com tubulações ramificadas, quanto às condições de contorno nas conexões, permitindo a solução adequada desse tipo de problema.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os problemas sérios de engenharia com tubulações, de acordo com TULLIS (1989), estão usualmente associados com condições não permanentes de escoamento, como o enchimento da linha, mudanças intencionais ou acidentais provocadas pela abertura e fechamento de válvulas, falha ou manobra de bombas, etc. Para algumas tubulações, especialmente dutos longos que atravessam terrenos irregulares, o momento mais crítico na operação destas tubulações pode ser o enchimento inicial, pressurizando e expulsando o ar. Um projeto e uma operação inadequados podem implicar uma operação insegura. Pressões transitórias geradas durante o enchimento podem facilmente exceder os limites de dimensionamento das tubulações, conexões e ancoragens.

TULLIS (1989) cita que a análise de escoamentos não permanentes é um campo relativamente novo de pesquisa, mostra o equacionamento desse tipo de problema aplicando o modelo rígido seguido de alguns métodos numéricos com as respectivas condições de contorno para a sua solução.

LIU & HUNT (1996) trataram o problema de enchimento de tubulação em terreno com perfil irregular. Foi utilizado o modelo de coluna rígida, considerando que a frente da coluna estava submetida a pressão atmosférica. Isto significa que deve ser garantida a livre expulsão do ar durante o enchimento da canalização. O método numérico utilizado para a resolução das equações diferenciais simultâneas foi o Runge-Kutta. Também foram feitas considerações para garantir uma frente bem definida da coluna d'água. Um experimento de laboratório foi realizado para verificar o modelo, utilizando para isso dois tubos em série com diâmetro de 2,29 cm, sendo o

primeiro com comprimento de 355 cm e inclinação de $2,66^\circ$ com a horizontal e o segundo com 311 cm e $2,25^\circ$, conforme é ilustrado na Figura 1. Os resultados teóricos previram uma velocidade superior à real no início, mas com o aumento do comprimento da coluna líquida a velocidade teórica tornou-se muito próxima da experimental. A provável explicação para este fato foi que a resistência de avanço da frente é maior do que a do restante da coluna líquida. Com o aumento do comprimento da coluna, o efeito da resistência da frente foi tornando-se menos significativo quando comparado com a resistência distribuída ao longo da coluna.

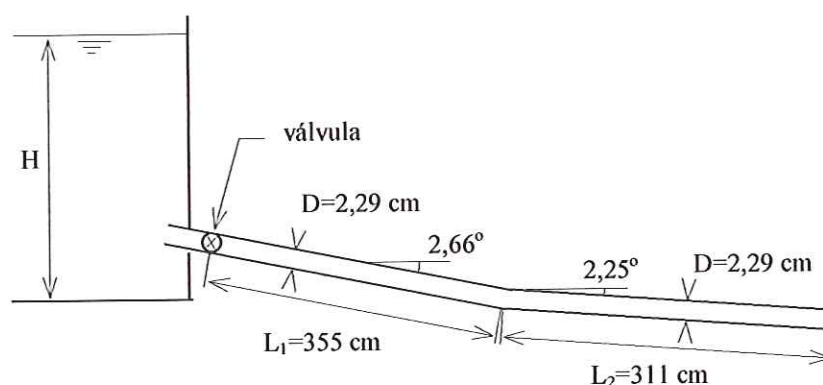


Figura 1 – Experimento realizado por LIOU & HUNT (1996)

ALBERTSON & ANDREWS (1971) realizaram experimentos para estudar os transitórios causados pela retirada de ar de tubulações através de válvulas de descarga. Uma das principais conclusões obtidas foi que as maiores sobrepressões ocorrem quando o ar é retirado através de uma válvula relativamente grande. Portanto, a retirada de ar através de válvulas pequenas evitam a ocorrência de sobrepressões elevadas.

Um tipo de transitório que tem sido tratado por diversos pesquisadores é o transitório ocasionado pelo aprisionamento de ar nas tubulações. CABRERA et al. (1992), estudaram este problema com a configuração clássica de um reservatório ligado a uma tubulação com ar aprisionado no final. O foco principal do trabalho foi o estudo da influência do comprimento da coluna líquida no transitório, utilizando para isto o modelo rígido.

GUARGA et al. (1994), utilizando uma configuração semelhante a de CABRERA et al. (1992), realizou um estudo comparativo entre a aplicação do modelo, considerando o fluido incompressível e comprimento constante da coluna líquida na equação da quantidade de movimento proposto por MARTIN (1976), e o modelo considerando o fluido incompressível e comprimento variável da coluna líquida, estabelecendo limites para a aplicação de cada um deles.

MARTIN (1976) estudou analiticamente a presença de ar aprisionado em tubulações sob diversas configurações utilizando o modelo da coluna rígida. Uma configuração particularmente interessante equacionada foi a de um reservatório ligado a uma tubulação com uma abertura de diâmetro menor no fim para a saída de ar, conforme mostrado na Figura 2.

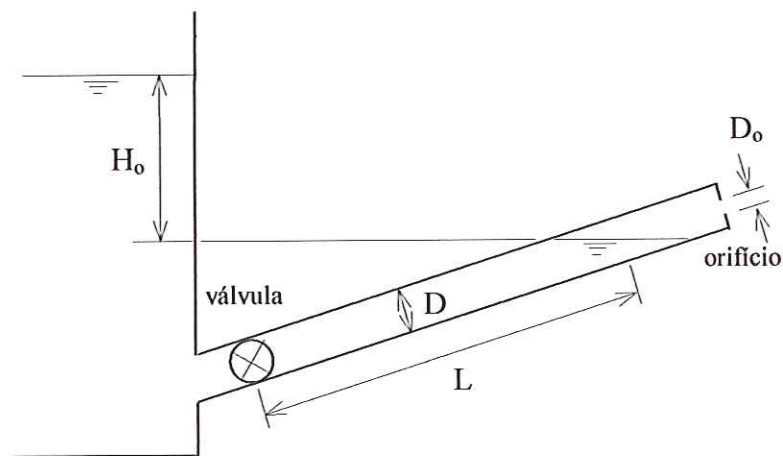


Figura 2 – Esquema estudado por MARTIN (1976)

Um dos problemas sempre verificado na aplicação de modelos para o enchimento de tubulações é a garantia da não entrada de ar na frente da coluna líquida, impedindo assim que parte da coluna escoe como um canal aberto.

ZUKOSKI (1966) estudou a influência da viscosidade, da tensão superficial, da velocidade e da inclinação no formato da interface líquido-ar, utilizando diâmetros entre 0,5 e 17,8 cm. O efeito da viscosidade se mostrou pouco importante e o efeito da tensão superficial aumenta com a diminuição

do diâmetro. No caso de tubos na posição horizontal os ensaios mostraram que para velocidades acima da faixa de $0,44(gD)^{0,5}$ a $0,52(gD)^{0,5}$ não deverá ocorrer a intrusão de ar na coluna líquida. Para tubos com inclinações diferentes, entre 0° e 90° , o mesmo raciocínio utilizado no caso de tubo horizontal pode ser seguido para obter a velocidade crítica nesses casos, utilizando os resultados experimentais.

BENJAMIN (1968) estudou de forma teórica a interface líquido-ar em tubos horizontais. Os resultados teóricos obtidos mostraram estar em concordância com aqueles conseguidos experimentalmente por ZUKOSKI (1966).

Outro estudo sobre transitórios hidráulicos pode ser citado, como o realizado por BRUNONE et al. (1995) que faz a modelagem bidimensional do transitório causado pelo fechamento repentino de uma válvula. Entretanto, pode-se notar que há uma certa carência de estudos experimentais para a validação e calibração dos modelos apresentados.

Os coeficientes de perda de carga definidos experimentalmente em regime permanente, são aplicados na situação de regime não permanente nos modelos matemáticos, sendo que na maioria das vezes não é realizada uma análise do erro cometido com esta hipótese. A seguinte questão também pode ser apresentada: no caso das junções, com ou sem derivações, quais as condições de contorno a serem utilizadas para que o modelo matemático se aproxime do modelo físico?

4. MÉTODO

4.1. Considerações gerais

O trabalho foi subdividido em duas partes. A primeira foi a modelagem matemática e simulação computacional. A outra foi composta pela montagem experimental e verificação do modelo com as hipóteses adotadas.

A modelagem foi realizada utilizando-se a teoria da coluna rígida, que, segundo TULLIS (1989), é adequada para o tratamento do enchimento de tubulações providas de dispositivos para a expulsão do ar ou com descarga livre. Também deve ser garantida a integridade da frente, ou seja, a configuração do experimento e a manobra a ser realizada devem garantir uma velocidade mínima da frente, nos casos de declividades zero ou descendentes, de forma a não permitir a intrusão de ar na coluna líquida.

A parte experimental foi realizada no laboratório de Hidráulica do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

A seguir são detalhados o experimento, a modelagem matemática e a simulação e solução computacional.

4.2. Estudos preliminares para a montagem experimental

Inicialmente, pensou-se no sistema básico mostrado na Figura 3, o qual seria construído no laboratório. Este sistema seria constituído por um reservatório elevado, cuja cota da superfície livre seria mantida constante. O reservatório alimentaria um tubo principal com inclinação α_1 , o qual, a jusante

da válvula de manobra, seria subdividido em dois seguimentos através de uma conexão em “Y” com inclinações α_2 e α_3 em relação a horizontal. A conexão indicada na Figura 3 teria mobilidade rotacional em relação ao eixo da canalização principal, além de poder fazer o ângulo β igual a 45° e 90° . Isto permitiria a análise de diversas configurações.

Nas condições iniciais, ter-se-ia a canalização que vai do reservatório à válvula (fechada) completamente cheia de água. A abertura desta válvula provocaria um transitório hidráulico durante um certo tempo e que seria estudado.

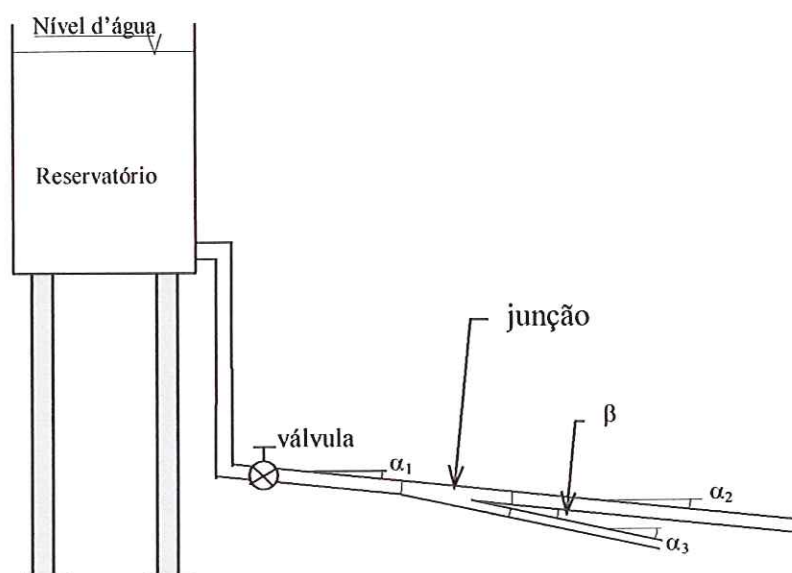


Figura 3 – Esquema do sistema básico para montagem no laboratório

O esquema mostrado acima previa o aproveitamento da estrutura a ser montada para o desenvolvimento do experimento de MAGALHÃES (1999). Mas, por motivos de manutenção do laboratório e de alguns problemas para a liberação da área na qual foi instalada a base do suporte para o reservatório, pela Prefeitura do Campus de São Carlos, o Sistema Hidráulico proposto não foi montado por completo em tempo hábil para que se realizassem os ensaios experimentais conforme o cronograma previsto. Dessa forma, MAGALHÃES (1999) montou um outro sistema hidráulico com um reservatório metálico existente dentro do laboratório de hidráulica da Escola de Engenharia de São

Carlos, semelhante ao proposto inicialmente, com a diferença de redução da carga hidráulica disponível de 7,00 m para 4,00 m.

Frente ao fato relatado, devido à redução da carga hidráulica, passou-se a estudar outras possibilidades para o trabalho.

Ao invés de utilizar um reservatório com nível constante, pensou-se em fazer o experimento utilizando-se uma bomba. Entretanto, adotando-se esta opção, entre outros inconvenientes, seria necessário filtrar as interferências (“ruídos”) provocados pelo funcionamento da bomba podendo afetar a qualidade dos dados obtidos.

Uma outra solução pesquisada foi a utilização de uma câmara pressurizada colocada a montante da tubulação. Este procedimento, além de eliminar os “ruídos” na linha, ainda permitiria obter uma medida indireta da vazão através da medida da pressão, mais barata e até mais precisa do que com a utilização de alguns tipos de medidores de vazão. Além disso, o medidor de vazão eletromagnético poderia ser utilizado em uma das derivações da canalização, obtendo assim, a vazão experimental em dois tubos.

Admitindo que a expansão do ar na câmara seja adiabática, pode-se escrever:

$$P \cdot Vol^{Kc} = constante \quad (1)$$

O valor do expoente politrópico (Kc) é definido, conforme RESNICK & HALLIDAY (1976), como a razão entre capacidade térmica do gás a pressão constante e a capacidade térmica a volume constante. No caso do ar, cuja composição apresenta variações, o valor de 1,4 para o Kc é bem aceito.

Nas condições iniciais, a pressão e o volume são conhecidos. Após a manobra, a pressão pode ser obtida de forma discreta pelo medidor de pressão (transdutor de pressão) da câmara de ar. Admitindo a área A da seção da câmara constante e igual a da tubulação, pode-se reescrever a equação (1):

$$P_o \cdot (S_o \cdot A)^{Kc} = P \cdot (S \cdot A)^{Kc} \quad (2)$$

$$P_o \cdot S_o^{Kc} = P \cdot S^{Kc} \quad (3)$$

Isolando S resulta:

$$S = \left(\frac{P_o \cdot S_o^{Kc}}{P} \right)^{\frac{1}{Kc}} \quad (4)$$

A vazão pode ser escrita como:

$$Q = \frac{dS}{dt} \cdot A \quad (5)$$

Analisando-se as equações (4) e (5), pode-se observar que a partir da derivada da equação (4) em t, é possível escrever a vazão como uma função da derivada da pressão:

$$Q = A \cdot P_o^{\frac{1}{Kc}} \cdot S_o \cdot \frac{d \left(P^{-\frac{1}{Kc}} \right)}{dt} \quad (6)$$

A aplicação da equação 6 aos dados experimentais obtidos por MAGALHÃES (1999) com a configuração mostrada na Figura 4 para o cálculo da vazão apresentou excelente resultado, superando a qualidade dos dados obtidos pelo medidor de vazão, o qual apresentou uma pequena defasagem no tempo, provavelmente devido ao tempo de resposta deste medidor.

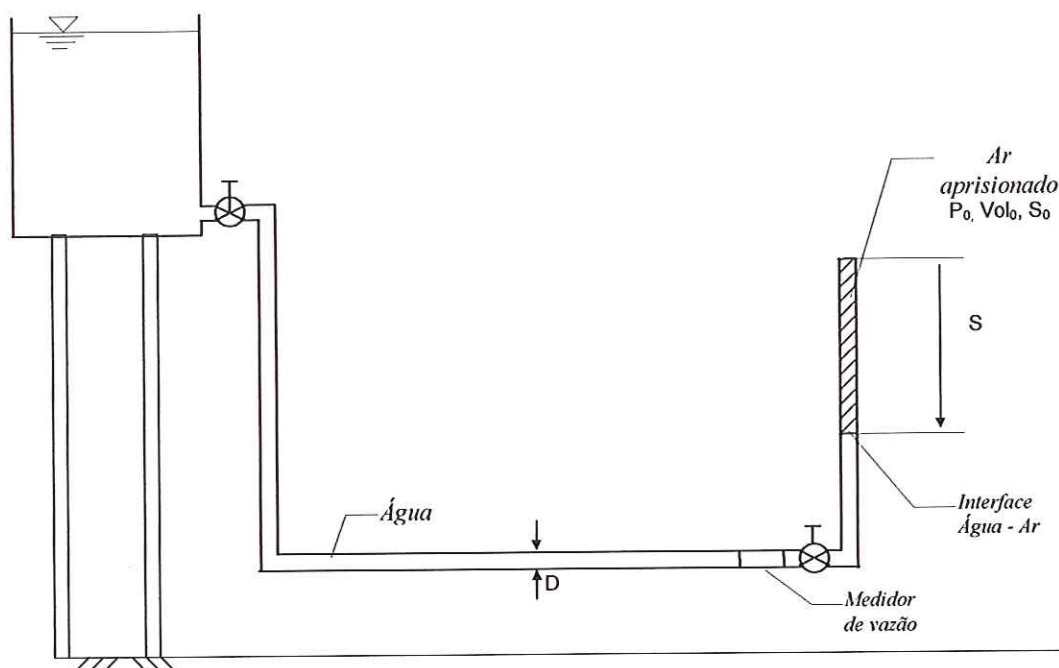


Figura 4 – Esquema montado por MAGALHÃES (1999)

A utilização da câmara pressurizada também foi descartada por dois motivos principais: o primeiro foi de não haver o estabelecimento do escoamento permanente. O segundo foi a maior dificuldade de montagem e controle do experimento.

Como a instalação do reservatório elevado originalmente proposto com carga hidráulica de 7 m foi finalmente concluída, optou-se por retomar a proposta inicial mostrada na Figura 3, mas com os ângulos α_1 , α_2 e α_3 iguais a zero, de forma a permitir a utilização da Equação 7 para o cálculo da velocidade mínima necessária para impedir a intrusão de ar, garantindo assim, a integridade da frente da coluna líquida.

$$V_{crítica} = 0,5 \cdot \sqrt{gD} \quad (7)$$

4.3. Modelagem matemática

4.3.1. Hipóteses básicas

As seguintes considerações foram feitas para a descrição do modelo:

- 1) todo o tubo a montante da frente em movimento permanece completamente cheio de água, formando uma coluna contínua e com a frente bem definida;
- 2) a pressão na face frontal da coluna é a atmosférica;
- 3) o sistema água-tubulação é considerado incompressível (coluna rígida de água);
- 4) a resistência de atrito para escoamento permanente é usada, ou seja, a resistência é suposta proporcional ao quadrado da velocidade;
- 5) no caso das perdas singulares, adota-se outra vez a hipótese de que a resistência em um escoamento em regime variável seja idêntica à resistência em um escoamento permanente (K constante).

A primeira hipótese impõe uma relação entre a velocidade da frente e o diâmetro da tubulação de forma a não ocorrer a intrusão de ar e nem ocorrer o escoamento de parte da coluna como escoamento livre.

As condições para que o escoamento satisfaça a primeira hipótese foi estudada por pesquisadores como ZUKOSKI (1966), BENJAMIN (1968) e LIOU & HUNT (1996). Este último apresenta a seguinte relação para que não ocorra a intrusão de ar, válida para diâmetros de 4 a 18 cm e em tubulações com inclinação próxima da horizontal:

$$V > V_{crítica} = 0,5\sqrt{gD} \quad (8)$$

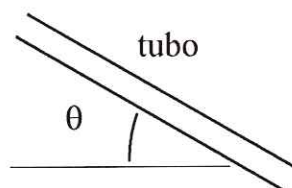
onde: V é a velocidade de descarga; $c_{crítica}$ é definida como a celeridade (ou velocidade) crítica; g é a aceleração da gravidade e D o diâmetro.

Para outras condições, o valor da celeridade crítica pode ser obtido a partir de curvas experimentais construídas por ZUKOSKI (1966).

KOELLE (1998), utilizando dados experimentais e formulações de alguns pesquisadores propõe a seguinte forma empírica para a determinação da celeridade crítica:

$$V_{crítica} = \sqrt{gD} \cdot (3 \cdot \sqrt{\sin \theta} - 2 \cdot \sin \theta) \quad (9)$$

sendo θ o ângulo formado entre o tubo e um plano horizontal:



Pode-se observar uma divergência entre a formulação para tubos próximos da posição horizontal, mostrada na Equação 8, e a formulação proposta por KOELLE (1998) para determinação da velocidade crítica. Parece que esta última só apresenta resultados mais interessantes para $3^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$.

A hipótese de coluna rígida é perfeitamente cabível, levando em conta que a frente está sujeita a pressão atmosférica. Segundo TULLIS (1989), o estabelecimento do escoamento durante o enchimento de uma tubulação, depois da abertura de uma válvula, pode ser adequadamente tratado pela utilização da teoria da coluna rígida. Além disso, CHAUDHRY (1989) mostrou que a utilização da teoria da coluna rígida proposta por MARTIN (1976) para o tratamento de transitórios com o aprisionamento de ar, um caso mais crítico para utilização desta teoria, produziu resultados compatíveis com a realidade.

As hipóteses 4 e 5 foram utilizadas por diversos autores como STREETER (1971) e mais recentemente por LIOU & HUNT (1996). Estes últimos chegaram a conclusão de que a discrepância obtida pela adoção destas hipóteses diminui com o aumento do comprimento da coluna líquida e produz bons resultados. Tanto STREETER (1971) quanto LIOU & HUNT (1996) utilizaram o fator de atrito, f , constante. Neste trabalho também será avaliada a utilização de f variável conforme formulação de SWAMEE (1993) para o cálculo de f , e que é válida para qualquer valor de Reynolds, ou seja, para escoamento laminar, turbulento liso, de transição e turbulento rugoso. A utilização desta formulação aplicada ao escoamento não permanente foi utilizada em alguns casos por MAGALHÃES (2001).

4.3.2. Modelo rígido

Quando o transitório hidráulico apresenta pequenas variações de pressões, a consideração de conduto indeformável e líquido incompressível é adequada e portanto pode ser empregado o modelo rígido. A utilização do modelo rígido, nos casos em que há efeito de deformação do conduto e da compressão do líquido, produz resultados mais conservadores e portanto, a favor da segurança. A seguir é apresentado o equacionamento para o modelo em questão.

O escoamento é governado pela equação da quantidade de movimento, que é resultado da aplicação direta da 2ª lei de Newton, ou seja, a soma de todas as forças agindo na massa de fluido em uma dada direção é igual ao produto da massa pela aceleração na direção da força resultante. A Figura 5 mostra a atuação das forças em um elemento cilíndrico de fluido.

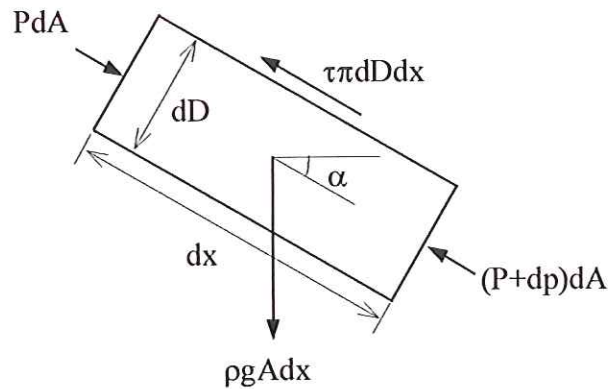


Figura 5 – Diagrama de forças sobre um elemento cilíndrico de fluido

A aplicação da equação da quantidade de movimento na direção x do fluido resulta:

$$\sum \vec{F}_x = \int_{\text{sc}} (\rho \vec{V} d\vec{A}) \cdot \vec{V}_x + \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{vc}} \rho \vec{V} d\text{Vol} \quad (10)$$

Desenvolvendo a equação acima, projetada no eixo do tubo:

$$\begin{aligned} PdA - (P + dP)dA - \tau \cdot \pi \cdot dD \cdot dx + \rho \cdot dA \cdot dx \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha) = \\ = -\rho \cdot V \cdot dA \cdot V + \rho \cdot V \cdot dA \cdot (V + dV) + \rho \frac{\partial V}{\partial t} d\text{Vol} \end{aligned}$$

Substituindo: $\text{sen}(\alpha) = -(dz/dx)$; $V \cdot dV = d(V^2/2)$; $d\text{Vol} = dA \cdot dx$, resulta:

$$-dPdA - \tau \cdot \pi \cdot dD \cdot dx - \rho \cdot dA \cdot g \cdot dz = \rho \cdot d \left(\frac{V^2}{2} \right) dA + \rho \frac{\partial V}{\partial t} dA \cdot dx \quad (11)$$

Dividindo por dA e reordenando os termos:

$$dP + \rho \frac{dV^2}{2} + \rho g \cdot dz + \tau \cdot \pi \cdot dD \frac{dx}{dA} + \rho \frac{\partial V}{\partial t} dx = 0 \quad (12)$$

Conforme já citado anteriormente, a perda por atrito na parede do tubo no escoamento não permanente é assumida igual ao valor da perda no escoamento permanente de mesma velocidade. Com isso tem-se:

$$\tau.\pi.dD = \frac{\rho fV |V| dA}{2.dD} \quad (13)$$

A equação (12) pode ser demonstrada ao se aplicar a equação da quantidade de movimento no esquema mostrado na Figura 5 para escoamento permanente com α igual a zero, e substituindo-se a equação de Darcy-Weisbach.

Substituindo a equação (12) em (11) resulta:

$$dP + \rho \frac{dV^2}{2} + \rho g.dz + \frac{\rho fV |V|}{2D} dx + \rho \frac{\partial V}{\partial t} dx = 0 \quad (14)$$

onde dD foi substituído por D , pois é constante para cada trecho.

A equação (13), dividida por γ , pode ser reescrita como:

$$d\left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z\right) + \frac{fV |V|}{2gD} dx + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} dx = 0 \quad (15)$$

Integrando-se a equação (15) ao longo de uma linha de corrente, entre duas seções, 1 e 2, resulta para as condições do problema estudado:

$$\left[\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z\right]_1 + \frac{fV |V|}{2gD} x + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} x = 0 \quad (16)$$

A equação (16) juntamente com a equação da continuidade constituem a base para a resolução do problema proposto, considerando o modelo rígido.

4.3.3. Método numérico para a solução das equações diferenciais

A solução da equação diferencial (16) juntamente com a equação da continuidade, colocada na forma diferencial pode ser feita ao aplicar o algoritmo Runge-Kutta-Nyström (R-K-N), enquanto o comprimento da coluna líquida em um determinado segmento da tubulação variar com o tempo. Após o enchimento deste seguimento, o algoritmo deve ser substituído pelo Método de Runge-Kutta de quarta ordem (R-K-4) para esse trecho. Os segmentos ainda não completamente cheios continuarão sendo tratados pelo método de R-K-N até seu enchimento, e assim sucessivamente.

Os métodos de Runge-Kutta e de Runge-Kutta-Nyström podem ser encontrados em KREYSZIC (1988).

Para a aplicação do método de R-K-N, a equação (14) deve ser modificada, escrevendo-se a velocidade como derivada do espaço em relação ao tempo. Ao término do enchimento do segmento da tubulação regido pela equação em questão, a variável que representa a posição da coluna líquida deve ser substituída pelo comprimento do segmento do tubo e a derivada de x em relação ao tempo substituída pela velocidade para a aplicação do método de R-K-4.

A utilização do algoritmo apresentado no ANEXO A produz o mesmo resultado com maior facilidade de programação, pois o mesmo método é utilizado para todo o problema, sendo necessário apenas escrever as equações de forma adequada.

A Figura 6 mostra a geometria para a qual foi feita a simulação numérica.

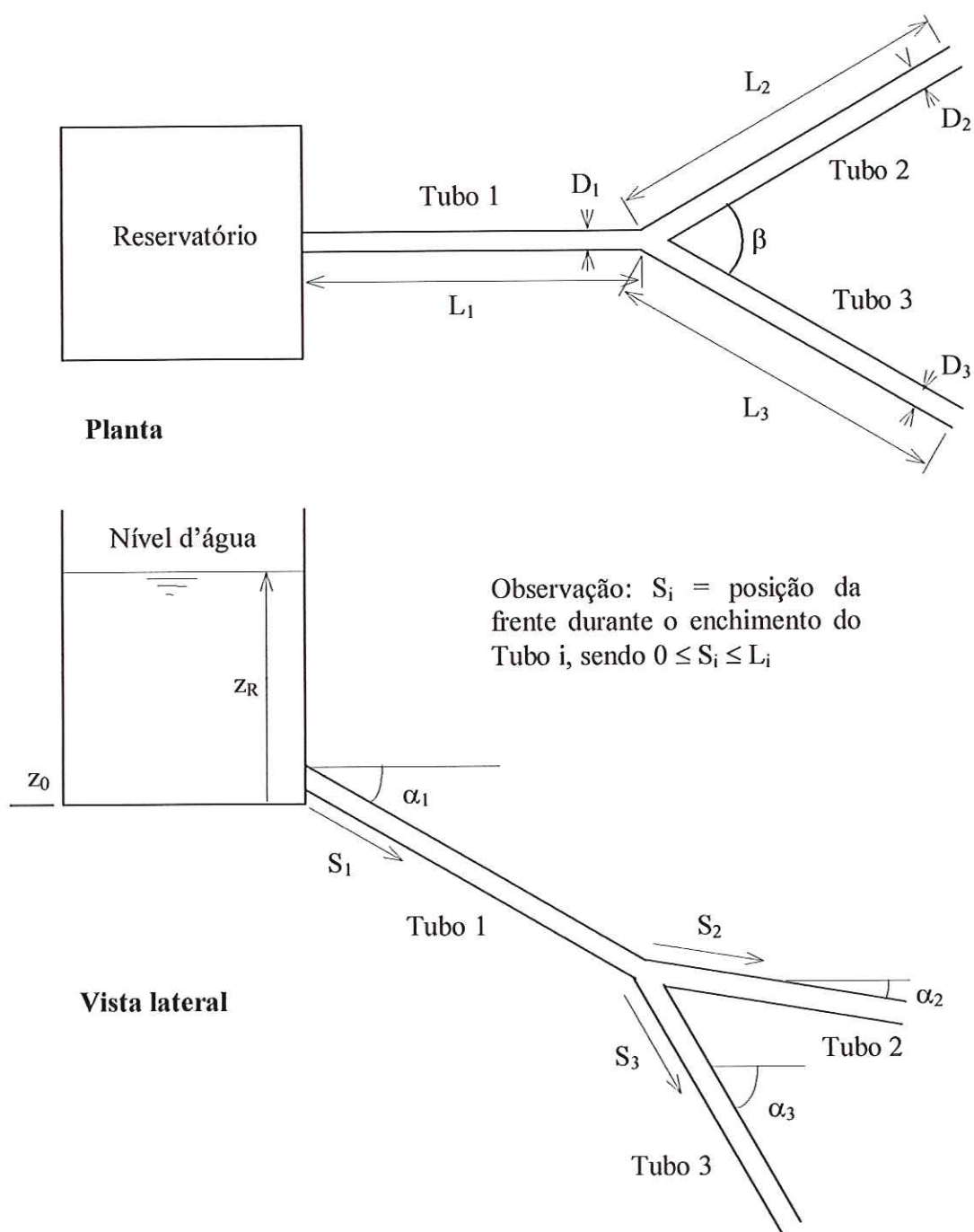


Figura 6 – Configuração física para o equacionamento básico.

O sistema de equações para a resolução do caso apresentado na Figura 6, desprezando-se as perdas localizadas é:

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{2g(z_R + S_1(\sin \alpha_1)) - V_1 |V_1| (1 + f_1 S_1 / D_1)}{2(L_{01} + S_1)} \quad (17)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{dV_2}{dt} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 + \frac{dV_3}{dt} \left(\frac{D_3}{D_1} \right)^2 \quad (18)$$

$$\frac{V_2^2}{2g} - (z_R + L_1 \sin \alpha_1 + S_2 \sin \alpha_2) + \frac{f_1 V_1 |V_1| L_1}{2gD_1} + \frac{f_2 V_2 |V_2| S_2}{2gD_2} + \frac{L_{01} + L_1}{g} \frac{dV_1}{dt} + \frac{L_{02} + S_2}{g} \frac{dV_2}{dt} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{V_3^2}{2g} - (z_R + L_1 \sin \alpha_1 + S_3 \sin \alpha_3) + \frac{f_1 V_1 |V_1| L_1}{2gD_1} + \frac{f_3 V_3 |V_3| S_3}{2gD_3} + \frac{L_{01} + L_1}{g} \frac{dV_1}{dt} + \frac{L_{03} + S_3}{g} \frac{dV_3}{dt} = 0 \quad (20)$$

Os termos L_{01} , L_{02} e L_{03} são complementos fictícios necessários para que seja levada em conta a aceleração local, ocorrida a montante da entrada dos tubos, que é desconhecida.

A Equação 17 do sistema apresentado anteriormente é utilizada até o enchimento do primeiro tubo com as seguintes condições iniciais:

- $S_1 = 0$
- $V_1 = 0$
- $dV_1/dt = 0$

As equações 18, 19 e 20 são resolvidas simultaneamente, após o enchimento do primeiro tubo, utilizando-se como condições iniciais:

- $S_2 = 0$
- $S_3 = 0$

As equações 18, 19 e 20 foram combinadas, resultando nas duas equações diferenciais dependentes mostradas a seguir. Para facilitar a expressão matemática desta nova equação, adotou-se a canalização em processo de enchimento como sendo horizontal. Portanto os ângulos α_i foram tomados iguais a zero.

$$\begin{aligned}
\frac{dV_2}{dt} = & \frac{\left\{ \sum [L_i \cdot (D_3 / D_i)^2] + S_3 \right\} \cdot 0,5 \cdot \left\{ 2 \cdot g \cdot Z_R - V_2^2 \left(\frac{f_2 \cdot S_2}{D_2} + \sum K_{2i} + 1 \right) - \sum \left[V_i^2 \left(\frac{f_i \cdot L_i}{D_i} + \sum K_i \right) \right] \right\}}{\left\{ \sum [L_i \cdot (D_2 / D_i)^2] + L_{02} + S_2 \right\} \cdot \left\{ \sum [L_i \cdot (D_3 / D_i)^2] + L_{03} + S_3 \right\} - \sum [L_i \cdot (D_2 / D_i)^2] \cdot \sum [L_i \cdot (D_3 / D_i)^2]} + \\
& - \frac{\left\{ \sum [L_i \cdot (D_3 / D_i)^2] \right\} \cdot 0,5 \cdot \left\{ 2 \cdot g \cdot Z_R - V_3^2 \left(\frac{f_3 \cdot S_3}{D_3} + \sum K_{3i} + 1 \right) - \sum \left[V_i^2 \left(\frac{f_i \cdot L_i}{D_i} + \sum K_i \right) \right] \right\}}{\left\{ \sum [L_i \cdot (D_2 / D_i)^2] + L_{02} + S_2 \right\} \cdot \left\{ \sum [L_i \cdot (D_3 / D_i)^2] + L_{03} + S_3 \right\} - \sum [L_i \cdot (D_2 / D_i)^2] \cdot \sum [L_i \cdot (D_3 / D_i)^2]} \quad (21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dV_3}{dt} = & \frac{\left\{ \sum [L_i \cdot (D_2 / D_i)^2] \right\} \cdot 0,5 \cdot \left\{ 2 \cdot g \cdot Z_R - V_2^2 \left(\frac{f_2 \cdot S_2}{D_2} + \sum K_{2i} + 1 \right) - \sum \left[V_i^2 \left(\frac{f_i \cdot L_i}{D_i} + \sum K_i \right) \right] \right\}}{- \left\{ \sum [L_i \cdot (D_2 / D_i)^2] + L_{02} + S_2 \right\} \cdot \left\{ \sum [L_i \cdot (D_3 / D_i)^2] + L_{03} + S_3 \right\} + \sum [L_i \cdot (D_2 / D_i)^2] \cdot \sum [L_i \cdot (D_3 / D_i)^2]} + \\
& - \frac{\left\{ \sum [L_i \cdot (D_2 / D_i)^2] + S_2 \right\} \cdot 0,5 \cdot \left\{ 2 \cdot g \cdot Z_R - V_3^2 \left(\frac{f_3 \cdot S_3}{D_3} + \sum K_{3i} + 1 \right) - \sum \left[V_i^2 \left(\frac{f_i \cdot L_i}{D_i} + \sum K_i \right) \right] \right\}}{- \left\{ \sum [L_i \cdot (D_2 / D_i)^2] + L_{02} + S_2 \right\} \cdot \left\{ \sum [L_i \cdot (D_3 / D_i)^2] + L_{03} + S_3 \right\} + \sum [L_i \cdot (D_2 / D_i)^2] \cdot \sum [L_i \cdot (D_3 / D_i)^2]} \quad (22)
\end{aligned}$$

As equações 21 e 22 podem ser reescritas, substituindo-se a velocidade pela derivada em relação ao espaço e também, substituindo-se a aceleração pela derivada segunda em relação ao espaço. A equação diferencial fica portanto em função de duas grandezas: o espaço e o tempo. Os somatórios apresentados são sempre referentes aos parâmetros dos segmentos de canalização a montante do segmento no qual a frente da coluna líquida se encontra.

A Figura 7 ilustra a configuração para a aplicação das equações diferenciais 21 e 22. Pode-se demonstrar que, a partir do instante em que a frente da coluna líquida atinge a bifurcação, este equacionamento é válido para n segmentos de tubo a montante do tubo indexado como 1.

Para a determinação das velocidades de entrada V_2 e V_3 na bifurcação, ponto central deste trabalho, tomou-se como suposição, para posterior validação, que a perda de carga entre as seções 1 e 2 e as seções 1 e 3, mostradas na Figura 8, são iguais e proporcionais ao quadrado da velocidade,

da mesma forma que ocorre no escoamento permanente. Quando a frente está ocupando as posições 2 e 3, sendo conhecida a velocidade em 1, pode-se desta forma, utilizando também a equação da continuidade, obter V_2 e V_3 iniciais.

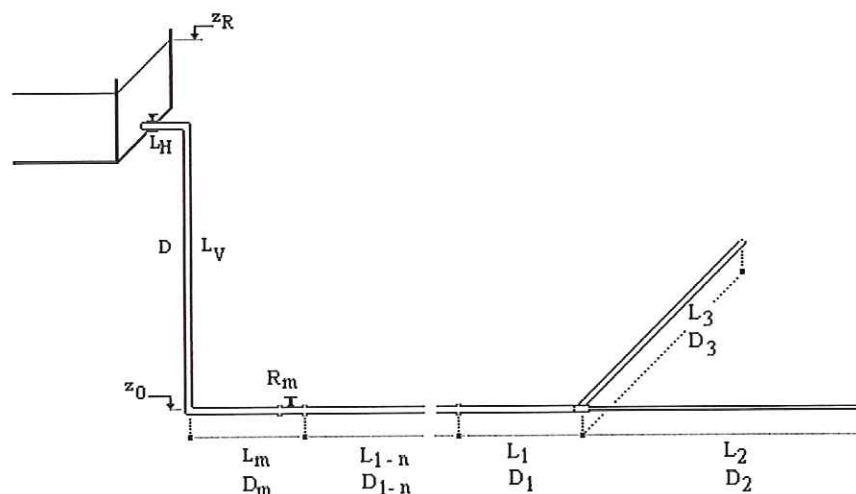


Figura 7 – Modelo para aplicação das Equações 21 e 22.

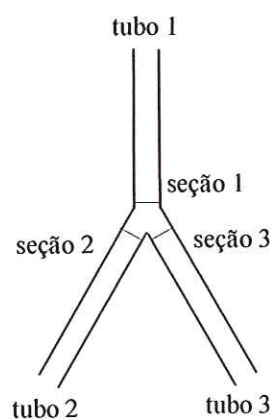


Figura 8 – Ilustração da junção entre as tubulações 1, 2 e 3.

A suposição de perdas iguais entre as seções 1 e 2 e as seções 1 e 3 fornece:

$$\frac{K_2 V_2^2}{2g} = \frac{K_3 V_3^2}{2g} \quad (23)$$

A equação da continuidade fica:

$$V_1 = V_2 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 + V_3 \left(\frac{D_3}{D_1} \right)^2 \quad (24)$$

A partir das equações (23) e (24) obtém-se V_2 e V_3 iniciais:

$$V_2 = \frac{V_1}{\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 + \left(\frac{D_3}{D_1} \right)^2 \sqrt{\frac{K_2}{K_3}}} \quad (25)$$

$$V_3 = \frac{V_1}{\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \sqrt{\frac{K_3}{K_2}} + \left(\frac{D_3}{D_1} \right)^2} \quad (26)$$

Quando ocorrer o enchimento total de um dos tubos (tubo 2 ou tubo 3), o valor de S deve ser substituído pelo respectivo comprimento do tubo e conforme exposto anteriormente, o método de R-K-N utilizado para solução desse trecho deve ser substituído pelo método R-K-4.

4.4. Experimento proposto – considerações

A utilização da perda de carga localizada conforme formulação desenvolvida para o escoamento em regime permanente produz uma descontinuidade no modelo não permanente, pois quando a frente da coluna

líquida alcança, por exemplo uma redução, o respectivo coeficiente de perda localizada é acrescentado instantaneamente ao equacionamento.

Uma das propostas era utilizar um comprimento fictício L_f , com a perda de carga em L_f equivalente a da peça no escoamento permanente, mas ocorrendo de forma linear, como se a peça fosse equivalente a uma redução concêntrica. Desta forma, poderia ser encontrado um valor para L_f de forma a corrigir a descontinuidade gerada pela aplicação direta do coeficiente de carga localizada K . A utilização deste artifício foi descartada, pois além de tornar muito mais complexo o equacionamento e a resolução numérica, verificou-se que não alterava significativamente o resultado obtido com a utilização da perda de carga constante e instantânea através da utilização do coeficiente de perda de carga K do regime permanente.

A Figura 9 ilustra a configuração dos experimentos montados em laboratório, incluindo as dimensões comuns a todos os ensaios. Foram 8 baterias de ensaios da seguinte forma:

- Com a canalização montada até a peça (4) para a aferição dos equipamentos e determinação das perdas de cargas localizadas (K) e avaliação do fator de atrito.
- Com a utilização de uma luva na junção (6) da Figura 9, formando um tubo de 10 m com diâmetro de 45 mm a partir da peça (4).
- Com a utilização de redução de 45 mm para 35 mm na junção (6) da Figura 9, sendo 5 m o comprimento do tubo a montante e também 5 m o comprimento do tubo a jusante da redução.
- Com a utilização de um cotovelo seguido de redução de 45 mm para 35 mm na junção (6) da Figura 9, sendo 5 m o comprimento do tubo a montante e também 5 m o comprimento do tubo a jusante do cotovelo.
- Com a utilização de um “T” na junção (6) da Figura 9, sendo a canalização a montante, até a peça (4), com 5 m de comprimento e diâmetro de 44 mm. Após a passagem lateral do “T”, um tubo de 5 m com diâmetro de 44 mm e

o tubo após a passagem direta do “T” com diâmetro de 35 mm e comprimento de 5 m.

- Com a utilização de um “T” na junção (6) da Figura 9, com as duas saídas laterais, sendo a canalização a montante, até a peça (4), com 5 m de comprimento e diâmetro de 44 mm. Após a passagem lateral direita do “T”, um tubo de 3 m com diâmetro de 35 mm e o tubo após a passagem lateral esquerda do “T” com diâmetro de 44 mm e comprimento de 5 m.
- Com a utilização de um “Y” de passagem direta e lateral 45°, na junção (6) da Figura 9, sendo o tubo após a passagem direta com 5 m de comprimento e diâmetro de 35 mm. O tubo após a saída lateral do “Y” com comprimento de 5 m e diâmetro de 45 mm.
- Com a utilização de um “Y” de passagem direta e lateral 45°, na junção (6) da Figura 9, sendo o tubo após a passagem direta com 5 m de comprimento e diâmetro de 45 mm. O tubo após a saída lateral do “Y” com comprimento de 5 m e diâmetro de 35 mm.

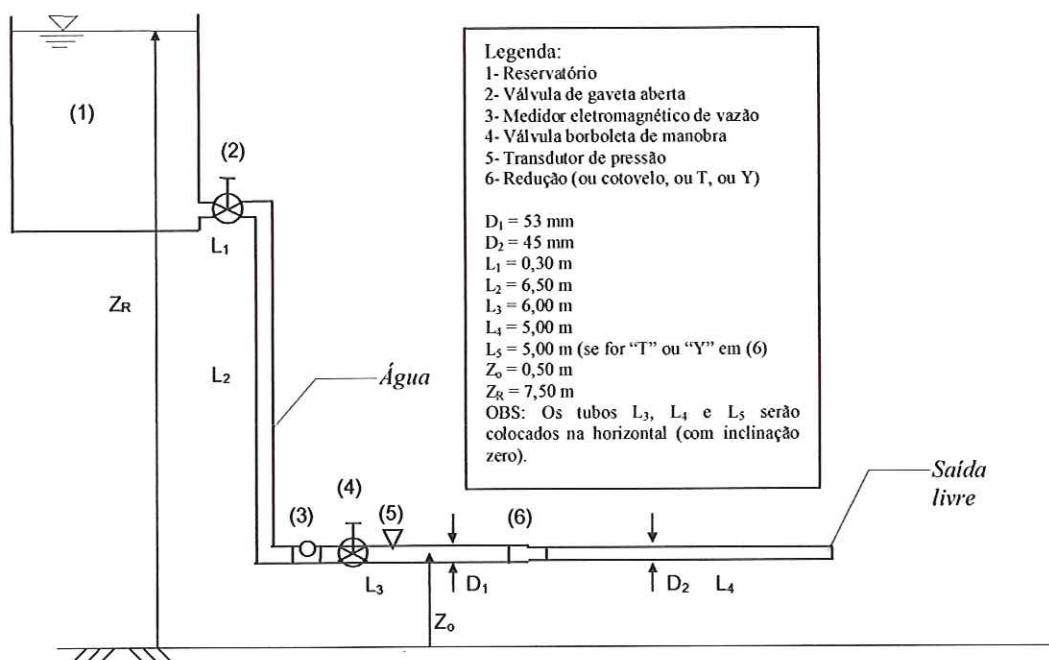


Figura 9 – Esquema final proposto para montagem no laboratório

4.4.1. Especificação dos equipamentos e materiais

4.4.1.1. Medidor de Vazão

A vazão experimental foi obtida utilizando-se o Medidor de Vazão Eletromagnético da CONAUT, com as seguintes especificações:

- Modelo: CONAUT MEG-FLUX 463
- Conversor de vazão CONAUT (analógico/frequência) Modelo: MAG-FLUX 474A - AF-R Board
- Precisão do conversor CONAUT:
 - $\pm 0,5\%$ (medido)
 - $\pm 0,5\%$ fim de escala.
- Técnica de excitação: Frequência DC pulsado
- Frequência de excitação: 30 hz
- Condutibilidade do fluido: $\geq 1 \mu\text{s/cm}$
- Saída de corrente: 0 a 20 mA
- Temperatura ambiente: $- 20^\circ \text{C} + 50^\circ \text{C}$
- Diâmetro do sensor: 50,00 mm
- Vazão máxima: $30 \text{ m}^3/\text{h}$
- Revestimento do sensor: teflon

O medidor eletromagnético de vazão é constituído de um eletrodo primário que é instalado no duto a ser medido e um conversor de sinais. Opera baseado no princípio da lei de Faraday ou da indução magnética.

Um condutor elétrico passa através de um campo magnético. A tensão induzida neste meio (U) é diretamente proporcional à velocidade do fluxo (V):

$$U = (k \cdot B \cdot D) \cdot V \quad (27)$$

onde:

k: constante do instrumento;

B: intensidade do campo magnético;

D: distância entre os eletrodos (diâmetro do conduto);

V: velocidade média do fluxo.

Portanto a vazão pode ser calculada da seguinte forma:

$$Q = \frac{\pi \cdot D}{4 \cdot k \cdot B} \cdot U \quad (28)$$

As principais vantagens e limitações do medidor eletromagnético são:

- a) Resposta linear à velocidade média do escoamento;
- b) Proporciona uma perda de carga (pressão) pequena;
- c) Respeitadas as condições normais de utilização, o medidor independe dos seguintes parâmetros: temperatura, pressão, viscosidade, densidade, contaminação do eletrodo, direção do escoamento;
- d) O perfil de velocidade do escoamento deve ser simétrico;
- e) A precisão é da ordem de $\pm 0,5 \%$ da vazão;
- f) A condutibilidade mínima do fluido deve ser de $1 \mu\text{s/cm}$
- g) Impróprio para medição de líquidos condutores de eletricidade

O medidor de vazão deve ser instalado com os eletrodos posicionados em um plano horizontal como forma a evitar a interrupção do contato elétrico com a passagem de bolhas gasosas na parte superior do tubo.

Após a instalação e calibração do medidor obteve-se a constante para o cálculo da vazão em unidades do SI:

$$\frac{\pi \cdot D}{4 \cdot k \cdot B} = 0,002067 \text{ A.m.s}^2/\text{kg}$$

Portanto, a vazão resulta:

$$Q = 0,002067 \cdot U \quad (29)$$

onde:

Q: vazão em m³/s

U: tensão em volt

4.4.1.2. Medidor de Pressão

As medidas de pressão foram realizadas utilizando-se transdutores de pressão Motorola com as seguintes características:

- Modelo: Motorola MPX 5050
- Intervalo de pressão: 0 – 5 mH₂O
- Suprimento de voltagem: 5 Volts dc
- Suprimento de corrente: 8,0 mA dc
- Sensibilidade: 90 mV / kPa
- Acurácia: ± 2%
- Tempo de resposta (10% a 90%): 1,0 ms
- Temperatura: 0 a 85° C

Os transdutores elétricos de pressão são elementos de medida que convertem pressões ou diferenças de pressão em impulsos elétricos. Para o experimento utilizou-se o modelo para obtenção da pressão diferencial, ou seja, a diferença entre a pressão atmosférica local e a pressão disponível medida no experimento.

O sensor de pressão Motorola utiliza um elemento de íon piezoresistivo implantado em um diafragma de silicone, formando um conjunto monolítico.

A pressão aplicada ao diafragma causa uma mudança da resistência e conseqüentemente uma mudança na voltagem de saída diretamente proporcional (linear) com a pressão diferencial aplicada. De um lado do diafragma atua a pressão atmosférica, do outro, a pressão em medição.

Esses transdutores possuem uma excelente capacidade de repetição e são equipados com resistores de compensação que permitem a medida correta de pressão sobre uma larga escala de temperatura (0 a 85° C para o modelo utilizado nos ensaios).

O transdutor de pressão foi instalado e aferido com o piezômetro diferencial de água. A relação entre a tensão de saída do transdutor e a pressão diferencial em mH₂O obtida, com um índice de correlação (R^2) igual a 0,9997, foi:

$$H = 1,11578 \cdot U - 0,223157 \quad (30)$$

onde:

H: carga piezométrica (mH₂O);

U: tensão enviada pelo transdutor à placa de aquisição de dados (volt)

4.4.1.3. Sensor de Passagem

Para que fosse detectado o instante da passagem da frente em determinadas seções do tubo, foi desenvolvido um circuito eletrônico conectado a pares de eletrodos. Cada par foi posicionado em um plano horizontal nas posições de interesse.

O sensor funciona da seguinte forma: ao ser preenchida metade da seção do tubo pela água, o contato dos dois eletrodos com a água provoca a polarização do circuito alterando a tensão enviada à placa de aquisição de dados, identificando assim o instante em que a seção média da frente do escoamento passa pelo ponto escolhido. Desta forma, antes da passagem da

frente, a tensão enviada à placa de aquisição de dados era próxima da tensão de alimentação de 4,5 V. Com a passagem da frente essa tensão era reduzida para próximo de zero (0,17 V).

A quantidade máxima de pares de eletrodos instalados para a determinação do instante de passagem da frente foi cinco.

4.4.1.4. Placa de Aquisição de Dados

Os sinais elétricos provenientes do medidor de vazão, dos transdutores de pressão e dos sensores de passagem são enviados a uma placa de aquisição de dados instalada em um microcomputador padrão IBM – PC. Foram utilizados ao todo 8 canais de entrada, sendo 1 para o medidor de vazão, 2 para os transdutores de pressão e cinco para os sensores de passagem.

Estes sinais foram processados através de programas computacionais específicos e convertidos em arquivos de dados.

4.4.1.5. Tubulação

Foram utilizados no experimento tubos e conexões em PVC marrom (soldável). Esta escolha deu-se principalmente pelo baixo custo deste material e facilidade de manuseio.

As medidas obtidas para o diâmetro interno médio dos tubos utilizados foram as seguintes: 53,5 mm, 44,5 mm e 35,0 mm.

5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA INICIAL

O problema mostrado na Figura 6 foi resolvido para diversos casos com o objetivo de verificar a resposta do modelo e detectar possíveis erros de formulação e programação. A seguir são exemplificados três destes casos. Nesta aplicação foi considerada apenas a perda localizada na conexão responsável pela derivação na canalização. Os valores de f (fator de atrito) foram adotados como constantes para esta simulação inicial.

Caso 1: Os seguintes valores foram adotados:

$$L_1 = L_2 = L_3 = 10 \text{ m}$$

$$D_1 = D_2 = D_3 = 0,05 \text{ m}$$

$$f_1 = f_2 = f_3 = 0,02$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 5^\circ$$

$$\beta = 45^\circ$$

$$L_{01} L_{02} L_{03} = 0,10 \text{ m}$$

$$z_R = 1 \text{ m}$$

$$K_2 = K_3$$

As perdas localizadas foram desprezadas para estas simulações. Sendo assim a igualdade $K_2 = K_3$ foi utilizada apenas para o cálculo das velocidades de entrada nos tubos 2 e 3, conforme as equações 18 e 19. Por isso, não foi necessário a atribuição de valores específicos para os coeficientes de perda localizada.

Foi suposta a não admissão de ar através da frente líquida para os dados acima. Os limites para a não admissão de ar são tratados posteriormente,

utilizando-se a configuração real para o experimento de forma a garantir uma velocidade suficiente para manter a integridade da frente.

A Figura 10 ilustra a evolução da velocidade durante o enchimento da tubulação.

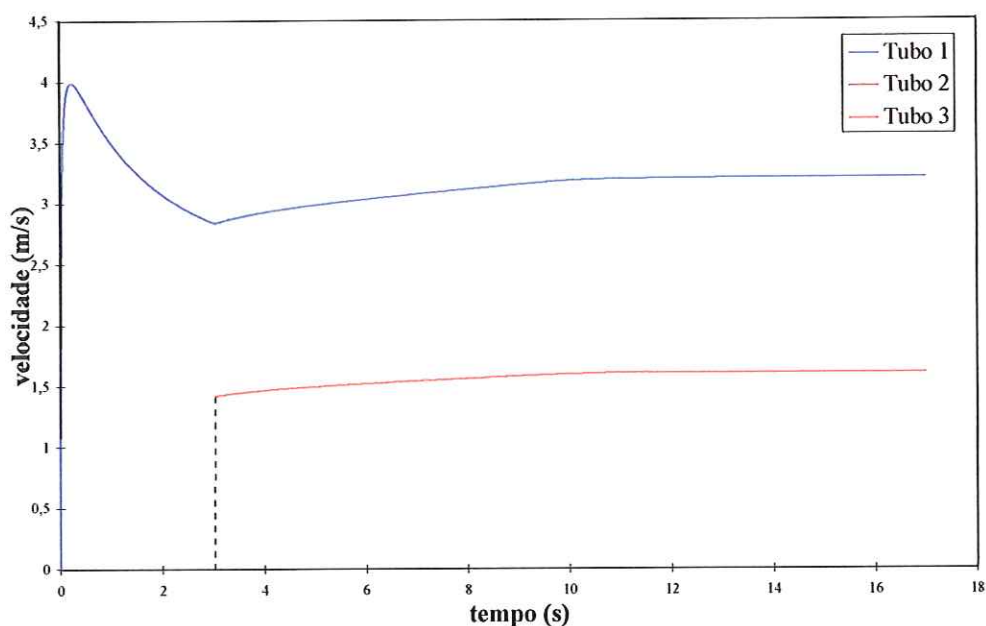


Figura 10 – Evolução da velocidade da coluna líquida para o caso 1

Pode-se observar na Figura 10 que a curva da velocidade do tubo 2 coincide com a curva do tubo 3, pois ambos possuem as mesmas características e estão sujeitos as mesmas condições de enchimento.

A velocidade máxima atingida foi 3,98 m/s no tubo 1 no instante $t = 0,24$ s. O primeiro tubo encheu no instante 3,04 s e a coluna líquida possuía uma velocidade de 2,84 m/s. Os tubos 2 e 3 encheram no instante $t = 9,61$ s e as velocidades nos tubos 2 e 3 eram iguais a 1,59 m/s. A partir do instante 15 s, as velocidades nos tubos se estabilizaram e atingiram o estado permanente com os seguintes valores: $V_1 = 3,20$ m/s, $V_2 = V_3 = 1,60$ m/s. A velocidade foi calculada diretamente para o estado permanente, obtendo-se os mesmos valores.

Caso 2: Os mesmos valores adotados no caso 1, exceto os ângulos da tubulação em relação a horizontal, os quais foram:

$$\alpha_1 = 5^\circ$$

$$\alpha_2 = 10^\circ$$

$$\alpha_3 = 0^\circ$$

A Figura 11 ilustra a evolução da velocidade durante o enchimento da tubulação.

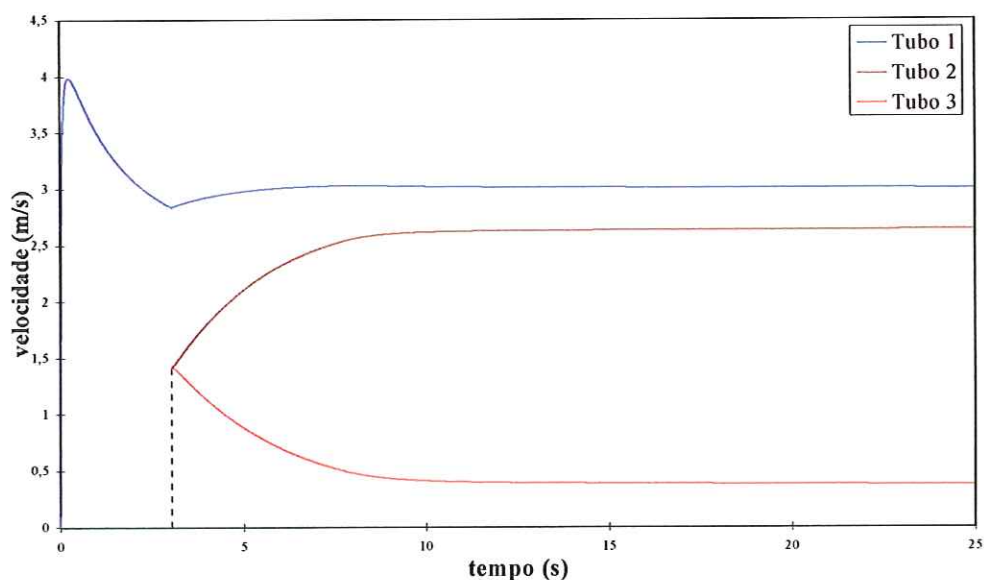


Figura 11 – Evolução da velocidade da coluna líquida para o caso 2

O enchimento dos tubos 2 e 3 iniciou-se no instante $t = 3,04$ s. O tubo 2 encheu-se no instante $t = 7,76$ s com uma velocidade de $2,54$ m/s. O enchimento do tubo 3 deu-se no instante $t = 22,94$ s com velocidade de $0,37$ m/s. As velocidades nos tubos 1, 2 e 3 se estabilizaram, respectivamente em: $3,00$ m/s, $2,63$ m/s e $0,37$ m/s.

Caso 3: Os mesmos valores adotados no caso 1, exceto os ângulos da tubulação em relação a horizontal e os comprimentos dos segmentos da tubulação, os quais foram:

$$L_1 = 10 \text{ m}$$

$$L_2 = 6 \text{ m}$$

$$L_3 = 3 \text{ m}$$

$$\alpha_1 = 5^\circ$$

$$\alpha_2 = -30^\circ$$

$$\alpha_3 = -60^\circ$$

Convenção adotada: o ângulo positivo é marcado no sentido horário a partir da horizontal.

Com estes dados, obtém-se um caso interessante e que também pode ser tratado com o mesmo modelo. Neste caso o líquido não chega a preencher completamente os tubos 2 e 3, pois as saídas destes estão em cota superior do nível de água no reservatório. Ocorrerá portanto uma oscilação, semelhante ao caso de oscilação num tubo em U, até que seja atingida a condição de velocidade zero, permanente em toda a canalização. A Figura 12 ilustra a evolução da velocidade para este caso.

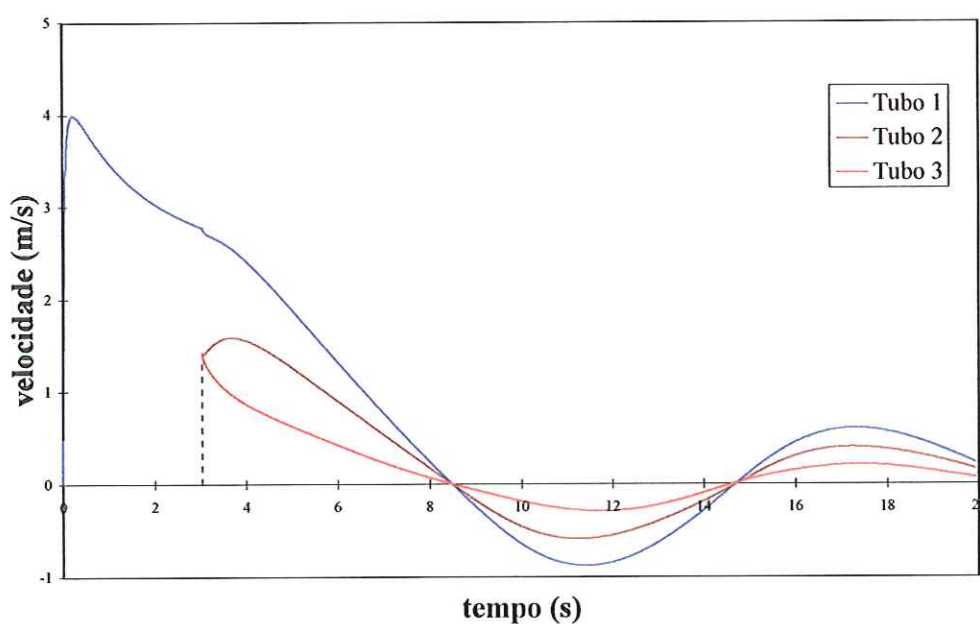


Figura 12 – Evolução da velocidade da coluna líquida para o caso 3.

Pela Figura 12 pode-se observar a ocorrência de uma descontinuidade quase imperceptível na curva da velocidade do tubo 1, no instante em que se inicia o enchimento dos tubos 2 e 3. Uma possível causa para isto é a condição inicial de que a coluna parte com velocidades iguais nos tubos 2 e 3 pelo fato de ter-se adotado $K_2 = K_3$. Inclusive a própria hipótese assumida para o cálculo de V_2 e V_3 iniciais é discutível.

A posição máxima atingida dentro do tubo 2 foi de 5,08 m e no tubo 3 foi de 2,76 m. As posições mínimas atingidas nos tubos 2 e 3, após o início da oscilação, foram respectivamente $S_2 = 2,73$ m e $S_3 = 1,63$ m. A posição de equilíbrio para o tubo 2 foi $S_2 = 3,74$ m e para o tubo 3, $S_3 = 2,17$ m. Estas posições coincidem com as posições calculadas diretamente no ponto de equilíbrio.

A Figura 13 ilustra a geometria utilizada no caso 3.

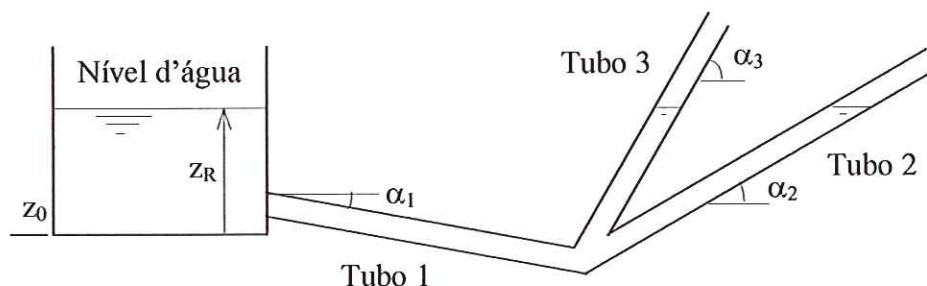


Figura 13 – Configuração utilizada no caso 3

Além da evolução da velocidade com o tempo até atingir o estado permanente, conforme mostrado para os três casos, obtém-se diretamente a posição da frente em cada instante e também pode-se calcular a pressão em cada ponto da tubulação para cada instante. A Figura 14 ilustra a posição da frente em função do tempo para os dados do caso 2. A Figura 15 mostra a pressão no tubo 1 a cada 2 m até o seu enchimento. A evolução da pressão mostrada nessa figura é válida para os três casos, pois o tubo 1 foi adotado com as mesmas características para os três casos exemplificados. Ao iniciar o

enchimento dos tubos 2 e 3, as pressões ao longo do tubo 1 passam a ser diferentes para cada um dos casos apresentados. Analisando a Figura 15 pode-se verificar que no início do tubo 1 há um pico de pressão, mas este pico é menor que a pressão que será atingida no estado permanente. Entretanto, em outras configurações, este pico pode ser maior que a pressão no escoamento permanente.

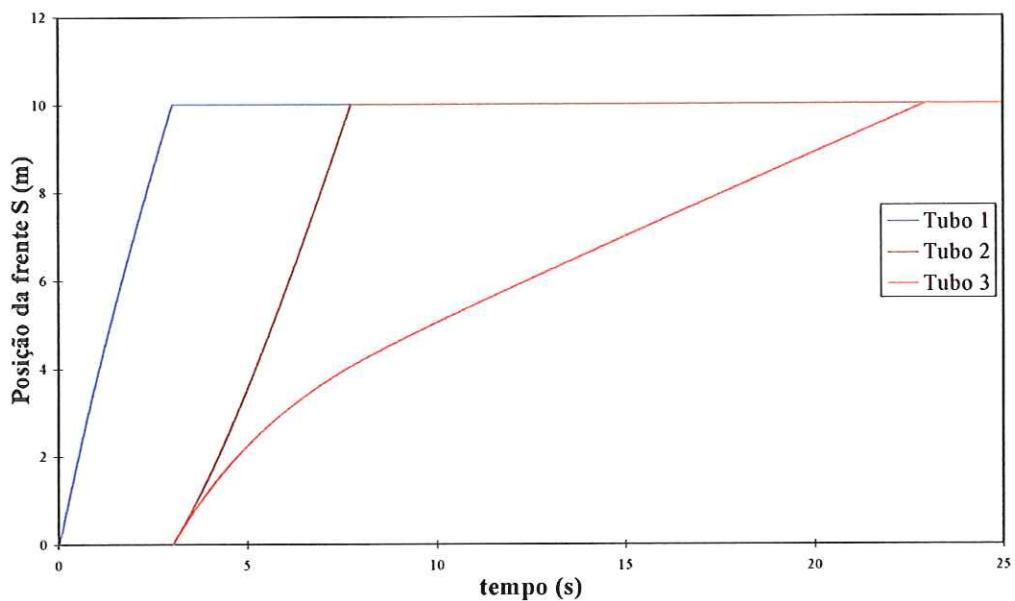


Figura 14 – Posição da frente líquida em cada tubo para o caso 2.

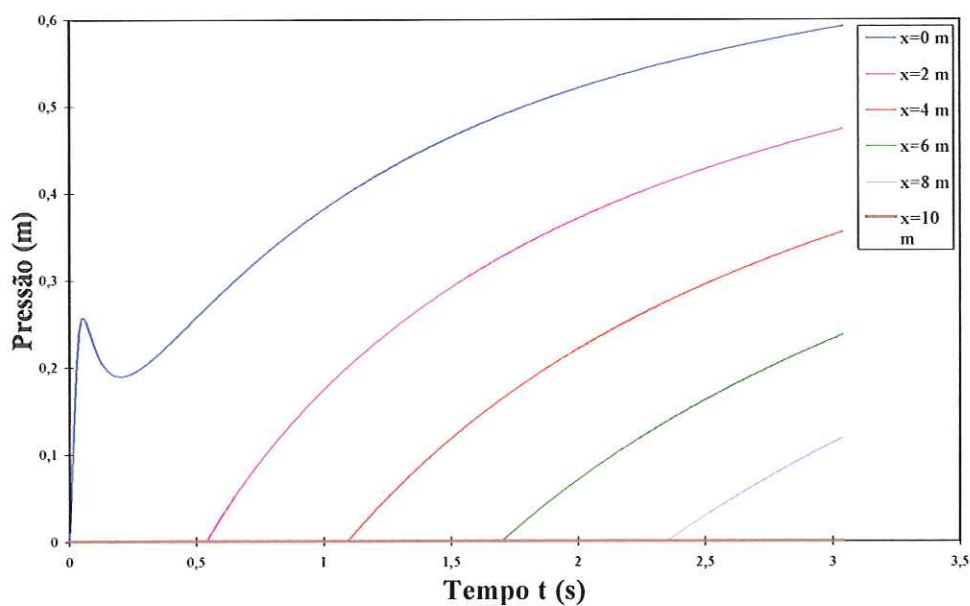


Figura 15 – Pressão (mH₂O) no tubo 1 nos 3 casos, até t = 3,04 s

6. ENSAIOS

Além das 8 baterias de ensaios descritas no item 4.4 do método, foi incluída uma bateria de ensaios preliminares utilizando-se uma linha já existente no laboratório com carga hidráulica de 3,96 m. Estes ensaios preliminares permitiram uma avaliação inicial do medidor de vazão e da placa de aquisição de dados e uma verificação prévia do ajuste do modelo matemático-computacional para esta situação.

De forma resumida, as 9 baterias de ensaios realizados foram:

- Ensaio preliminar, conforme Figura 16.
- Ensaio em regime não permanente da configuração básica mostrada na Figura 17, comum aos demais ensaios, para determinação das perdas localizadas, do fator de atrito do tubo e do tempo de abertura da válvula de manobra para o ajuste do modelo.
- Ensaio em regime não permanente da configuração básica acrescentando-se um tubo de 10 m.
- Ensaio em regime não permanente com uma redução na tubulação.
- Ensaio em regime não permanente com cotovelo e redução na tubulação.
- Ensaio em regime não permanente substituindo-se o cotovelo por um “T” com passagem direta com redução e passagem lateral.
- Ensaio em regime não permanente com um “T” disposto de forma a ficar com passagem bilateral e com redução em um dos lados.
- Ensaio em regime não permanente substituindo-se o “T” por uma conexão em “Y” com redução na passagem direta.

- Ensaio em regime não permanente com conexão em “Y” com redução na saída 45° .

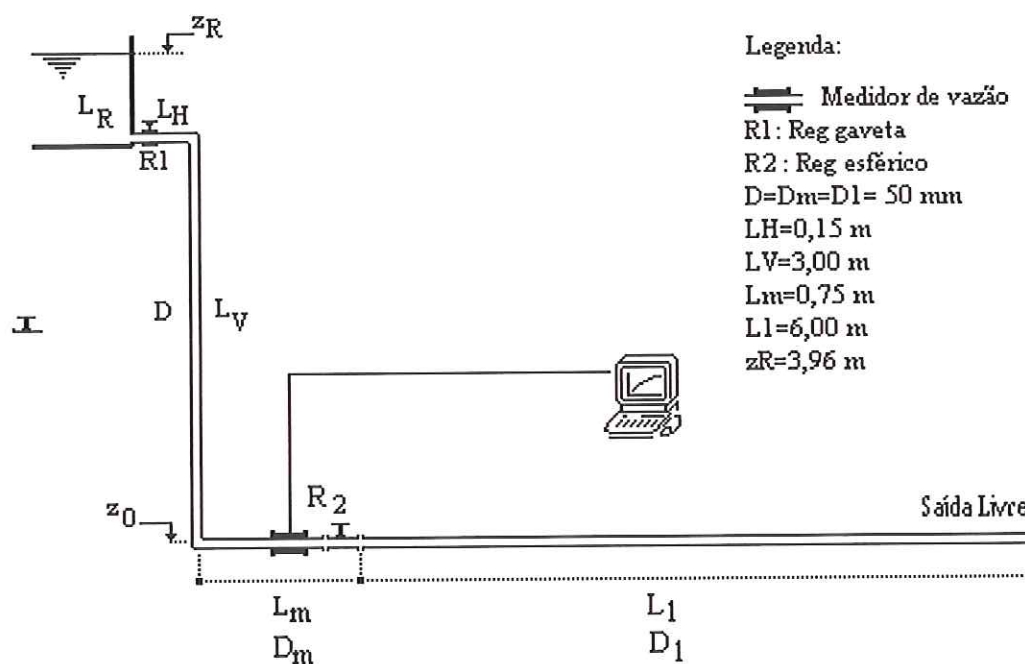


Figura 16 – Configuração do ensaio preliminar

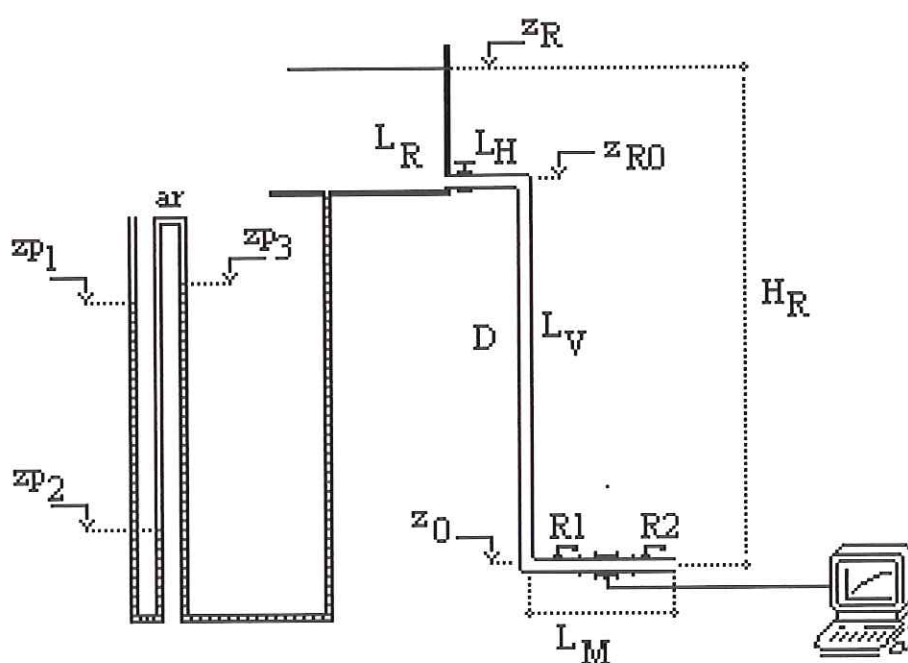


Figura 17 – Configuração básica comum aos ensaios

Em cada bateria de ensaios, para permitir uma avaliação mais ampla do modelo, foram realizados ensaios com a aplicação de diferentes perdas de cargas localizadas através da válvula de controle R1.

Para cada posição da válvula R1 foram realizadas pelo menos 3 manobras da seguinte forma: com a canalização a montante da válvula R₂ completamente cheia de água, submeteu-se a linha à uma manobra de abertura rápida (quase instantânea) na referida válvula, realizando-se as medidas de vazão, pressão e posição da frente em intervalos de 10 milissegundos até o momento em que se estabelece o regime de escoamento permanente.

6.1. Ensaio Preliminar

Foi realizado um ensaio preliminar conforme a configuração mostrada na Figura 16 utilizando-se uma linha já existente no laboratório.

Este ensaio serviu para avaliação da resposta dos equipamentos de medição e verificação preliminar do modelo matemático-computacional.

Para as medidas de vazão utilizou-se o medidor eletromagnético da CONAUT MAG-FLUX 463, acoplado ao sistema de aquisição de dados. A cada ensaio experimental foram registradas as leituras instantâneas de vazão com intervalos de tempo de 10 ms.

Os dados assim obtidos foram devidamente processados, isto é, transformados e ajustados coerentemente.

A calibração do medidor de vazão eletromagnético para este experimento foi realizada por MAGALHÃES (1999), obtendo-se o seguinte ajuste:

$$4,69 \text{ Volts} = 100\% \text{ da leitura do conversor CONAUT} = 30 \text{ m}^3/\text{h} \text{ ou } 8,33 \text{ l/s}$$

Os valores calibrados experimentalmente para o fator de atrito (f) e para o coeficiente de perda localizada (K) também foram obtidos por

MAGALHÃES (1999) que utilizou praticamente a mesma linha para a realização de seu experimento, mas com medidor de vazão e a válvula de manobra posicionados no final da canalização, conforme mostra a Figura 4. Assim, a média de três experimentos em regime permanente forneceu para o fator de atrito (f) o valor de 0,0177 e para o coeficiente de perda de carga localizada, referente às peças e aos acessórios (ΣK), no regime permanente, o valor de 2,75.

Comparando-se o valor do ΣK obtido acima com o fornecido pela literatura, conforme mostrado na Tabela 1, pode-se notar a proximidade dos mesmos.

Tabela 1 – Valores tabelados de K

Peça	K
1 entrada de reservatório	0,50
1 válvula de gaveta aberta	0,20
2 cotovelos de 90°, raio curto	1,80
1 válvula borboleta aberta	0,15
ΣK	2,65

Fonte: Tabelas (3.3) e (3.4) de PORTO(1997)

A Figura 18 mostra o primeiro ajuste da velocidade experimental com a teórica.

Observa-se que o modelo não se ajustou adequadamente para as condições do experimento. No entanto era esperado que, pelo menos nos instantes iniciais, o ajuste ocorresse, pois, conforme mostram os dados experimentais, a coluna líquida parece manter sua integridade por algum tempo.

Três fatos podem explicar a causa do não ajuste nos instantes iniciais: os coeficiente de perda de carga localizada e o fator de atrito para a perda distribuída, diminuem com o aumento da velocidade. Tanto o coeficiente de perda de carga localizada quanto o fator de atrito foram considerados como

constantes no cálculo. Outro fato foi a consideração da abertura instantânea da válvula de manobra, adotando, para o cálculo, o valor do coeficiente de perda localizada na válvula como constante e igual ao valor com a mesma totalmente aberta.

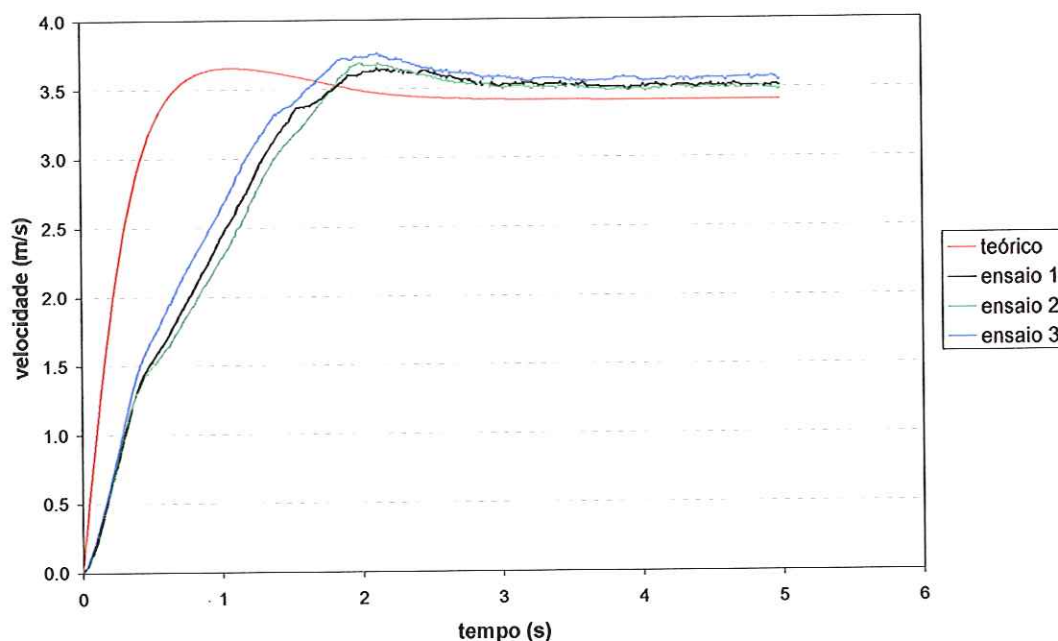


Figura 18 – Evolução da velocidade do escoamento (ajuste 1)

Para buscar um melhor ajuste através da consideração do tempo de abertura da válvula esférica, adotou-se uma relação linear do tempo com o ângulo de abertura da válvula.

Calculando-se desta forma o ângulo de abertura em cada instante, pôde-se estimar a perda localizada na válvula também em cada instante, até a sua abertura completa. Para isto, ajustou-se uma curva cúbica aos valores tabelados em SILVESTRE (1979) referente a perda de carga localizada em uma válvula esférica em função do ângulo de abertura.

Adotando-se um tempo de abertura da válvula de 0,5 segundos, o ajuste dos resultados experimentais e teóricos nos instantes iniciais foi satisfatório como mostra a Figura 19.

Pode-se observar que após alguns instantes, ocorre uma divergência entre os resultados experimentais e os do modelo. A possível razão foi que a aceleração da coluna líquida não foi suficiente para manter a integridade da frente, quebrando uma das hipóteses de formulação do modelo. A velocidade crítica ($V_{crítica} = 0,5 \cdot \sqrt{gD} = 0,35 \text{ m/s}$), acima da qual não haveria intrusão de ar, foi superada após aproximadamente 0,15 s.

Seria necessário adotar um diâmetro menor da tubulação, ou uma carga hidráulica maior, ou uma inclinação da tubulação ascendente, ou uma combinação das opções citadas para satisfazer as hipóteses do modelo, ou seja, manter a integridade da coluna líquida.

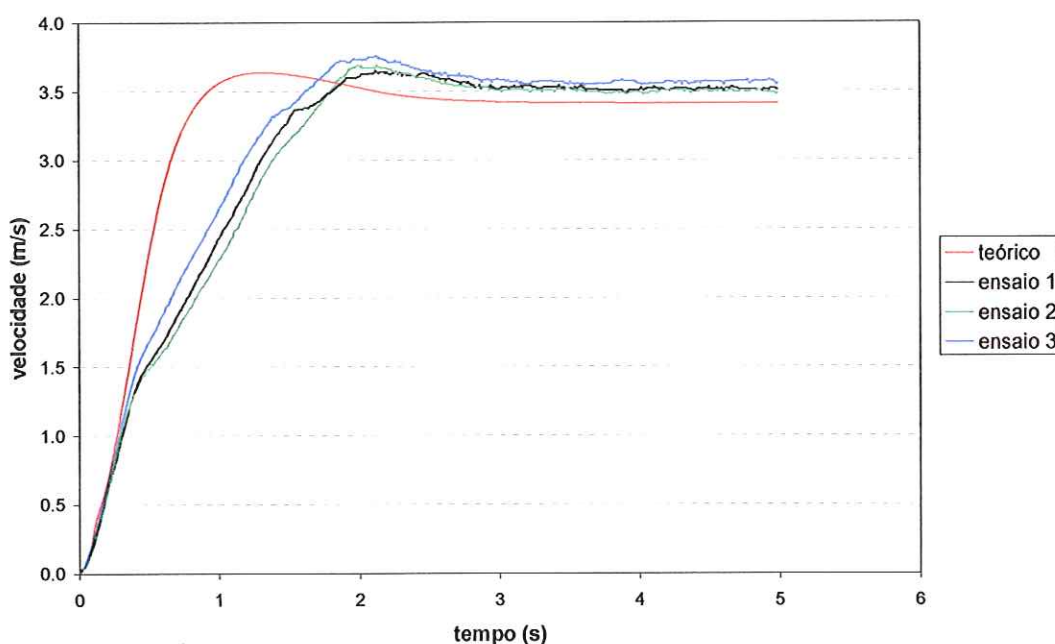


Figura 19 – Evolução da velocidade do escoamento (ajuste 2)

6.2. Ensaio com a Configuração Básica

Utilizando-se a configuração mostrada na Figura 17, realizou-se uma bateria de ensaios para a determinação dos parâmetros característicos deste trecho inicial e respectivo ajuste do modelo.

O trecho ensaiado foi composto com os seguintes elementos: reservatório de alimentação, 1,50 m de canalização horizontal com uma válvula de gaveta (marca DECA nº 2) para manutenção, canalização de descida com 6,75 m e canalização horizontal com 1,37 m de comprimento, contendo: uma válvula esférica para controle (R1), um medidor eletromagnético de vazão e outra válvula esférica para manobra (R2).

6.2.1. Procedimentos e Resultados

Com a válvula de controle (R1) totalmente aberta e a canalização cheia de água até a válvula de manobra (R2) foram realizados três ensaios através da abertura rápida da válvula de manobra. Entre cada um destes ensaios, o nível z_R do reservatório era recomposto.

As leituras instantâneas de vazão foram tomadas com intervalos de tempo de 10 ms. O nível d'água no reservatório, z_R , era conferido antes de cada manobra utilizando-se o manômetro diferencial ar-água que fornecia as leituras: z_{p1} , z_{p2} e z_{p3} .

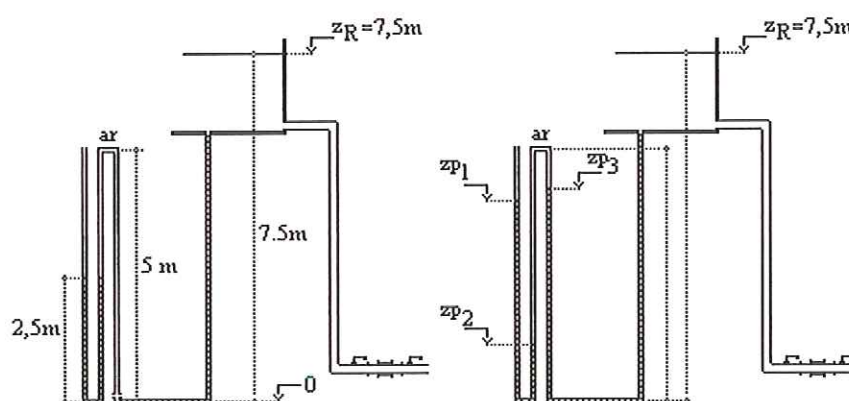


Figura 20 – Ligação do manômetro ar/água

Desta forma:

$$z_R = z_{p3} + (z_{p1} - z_{p2})$$

A ligação do manômetro foi executada seguindo-se a indicação da Figura 20, os valores de z_{p1} , z_{p2} e z_{p3} correspondentes a $z_R=7,5m$ foram estimados para a montagem do piezômetro resolvendo-se o sistema:

$$\begin{cases} ((5 - z_{p_2}) + (5 - z_{p_3}))(17.5 - z_{p_3}) = 10 (5 + 2,5) \\ 7.5 - z_{p_3} = z_{p_1} - z_{p_2} \\ z_{p_1} + z_{p_2} = 5 \end{cases}$$

cuja solução é $z_{p1}=4,330$, $z_{p2}=0,669$ e $z_{p3}=3,839$

Os coeficientes das perdas de carga localizadas para esse primeiro ensaio, segundo a literatura, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2– Valores tabelados de K para o experimento b

Peça	K
1 entrada de reservatório	0,50
1 válvula de gaveta aberta	0,15
2 cotovelos de 90°, raio longo	0,80
2 válvulas esféricas abertas	0,00
2 luvas (rosca x cola) p/ válvula de gaveta	0,00
2 junções rosca para medidor de vazão	0,00
ΣK	1,45

Fonte: Tabelas (3.3) e (3.4) de PORTO(1997) e NBR 12214

O experimento foi repetido seguindo-se os mesmos procedimentos, mas com a válvula de controle (R1) parcialmente fechada (abertura com 45°).

Utilizando os valores tabelados para a perda de carga localizada em uma válvula esférica em função do ângulo de abertura apresentado por SILVESTRE (1979), o Prof. Dr. Hans George Arens ajustou uma curva cúbica àqueles dados. Para uma abertura de 45° o coeficiente de perda localizada

calculado, segundo esta equação de ajuste, é igual a 31,2. Sendo assim, para este novo ensaio, ao valor total de K apresentado na Tabela 2 deve-se somar 31,2, resultando $\Sigma K = 32,65$.

A avaliação do fator de atrito para os ensaios foi realizada utilizando-se as fórmulas:

a) Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71 \cdot D} + \frac{2,51}{\text{Rey} \sqrt{f}} \right) \quad (31)$$

b) Swamee-Jain:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{\text{Rey}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (32)$$

c) SWAMEE (1993), válida para qualquer valor de Reynolds, ou seja, para escoamento laminar, turbulento liso, de transição e turbulento rugoso:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{\text{Rey}} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{\text{Rey}^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{\text{Rey}} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (33)$$

sendo:

$$\text{Rey} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (34)$$

A Tabela 3 mostra a comparação entre as formulações citadas. Foram utilizadas as seguintes constantes para o cálculo teórico do fator de atrito:

- Rugosidade absoluta $\varepsilon = 0,01$ mm
- Viscosidade cinemática do fluido $\nu = 10^{-6}$ m²/s
- Diâmetro $D = 53,5$ mm

A velocidade máxima estimada para os ensaios foi de 4,8 m/s. Sendo assim, o cálculo do fator de atrito foi realizado até este limite de velocidade.

Tabela 3– Valores para o fator de atrito

V (m/s)	Rey	f ₁	f ₂	f ₃	V (m/s)	Rey	f ₁	f ₂	f ₃
0.10	5.3E+03	0.0374	0.0370	0.0373	2.50	1.3E+05	0.0181	0.0181	0.0181
0.20	1.1E+04	0.0308	0.0307	0.0308	2.60	1.4E+05	0.0180	0.0180	0.0180
0.30	1.6E+04	0.0278	0.0278	0.0278	2.70	1.4E+05	0.0179	0.0179	0.0179
0.40	2.1E+04	0.0259	0.0259	0.0259	2.80	1.5E+05	0.0178	0.0178	0.0178
0.50	2.7E+04	0.0246	0.0247	0.0246	2.90	1.5E+05	0.0177	0.0177	0.0177
0.60	3.2E+04	0.0236	0.0237	0.0236	3.00	1.6E+05	0.0176	0.0176	0.0176
0.70	3.7E+04	0.0229	0.0229	0.0229	3.10	1.6E+05	0.0175	0.0175	0.0175
0.80	4.2E+04	0.0222	0.0223	0.0222	3.20	1.7E+05	0.0174	0.0174	0.0174
0.90	4.8E+04	0.0217	0.0218	0.0217	3.30	1.7E+05	0.0174	0.0173	0.0174
1.00	5.3E+04	0.0213	0.0213	0.0213	3.40	1.8E+05	0.0173	0.0173	0.0173
1.10	5.8E+04	0.0209	0.0209	0.0209	3.50	1.9E+05	0.0172	0.0172	0.0172
1.20	6.4E+04	0.0205	0.0206	0.0205	3.60	1.9E+05	0.0172	0.0171	0.0172
1.30	6.9E+04	0.0202	0.0203	0.0202	3.70	2.0E+05	0.0171	0.0171	0.0171
1.40	7.4E+04	0.0200	0.0200	0.0199	3.80	2.0E+05	0.0170	0.0170	0.0170
1.50	8.0E+04	0.0197	0.0197	0.0197	3.90	2.1E+05	0.0170	0.0169	0.0170
1.60	8.5E+04	0.0195	0.0195	0.0195	4.00	2.1E+05	0.0169	0.0169	0.0169
1.70	9.0E+04	0.0193	0.0193	0.0193	4.10	2.2E+05	0.0169	0.0168	0.0169
1.80	9.5E+04	0.0191	0.0191	0.0191	4.20	2.2E+05	0.0168	0.0168	0.0168
1.90	1.0E+05	0.0189	0.0189	0.0189	4.30	2.3E+05	0.0168	0.0167	0.0168
2.00	1.1E+05	0.0188	0.0188	0.0187	4.40	2.3E+05	0.0167	0.0167	0.0167
2.10	1.1E+05	0.0186	0.0186	0.0186	4.50	2.4E+05	0.0167	0.0166	0.0167
2.20	1.2E+05	0.0185	0.0185	0.0185	4.60	2.4E+05	0.0166	0.0166	0.0166
2.30	1.2E+05	0.0183	0.0183	0.0183	4.70	2.5E+05	0.0166	0.0165	0.0166
2.40	1.3E+05	0.0182	0.0182	0.0182	4.80	2.5E+05	0.0165	0.0165	0.0165

OBS.: f₁, f₂ e f₃ foram calculados conforme equações (31) (32) e (33) respectivamente.

Pode-se observar uma boa concordância entre as 3 formulações para o intervalo considerado. Para valores menores de Reynolds deve-se utilizar a

fórmula de SWAMEE (1993) que se aproxima bem do fator de atrito no regime laminar dado por:

$$f = \frac{64}{\text{Rey}} \quad (35)$$

Os principais parâmetros para ajuste do modelo são: o fator de atrito f , os coeficientes das perdas localizadas representados pelo ΣK , o tempo de abertura da válvula de manobra, o comprimento L_0 , que permite considerar a aceleração do fluido dentro do reservatório nas proximidades da saída da canalização, e os comprimentos fictícios (nas peças T, Y, redução, cotovelo) necessários para a solução das equações quando a frente alcança tais peças.

Foi utilizada a nomenclatura L_{0ij} para os comprimentos fictícios nas peças. O índice i corresponde ao número atribuído ao segmento de tubo a montante da peça e o índice j corresponde ao número atribuído ao segmento a jusante. Como exemplo, a colocação de um T no final de um tubo 1 resulta em 2 tubos a jusante, tubo 2 e tubo 3. Assim aos comprimentos fictícios serão: L_{012} e L_{013} .

As perdas de carga localizadas e o fator de atrito são os dois parâmetros que apresentam dificuldade para ajuste, pois ambos apresentam variação em função da velocidade, tornando-se particularmente mais complicado para velocidades próximas de zero, quando seus valores tendem a infinito, o que ocorre logo após a abertura da válvula de manobra.

A Figura 21 ilustra a variação do fator de atrito em função da velocidade para as condições do ensaio, conforme eq. (33).

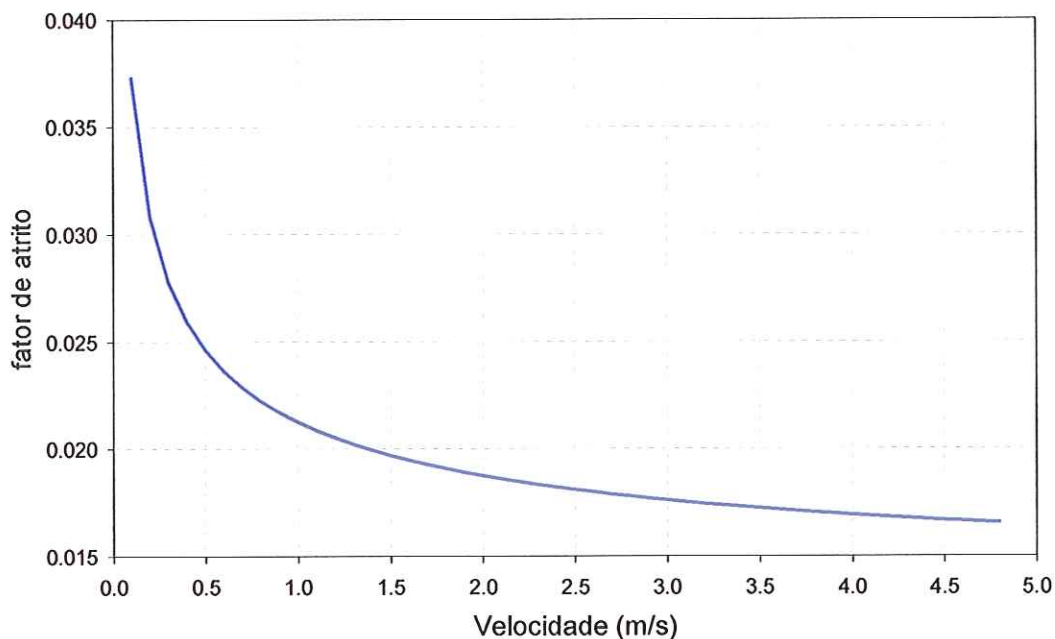


Figura 21 – Fator de atrito em função da velocidade conforme eq. (33)

No caso da variação das perdas localizadas com a velocidade, não se tem formulações teóricas e não são muitos os ensaios de peças com determinação empírica de K em função da velocidade. No caso de escoamentos permanentes e para a faixa de velocidade utilizada na prática, a variação de K é considerada pequena e trabalha-se com os valores médios.

PORTO (1997) apresenta o resultado do levantamento do coeficiente K em função de Reynolds em um cotovelo de 45° e $1\frac{1}{2}$ " de diâmetro, de ferro galvanizado, realizado no Laboratório de Hidráulica da Escola de Engenharia de São Carlos, para a Indústria de Fundição Tupi. Nas condições do ensaio, ou seja, para o diâmetro fixo e escoamento de água, o número de Reynolds varia apenas em função da velocidade e, conseqüentemente, o coeficiente K também passa a ser expresso em função da velocidade. A Figura 22, reproduzida de PORTO (1997), ilustra o comportamento de K em função número de Reynolds.

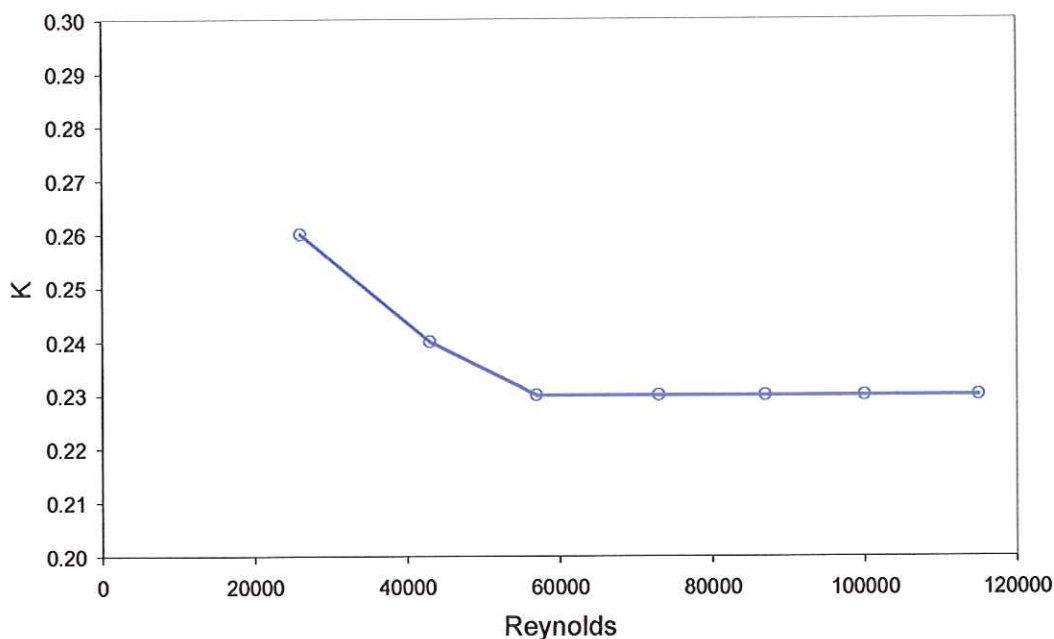


Figura 22 – K x Reynolds para um cotovelo de 45° - PORTO (1997)

Os valores das perdas localizadas serão tomados como sendo constantes para o ajuste do modelo, utilizando-se os valores médios tabelados na literatura como ponto de partida.

O nível do reservatório será considerado constante no modelo, pois verificou-se que seu rebaixamento é desprezível (máximo de 7 cm frente a uma carga hidráulica disponível de mais de 7 m) com a velocidade estabilizada, caracterizando o escoamento como praticamente permanente.

Partindo-se dos dados experimentais, o primeiro ajuste foi realizado utilizando-se f constante. Para o cálculo de f , adotou-se o seguinte procedimento: calculou-se a média das velocidades finais (após a estabilização do escoamento em $t = 4$ s) obtidas nas três primeiras manobras, ou seja, $(4,81+4,79+4,80)/3 = 4,80$ m/s. Utilizando-se a equação (33) calculou-se o valor de f para esta velocidade, o que resultou em $f = 0,0165$. Para as outras 3 manobras realizadas com a válvula de controle parcialmente fechada, repetiu-se o mesmo procedimento, obtendo-se para a média das velocidades finais, $V = (2,04+2,01+1,99) = 2,01$ m/s, em $t = 4$ s, o que resultou em $f = 0,0187$.

No caso das primeiras 3 manobras foram obtidos os seguintes parâmetros para ajuste do modelo matemático:

- total das perdas localizadas representado pelo $\Sigma K = 2,20$
- tempo de abertura da válvula de manobra $t_0 = 0,3$ s
- comprimento fictício para considerar a aceleração do fluido dentro do reservatório, nas proximidades da saída da canalização $L_0 = 0,20$ m

O efeito do parâmetro L_0 mostrou-se pouco significativo no ajuste do modelo. O valor adotado correspondente a aproximadamente quatro vezes o diâmetro da saída do reservatório.

O valor do coeficiente das perdas localizadas encontrado foi um pouco superior ao tabelado na literatura utilizada. Esta diferença pode ser atribuída às luvas e junções que tiveram coeficiente de perda de carga considerados como zero. Também foi desprezada a perda localizada na redução de diâmetro de 53,5 mm para 50 mm no medidor de vazão seguida de expansão. Além disso, na própria literatura observa-se diferenças dos valores tabelados para as peças utilizadas. Os valores das perdas localizadas dependem de uma série de fatores, inclusive da marca, do equipamento utilizado na fabricação e ainda do processo de colagem das mesmas durante a montagem da canalização.

No caso das outras 3 manobras (com a válvula de controle parcialmente fechada) o valor total das perdas localizadas para ajuste do modelo foi $\Sigma K = 31$. Os valores de t_0 e L_0 foram mantidos os mesmos da primeira bateria de ensaios.

O valor do coeficiente das perdas localizadas obtido experimentalmente foi um pouco inferior ao valor calculado de 32,65. Admitindo-se que o valor do coeficiente das perdas localizadas experimental com a válvula totalmente aberta, $K = 2,2$, seja o correto, o coeficiente de perda localizada experimental na válvula parcialmente fechada (45°) resulta : $(31 - 2,2) = 28,8$.

O posicionamento da válvula com 44° produz um coeficiente de perda de carga igual a 28,4. Pode-se concluir, considerando-se o grau de precisão no posicionamento da válvula, que o ajuste foi adequado, pois uma variação de

menos de 1° no posicionamento desta válvula é suficiente para reproduzir o resultado experimental obtido.

A Figura 23 mostra graficamente o ajuste do modelo aos dados experimentais.

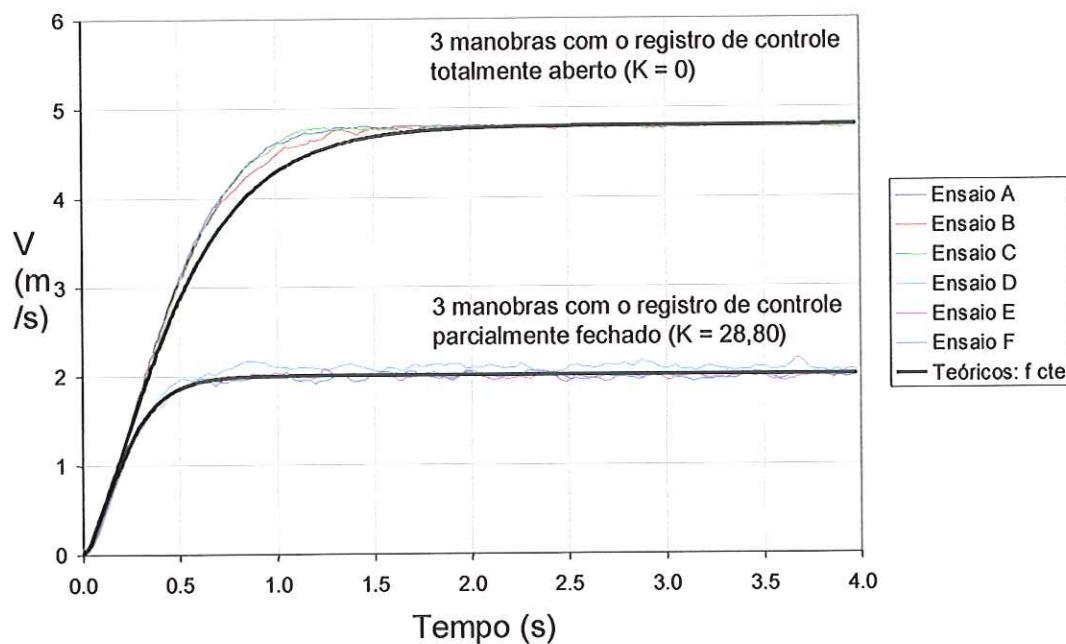


Figura 23 – Dados experimentais e modelo com fator de atrito cte

O segundo ajuste foi realizado utilizando-se a expressão de SWAMEE (1993) para cálculo de $f(V)$ durante a solução numérica da equação diferencial. A Figura 24 mostra graficamente o ajuste do modelo aos dados experimentais para esta consideração. A utilização dos mesmos parâmetros considerando-se o fator de atrito constante produziu um ajuste adequado também neste caso.

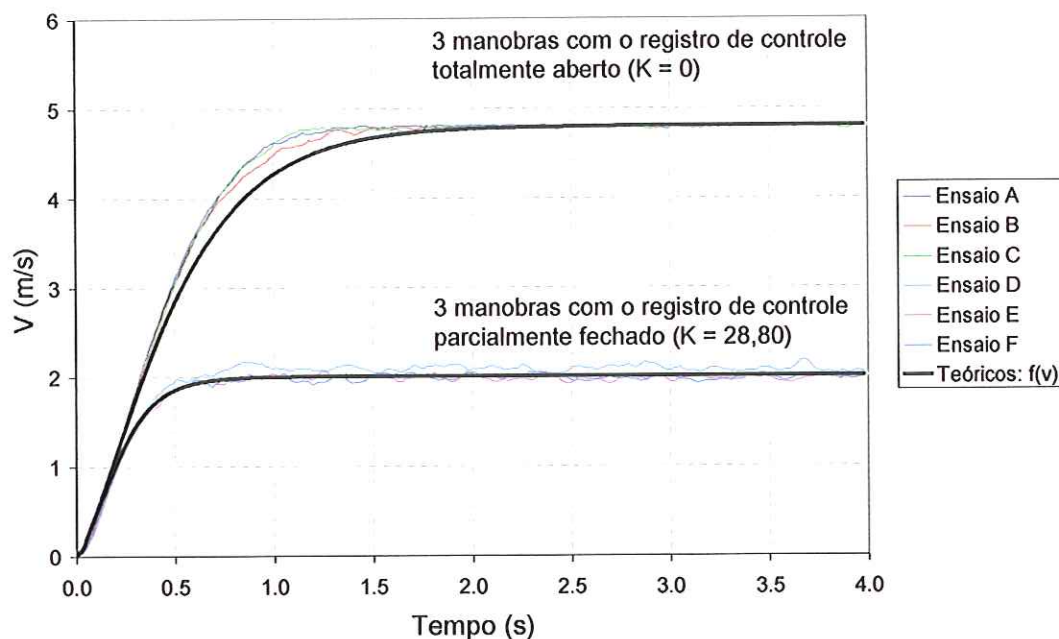


Figura 24 – Dados experimentais e modelo com fator de atrito = $f(V)$

A Figura 25 mostra a comparação do resultado do ajuste do modelo utilizando-se o fator de atrito constante e como função da velocidade. Houve um ajuste um pouco melhor com a utilização de $f(V)$ nos instantes iniciais do escoamento. Entretanto, esta diferença apresentada não foi significativa. Mesmo assim, ainda não se pode generalizar este fato para qualquer condição, pois neste caso, isto pode ser atribuído à magnitude das perdas localizadas em relação à distribuída e ao valor relativamente pequeno da relação L/D (comprimento e diâmetro do tubo). Para os demais ensaios, optou-se em utilizar f conforme a expressão de SWAMEE (1993) para o ajuste do modelo, pois este cálculo não aumenta significativamente a complexidade da equação diferencial e torna o modelo mais coerente com a teoria aplicada.

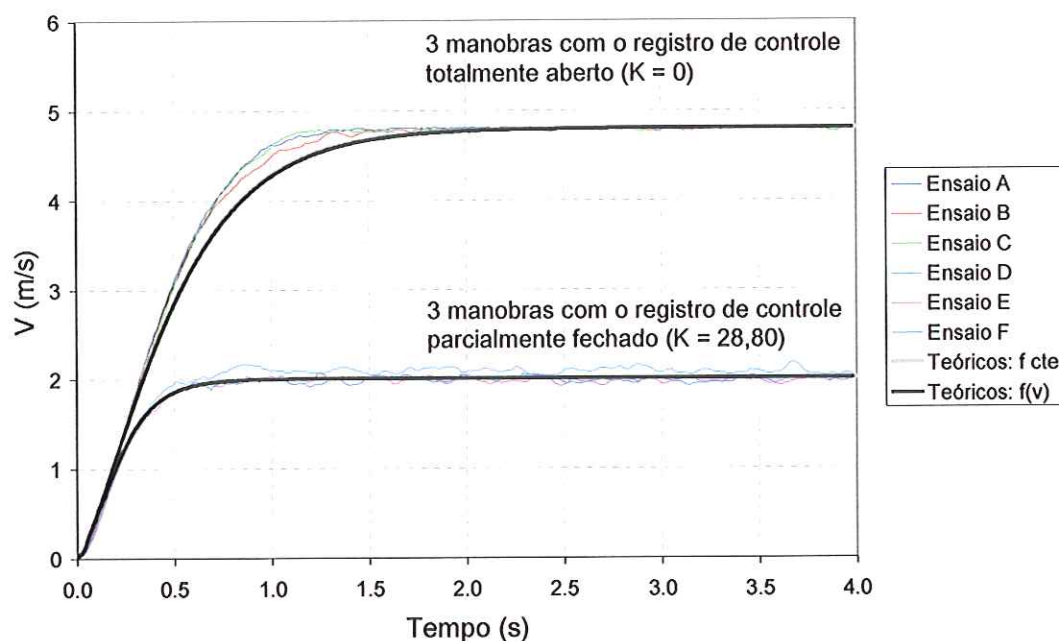


Figura 25 – Comparação entre os modelos com $f = cte$ e $f = f(V)$

6.3. Ensaios com acréscimo de um tubo de 10 m

Utilizando-se a configuração mostrada na Figura 26, com $D_1 = D_2 = 44,5$ mm e $L_1 = L_2 = 5,00$ m, realizou-se uma bateria de ensaios para avaliação do ajuste do modelo com os parâmetros característicos determinados nos ensaios anteriores e avaliação da necessidade de possíveis ajustes antes da colocação das junções propostas para estudo.

Para esta nova bateria de ensaios foi adicionada uma válvula de gaveta (marca DECA nº 2) colocada no trecho vertical (R1 mostrado na Figura 26), pois a utilização da válvula esférica para a aplicação de uma perda localizada apresentou dificuldades para precisar o ângulo de abertura e o respectivo coeficiente de perda de carga para outras condições.

A válvula de gaveta acrescentada apresenta 13 voltas para o fechamento total, já descontadas as folgas. Isto torna mais fácil e precisa a determinação da perda de carga aplicada em função do número de voltas aplicadas à válvula.

A tabela a seguir apresenta os valores de K, adaptado de SILVESTRE (1979), para a válvula de gaveta utilizada.

Tabela 4– Perda localizada em válvula de gaveta em função do n° de voltas

Voltas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
K:	0.12	0.13	0.17	0.23	0.45	0.88	1.54	2.83	5.03	10.05	24.40	64.33	26708.71

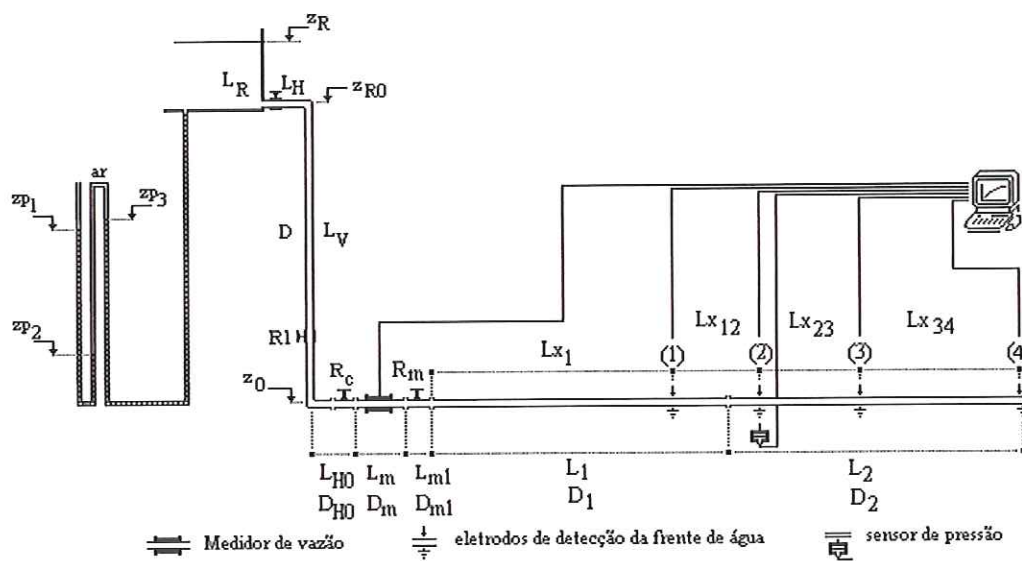


Figura 26 – Configuração dos ensaios com tubo de 10 m ($D_1 = D_2$)

Tabela 5– Dimensões utilizadas na montagem com tubo de 10 m

$L_H = 1,50$ m	$L_2 = 5,00$ m	$D = 53,5$ mm
$L_V = 6,75$ m	$L_{X1} = 4,00$ m	$D_{H0} = 53,5$ mm
$L_{H0} = 0,66$ m	$L_{X12} = 1,41$ m	$D_m = 50,0$ mm
$L_m = 0,57$ m	$L_{X23} = 2,11$ m	$D_0 = 53,5$ mm
$L_{m1} = 0,14$ m	$L_{X34} = 2,48$ m	$D_1 = 44,5$ mm
$L_1 = 5,00$ m	$Z_R = 7,25^*$ m	$D_2 = 44,5$ mm

* O valor exato de z_R em cada conjunto de ensaios é informado oportunamente.

6.3.1. Procedimentos e Resultados –Tubo 10 m

A válvula de controle (R1), com um curso de treze voltas para o fechamento total, foi colocada em 6 posições diferentes de curso, ou seja, foram realizados ensaios com a válvula nas seguintes posições: 0 (zero) ou totalmente aberta, 7, 8, 9, 10 e 11 voltas. Para cada posição da válvula, com a canalização cheia de água até a válvula de manobra (R_m) foram realizados pelo menos três ensaios através da abertura rápida desta válvula. Entre cada um destes ensaios, o nível Z_R do reservatório era recomposto.

Os resultados dos ensaios com a válvula de controle (R1) em cada uma das posições são mostrados a seguir, da Figura 27 até a Figura 33.

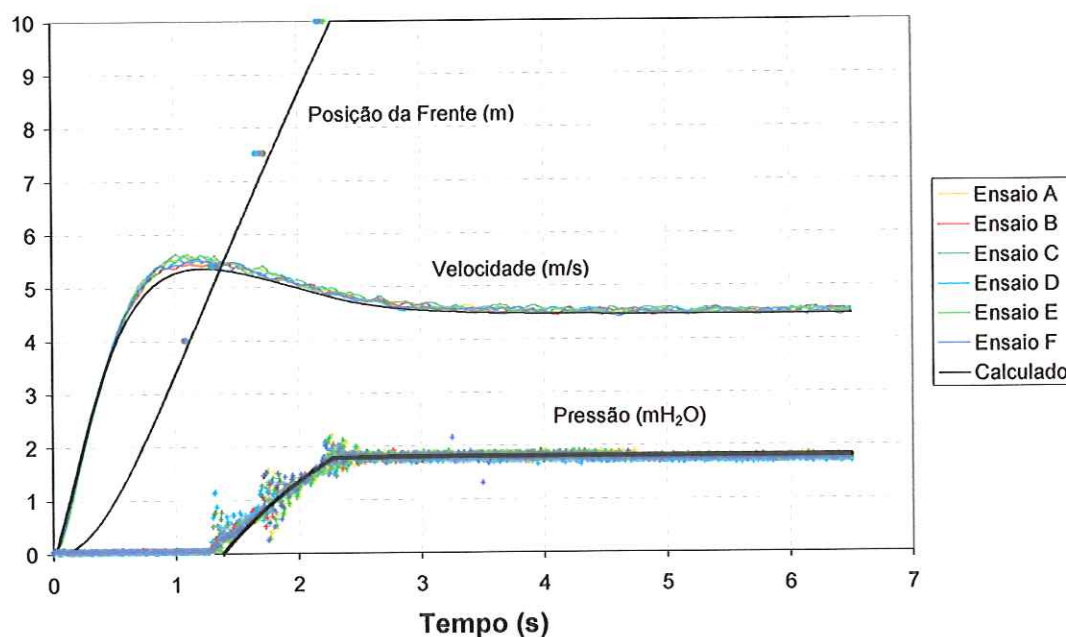


Figura 27 – Resultados dos ensaios com tubo de 10 m ($R1 = 0$ voltas).

Tabela 6– Parâmetros dos ensaios com tubo de 10 m ($R1 = 0$ voltas).

Carga hidráulica	$Z_R = 7,25$ m
Coef. das perdas localizadas	$\Sigma K = 1,50$
Nº de voltas na válvula R1	0 voltas

Tabela 7– Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 0 voltas).

	Experimental*	Teórico	Diferença %
Tempo para enchimento do tubo:	2,19 s	2,28 s	4,1%
Velocidade máxima:	5,56 m/s	5,36 m/s	3,6%
Velocidade final:	4,52 m/s	4,47 m/s	-1,1%
Pressão final:	1,75 mH ₂ O	1,81 mH ₂ O	3,4%

*Média dos valores obtidos nos 6 ensaios realizados.

Para um bom ajuste do modelo, o valor do coeficiente das perdas localizadas utilizado foi de 1,5. Este valor encontra-se próximo do valor tabelado de 1,45 encontrado na literatura, sendo coerente com os resultados já obtidos.

Neste primeiro ensaio com o tubo de 10 m foram realizadas 6 manobras para prevenir eventuais perdas de dados. Como não foi necessário desprezar nenhuma série, para os demais ensaios optou-se por realizar apenas 3 manobras para cada posicionamento da válvula R1.

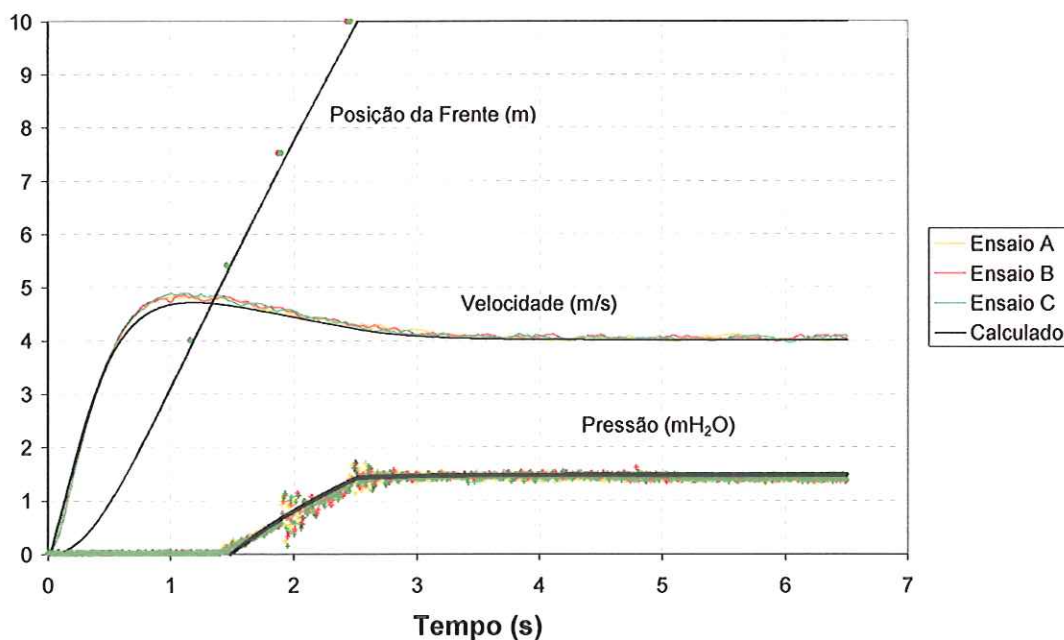


Figura 28 – Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 7 voltas)

Tabela 8– Parâmetros dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 7 voltas).

Carga hidráulica	$Z_R = 7,20$ m
Coef. das perdas localizadas	$\Sigma K = 4,33$
N ° de voltas na válvula R1	7 voltas

Tabela 9– Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 7 voltas).

	Experimental*	Teórico	Diferença %
Tempo para enchimento do tubo:	2,51 s	2,46 s	-2,0%
Velocidade máxima:	4,86 m/s	4,72 m/s	-2,9%
Velocidade final:	4,07 m/s	4,01 m/s	-1,5%
Pressão final:	1,38 mH ₂ O	1,48 mH ₂ O	7,2%

*Média dos valores obtidos nos 3 ensaios realizados.

Neste ensaio com R1 = 7 voltas foram mantidos os valores dos coeficientes das perdas localizadas do ensaio anterior acrescido do valor calculado na válvula R1.

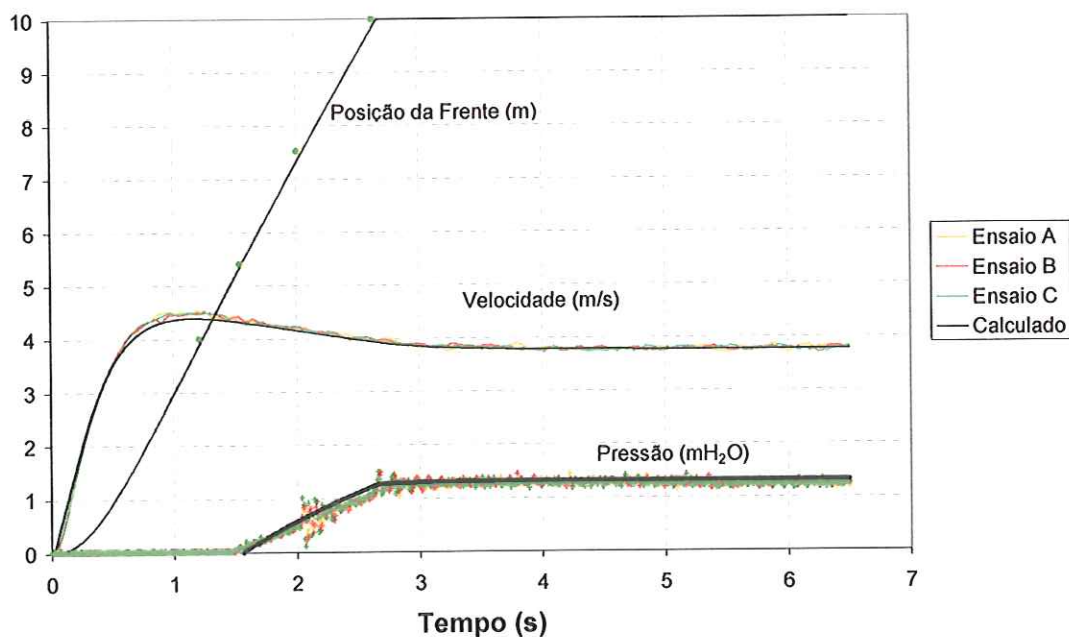


Figura 29 – Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 8 voltas)

Tabela 10– Parâmetros dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 8 voltas).

Carga hidráulica	$Z_R = 7,18$ m
Coef. das perdas localizadas	$\Sigma K = 6,53$
N ° de voltas na válvula R1	8 voltas

Tabela 11– Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 8 voltas).

	Experimental*	Teórico	Diferença %
Tempo para enchimento do tubo:	2,64 s	2,66 s	0,8%
Velocidade máxima	4,52 m/s	4,40 m/s	-2,6%
Velocidade final:	3,79 m/s	3,78 m/s	-0,3%
Pressão final:	1,25 mH ₂ O	1,33 mH ₂ O	6,4%

*Média dos valores obtidos nos 3 ensaios realizados.

Neste ensaio com R1 = 8 voltas foram mantidos os valores dos coeficientes das perdas localizadas de 1,50 acrescido do valor calculado na válvula R1, obtendo-se assim um bom ajuste do modelo.

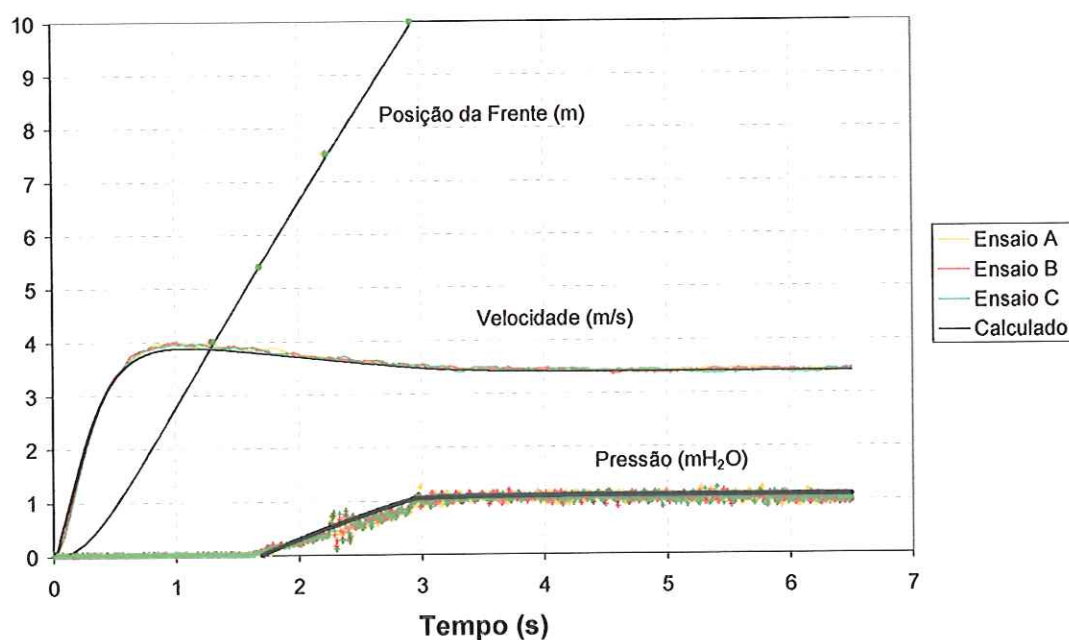


Figura 30 – Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 9 voltas)

Tabela 12– Parâmetros dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 9 voltas).

Carga hidráulica	$Z_R = 7,34$ m
Coef. das perdas localizadas	$\Sigma K = 11,55$
N ° de voltas na válvula R1	9 voltas

Tabela 13– Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 9 voltas).

	Experimental*	Teórico	Diferença %
Tempo para enchimento do tubo:	2,92 s	2,97 s	1,7%
Velocidade máxima:	3,98 m/s	3,89 m/s	-2,3%
Velocidade final:	3,43 m/s	3,37 m/s	-1,7%
Pressão final:	0,98 mH ₂ O	1,07 mH ₂ O	9,2%

*Média dos valores obtidos nos 3 ensaios realizados.

Neste ensaio, com R1 = 9 voltas, manteve-se o valor do coeficiente das perdas localizadas de 1,50 acrescido do valor calculado na válvula R1.

No ensaio seguinte, com R1 = 10 voltas, ao manter-se o coeficiente das perdas localizadas de 1,50 e acrescentar o valor calculado de 24,4 na válvula R1, houve uma divergência maior entre os resultados experimentais e calculados através do modelo como pode ser observado na Figura 31.

Com o aumento no número de voltas na válvula R1, uma pequena variação neste posicionamento provoca uma variação maior na respectiva perda localizada como mostra a Tabela 4. Assim, o cálculo da perda de carga localizada torna-se menos preciso.

A redução da perda localizada na válvula R1 de 24,4 para 22,6 produz um ajuste do modelo com os dados experimentais compatíveis com os demais ensaios como mostra a Figura 32.

Deve-se observar pelas duas figuras a seguir que houve a perda dos dados de uma das manobras, restando apenas duas séries de dados.

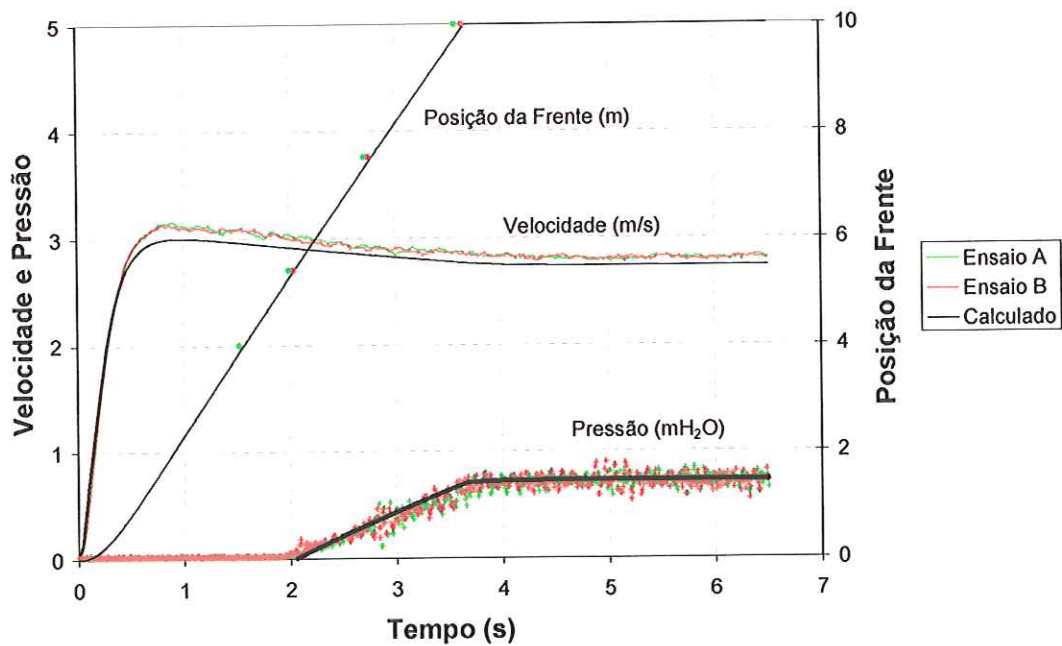


Figura 31 – Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 10 volts)

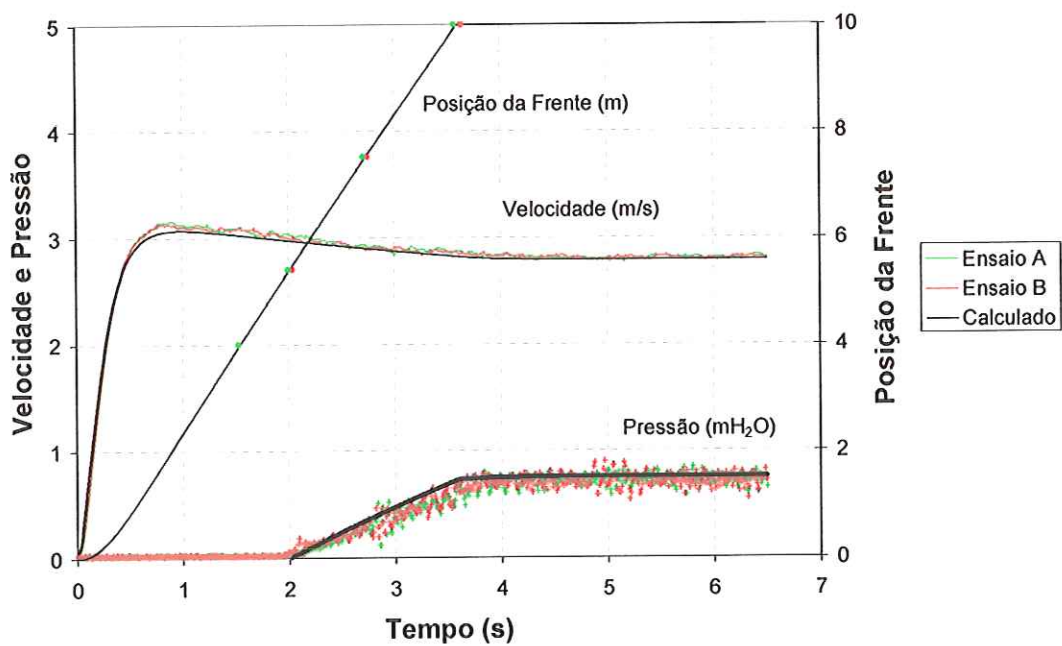


Figura 32 – Resultado do modelo com redução de K em R1 (10 volts)

Tabela 14– Parâmetros dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 10 voltas).

Carga hidráulica	$Z_R = 7,36$ m
Coef. das perdas localizadas (Figura 31)	$\Sigma K = 25,90$
Coef. das perdas localizadas (Figura 32)	$\Sigma K = 24,10$
N ° de voltas na válvula R1	10 voltas

Tabela 15– Resultados do ajuste dos ensaios conforme Figura 31

	Experimental*	Teórico	Diferença %
Tempo para enchimento do tubo:	3,61 s	3,70 s	2,5%
Velocidade máxima	3,15 m/s	3,01 m/s	-4,4%
Velocidade final:	2,80 m/s	2,71 m/s	-3,2%
Pressão final:	0,71 mH ₂ O	0,71 mH ₂ O	0,0%

*Média dos valores obtidos nos 2 ensaios realizados.

Tabela 16– Resultados do ajuste dos ensaios conforme Figura 32

	Experimental*	Teórico	Diferença %
Tempo para enchimento do tubo:	3,61 s	3,60 s	-0,3%
Velocidade máxima	3,15 m/s	3,07 m/s	-2,5%
Velocidade final:	2,80 m/s	2,79 m/s	-0,4%
Pressão final:	0,71 mH ₂ O	0,72 mH ₂ O	1,4%

*Média dos valores obtidos nos 2 ensaios realizados.

No ensaio seguinte, com R1 = 11 voltas, ao manter-se o coeficiente das perdas localizadas de 1,50 e acrescentar o valor calculado de 64,33 na válvula R1, também houve uma divergência maior entre os resultados experimentais e calculados através do modelo, cujas razões são as mesmas já citadas nos ensaios com R1 = 10 voltas. Entretanto, optou-se por manter o valor de K conforme o cálculo.

Observou-se também uma divergência entre os resultados experimentais e teóricos já a partir dos instantes iniciais. Esta diferença poderia ter sido reduzida aumentando o tempo de abertura da válvula de manobra de 0,2 para 0,3 segundos.

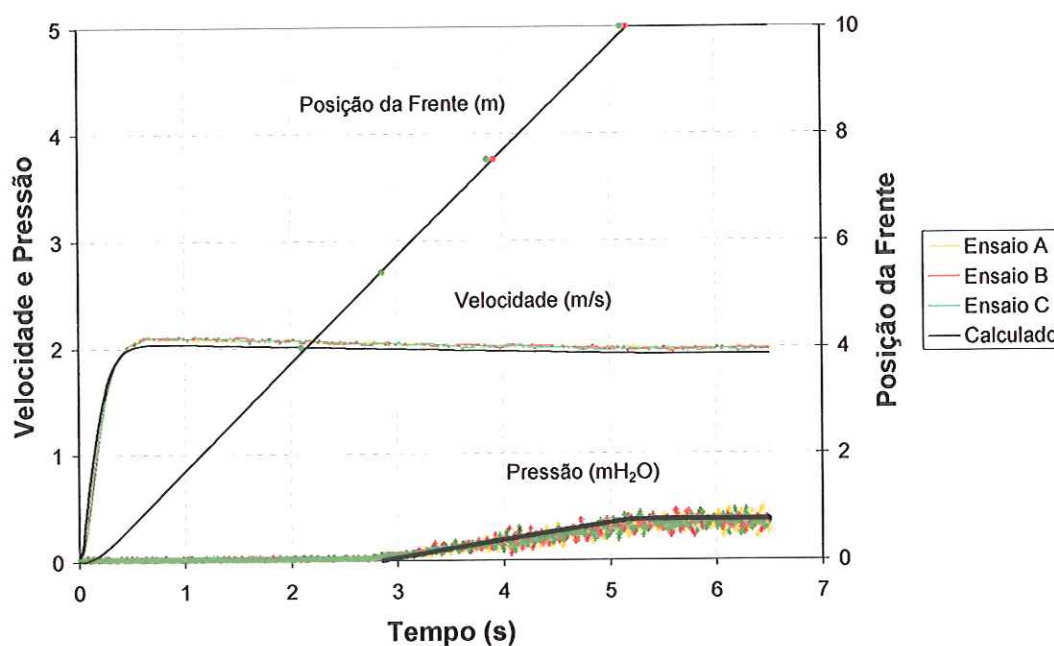


Figura 33 – Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 11 voltas)

Tabela 17– Parâmetros dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 11 voltas).

Carga hidráulica	$Z_R = 7,38 \text{ m}$
Coef. das perdas localizadas	$\Sigma K = 65,83$
Nº de voltas na válvula R1	11 voltas

Tabela 18– Resultados dos ensaios com tubo de 10 m (R1 = 11 voltas).

	Experimental*	Teórico	Diferença %
Tempo para enchimento do tubo:	5,14 s	5,18 s	-0,8%
Velocidade máxima:	2,11 m/s	2,04 m/s	-3,3%
Velocidade final:	1,97 m/s	1,95 m/s	1,0%
Pressão final:	0,39 mH ₂ O	0,34 mH ₂ O	12,8%

*Média dos valores obtidos nos 3 ensaios realizados.

Analisando-se todos os resultados desta bateria de ensaios, pode-se observar um bom ajuste entre o modelo e os dados experimentais.

Infelizmente, os dados de uma manobra com válvula R1 na posição 10 voltas foram perdidos, sendo o ajuste realizado com apenas duas manobras, mas sem prejuízo para a análise neste caso específico.

Com relação aos parâmetros determinados na bateria de ensaios sem o tubo de 10 m, optou-se por ajustar a perda localizada (K), com a válvula R1 totalmente aberta, para 1,50 e mantê-lo para os demais ensaios da bateria. Considerando o valor tabelado na literatura de 1,45, o ajuste realizado parece coerente.

6.4. Ensaio com Redução

Utilizando-se a configuração mostrada na Figura 34 realizou-se nova bateria de ensaios com a presença de uma redução de 44,5 mm para 35,0 mm na canalização.

6.4.1. Procedimentos e Resultados

Da mesma forma que os ensaios anteriores, a válvula de controle (R1) foi colocada em 6 posições diferentes de curso, sendo: 0 ou totalmente aberta, 7, 8, 9, 10 e 11 voltas. Para cada posição da válvula, com a canalização cheia de água até a válvula de manobra (Rm) foram realizados pelo menos três ensaios através da abertura rápida desta válvula de manobra. Entre cada um destes ensaios, o nível z_R do reservatório era recomposto.

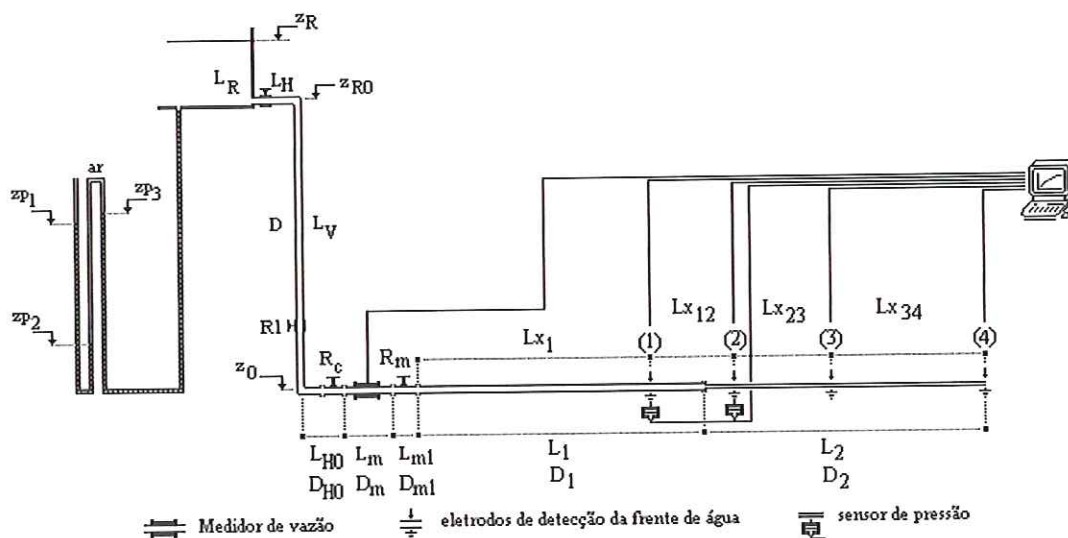


Figura 34 – Configuração do ensaio com redução na canalização

Tabela 19– Dimensões utilizadas na montagem apresentada na Figura 34

$L_H = 1,50 \text{ m}$	$L_2 = 5,00 \text{ m}$	$D = 53,5 \text{ mm}$
$L_V = 6,75 \text{ m}$	$L_{X1} = 4,00 \text{ m}$	$D_{H0} = 53,5 \text{ mm}$
$L_{H0} = 0,66 \text{ m}$	$L_{X12} = 1,41 \text{ m}$	$D_m = 50,0 \text{ mm}$
$L_m = 0,57 \text{ m}$	$L_{X23} = 2,11 \text{ m}$	$D_0 = 53,5 \text{ mm}$
$L_{m1} = 0,14 \text{ m}$	$L_{X34} = 2,48 \text{ m}$	$D_1 = 44,5 \text{ mm}$
$L_1 = 5,00 \text{ m}$	$Z_R = * \text{ m}$	$D_2 = 35,0 \text{ mm}$

* O valor exato de Z_R em cada conjunto de ensaios encontra-se na tabela abaixo.

Tabela 20 – Nível Z_R do reservatório utilizado nos ensaios

Nº de voltas em R1	0	7	8	9	10	11
$Z_R \text{ (m)}$	7,25	7,20	7,18	7,34	7,36	7,38

No caso do primeiro ensaio, com a válvula R1 totalmente aberta, foram realizadas 4 manobras, sendo aproveitados todos os dados. Para os demais ensaios, foram realizadas 3 manobras para cada posicionamento da válvula R1.

Para os ensaios desta bateria foi adotado o valor de 1,50 para o coeficiente das perdas localizadas a montante da válvula de manobra. A este valor foi acrescentado o valor da perda localizada imposta através do número de voltas aplicada ao registro de controle R1.

O valor adotado para a perda localizada na redução foi de 0,2 conforme tabela em função da relação entre os diâmetros apresentada por PORTO (1997).

O coeficiente de perda localizada em função do número de voltas no registro de controle R1 foi mantido conforme apresentado na Tabela 4, não sendo realizados outros ajustes para seu valor.

A seguir, da Figura 35 a Figura 46, são mostrados os gráficos de velocidade, posição e pressão referentes aos resultados dos ensaios com a válvula de controle (R1) em cada uma das posições citadas anteriormente.

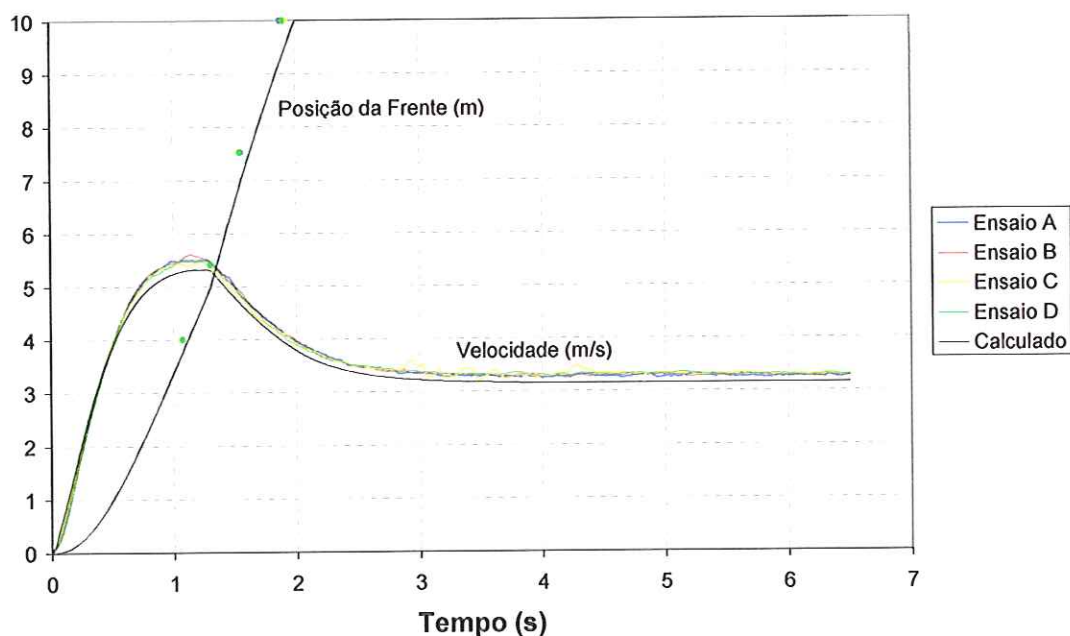


Figura 35 – Ensaio com redução: velocidade e posição (R1 = 0 voltas)

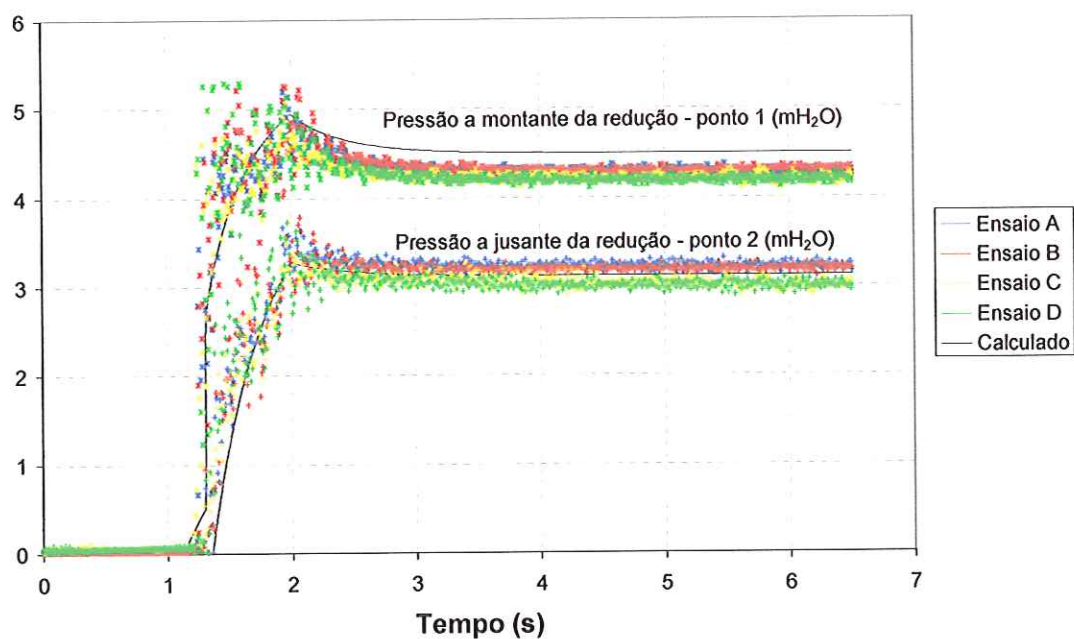


Figura 36 – Ensaio com redução: Pressões (R1 = 0 volts)

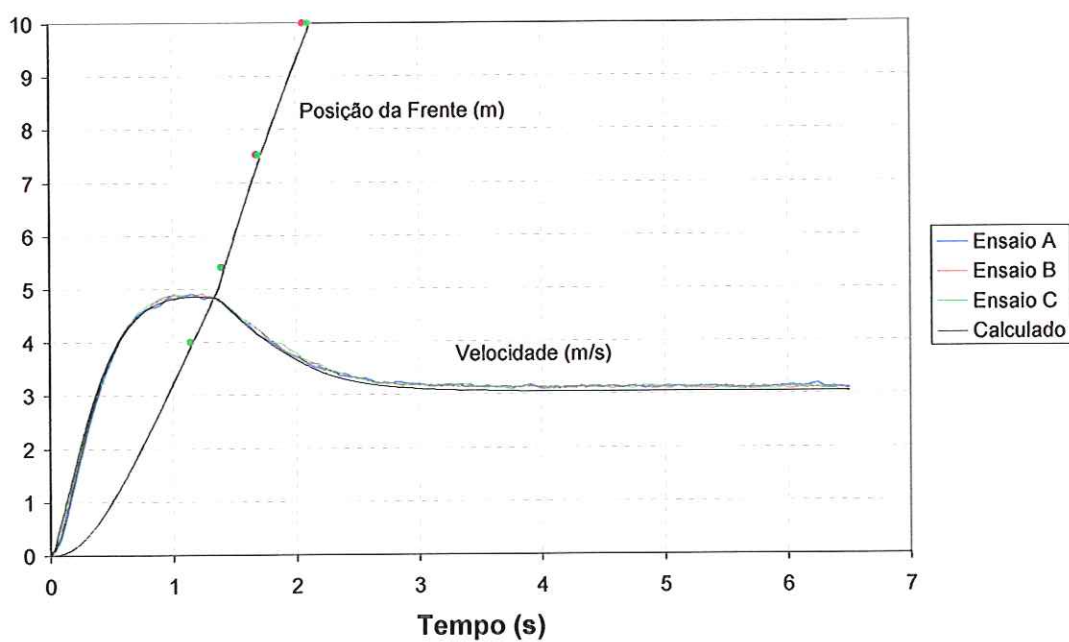


Figura 37 – Ensaio com redução: velocidade e posição (R1 = 7 volts)

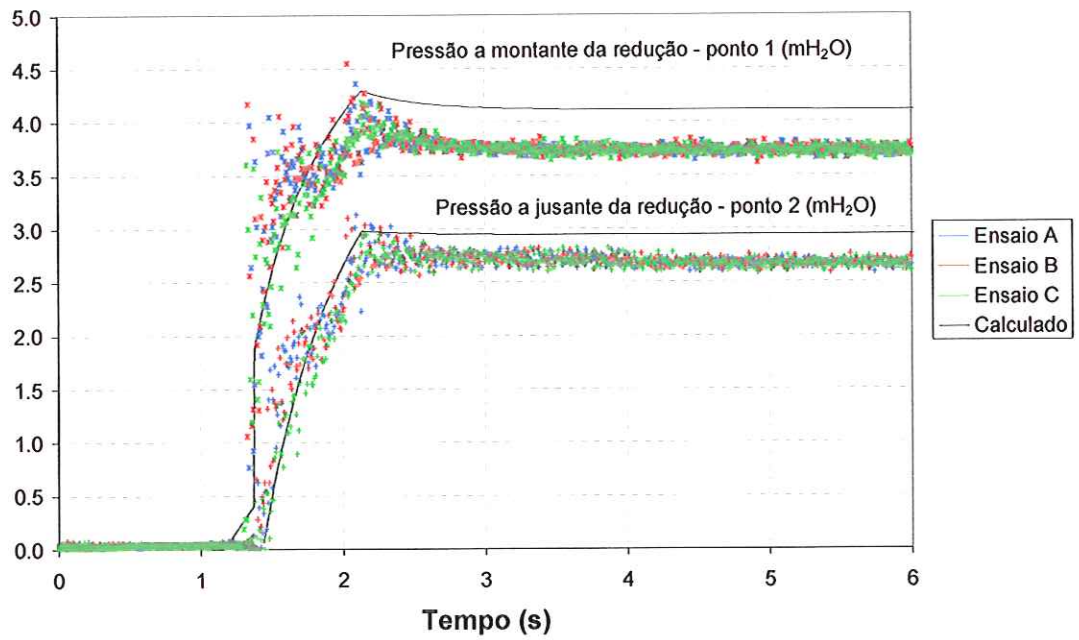


Figura 38 – Ensaio com redução: Pressões (R1 = 7 volts)

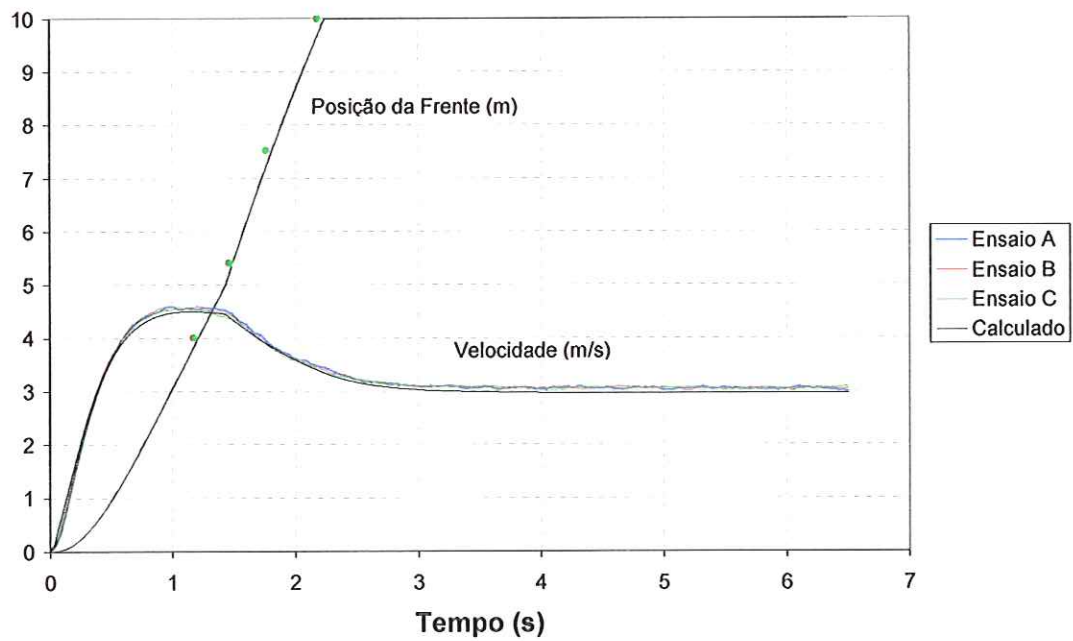


Figura 39 – Ensaio com redução: velocidade e posição (R1 = 8 volts)

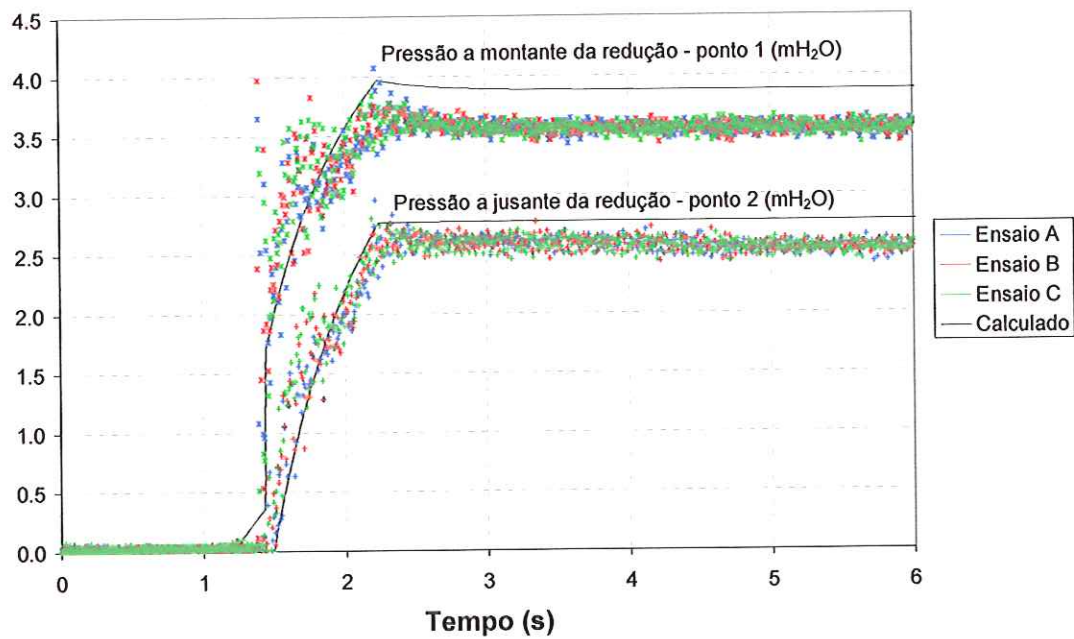


Figura 40 – Ensaio com redução: Pressões (R1 = 8 voltas)

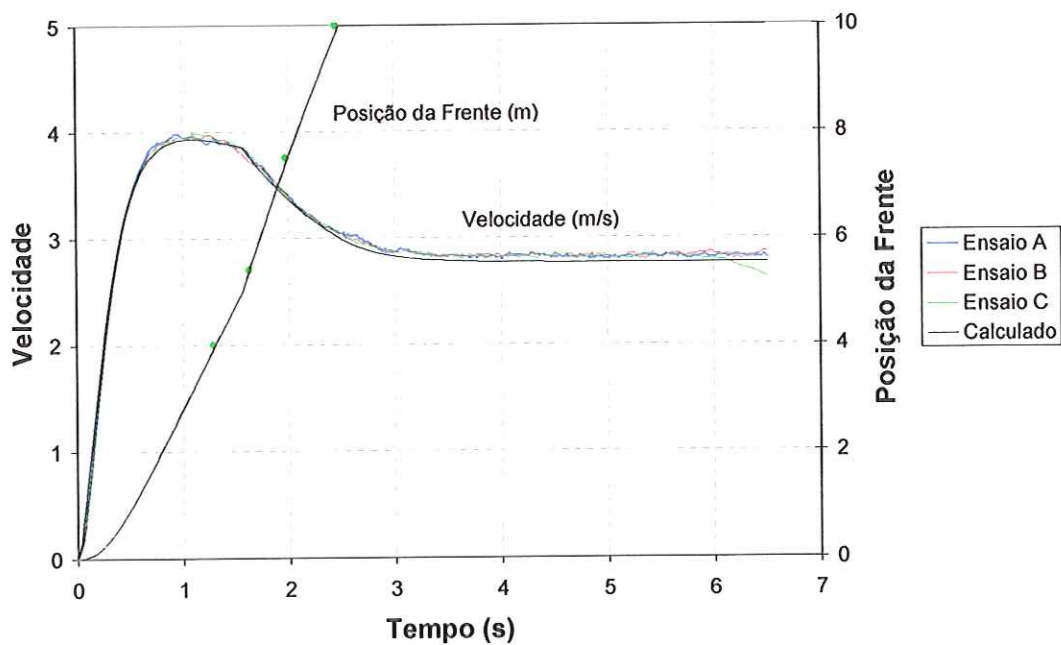


Figura 41 – Ensaio com redução: velocidade e posição (R1 = 9 voltas)

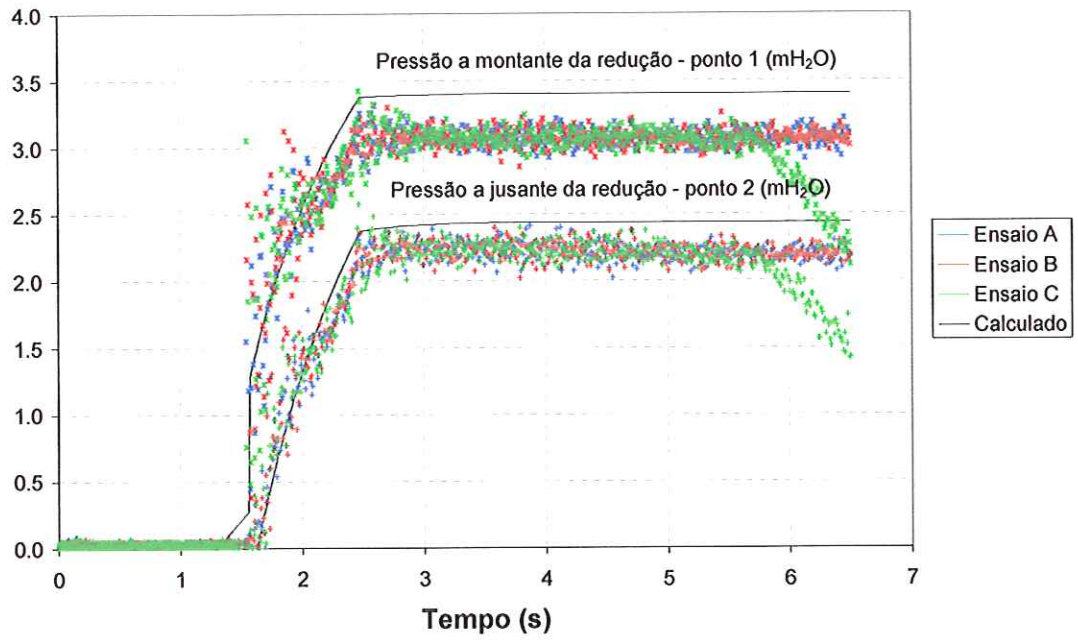


Figura 42 – Ensaio com redução: Pressões (R1 = 9 voltas)

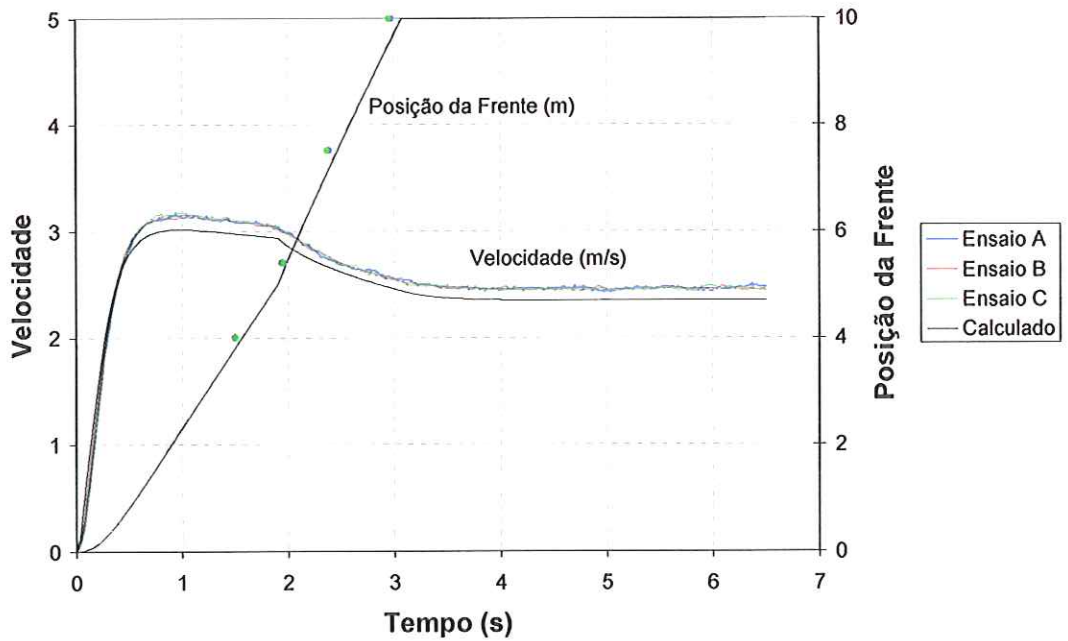


Figura 43 – Ensaio com redução: velocidade e posição (R1 = 10 voltas)

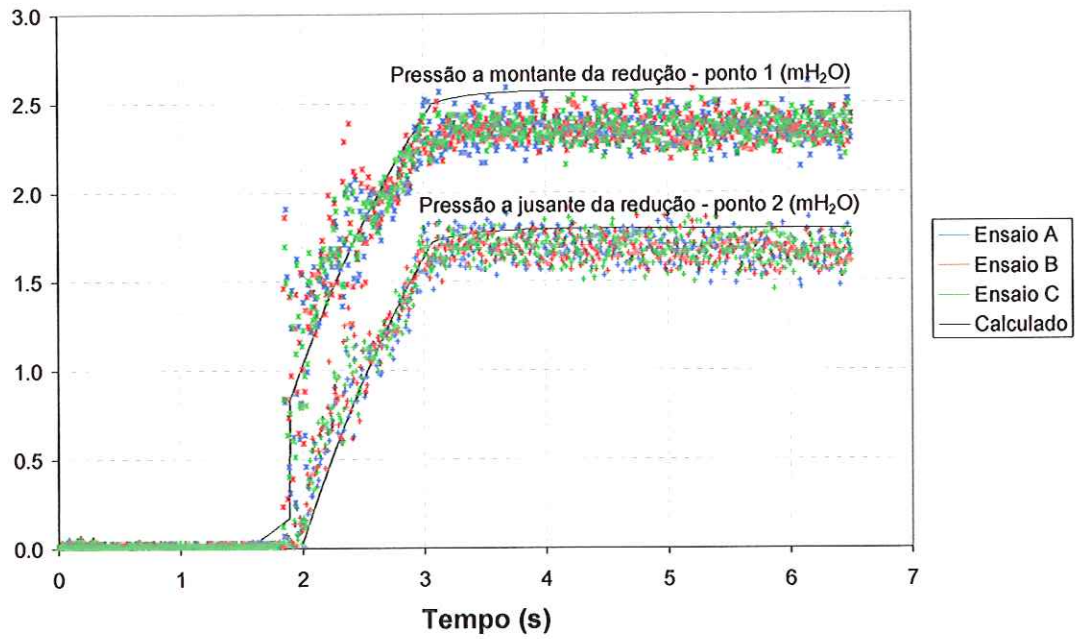


Figura 44 – Ensaio com redução: Pressões (R1 = 10 voltas)

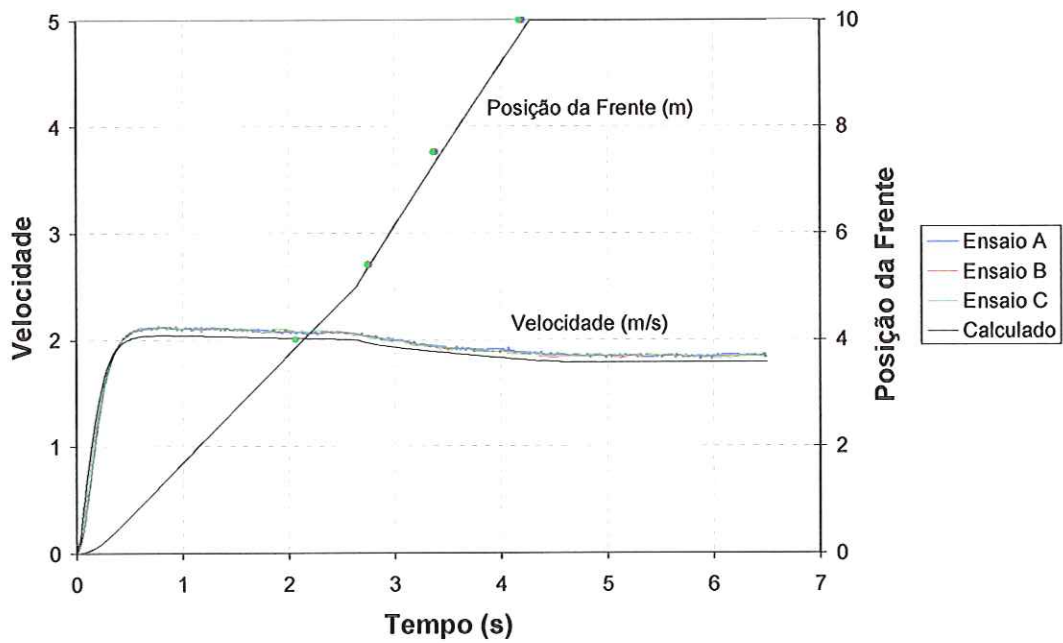


Figura 45 – Ensaio com redução: velocidade e posição (R1 = 11 voltas)

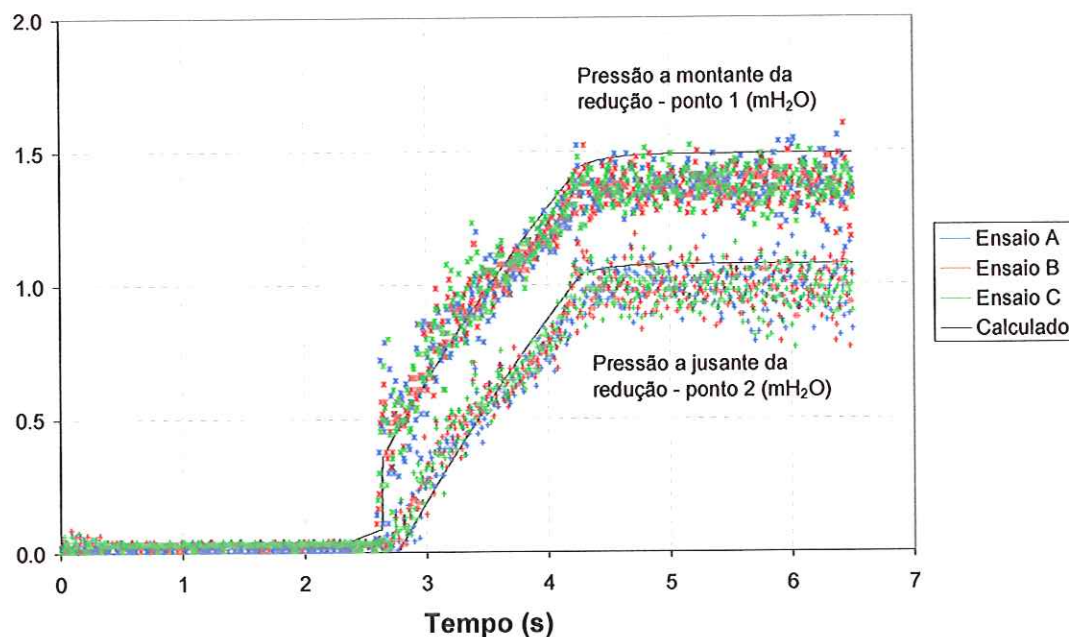


Figura 46 – Ensaio com redução: Pressões (R1 = 11 voltas)

Comparando-se os resultados experimentais com os numéricos, observa-se uma boa concordância entre os mesmos.

A velocidade calculada da coluna líquida, com referência no tubo a montante da redução, produziu para todas as baterias de ensaios valores um pouco inferiores aos valores experimentais. O inverso ocorreu em relação as pressões tomadas a montante e a jusante da redução. Neste caso as curvas calculadas através do modelo apresentaram valores de pressões superiores às observadas nos dados experimentais.

Não foi possível identificar a causa desta leve discrepância entre os dados numéricos e experimentais. Para isto, seria necessário aferir novamente os equipamentos e repetir os ensaios.

6.5. Ensaio com Cotovelo e Redução

Utilizando-se a configuração mostrada na Figura 47 realizou-se uma bateria de ensaios para avaliação do ajuste do modelo com a presença de um cotovelo seguido de redução de 44,5 mm para 35,0 mm na canalização.

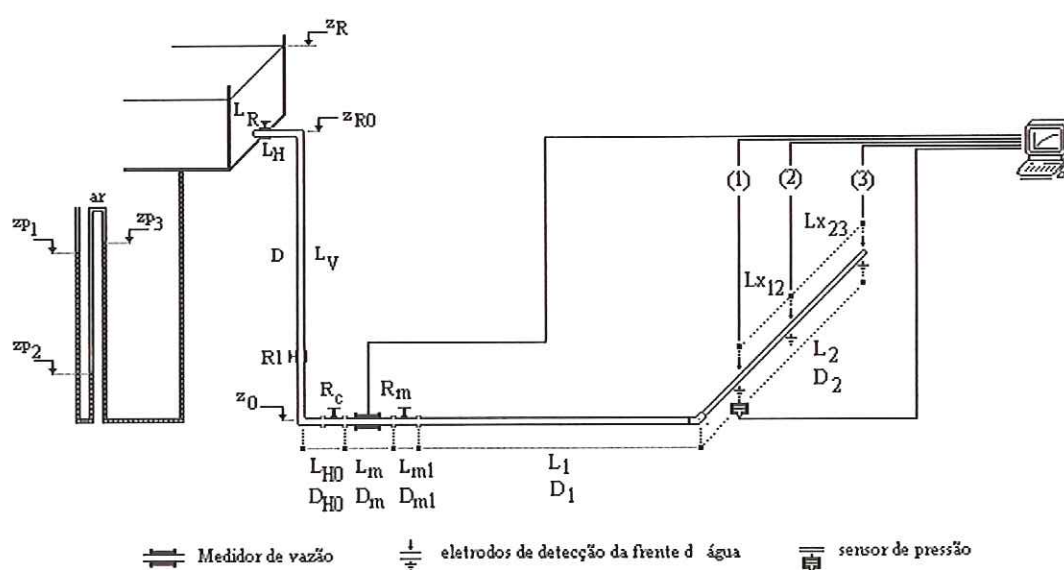


Figura 47 – Configuração do ensaio - cotovelo com redução

Tabela 21– Dimensões utilizadas na montagem apresentada na Figura 47

$L_H = 1,50 \text{ m}$	$L_1 = L_2 = 5,00 \text{ m}$	$D_{H0} = 53,5 \text{ mm}$
$L_V = 6,75 \text{ m}$	$L_{x12} = 2,11 \text{ m}$	$D_m = 50,0 \text{ mm}$
$L_{H0} = 0,66 \text{ m}$	$L_{x23} = 2,48 \text{ m}$	$D_0 = 53,5 \text{ mm}$
$L_m = 0,57 \text{ m}$	$z_R = 7,20 \text{ m}$	$D_1 = 44,5 \text{ mm}$
$L_{m1} = 0,14 \text{ m}$	$D = 53,5 \text{ mm}$	$D_2 = 35,0 \text{ mm}$

6.5.1. Procedimentos e Resultados

A bateria de ensaios com cotovelo e redução seguiu os mesmos procedimentos utilizados nos ensaios contendo somente a redução. Pelos resultados obtidos na configuração anterior, optou-se por colocar a válvula de controle (R1) em apenas 3 posições diferentes de curso, sendo: 0 ou totalmente aberta, 7 e 9 voltas.

O valor do coeficiente da perda localizada no cotovelo com redução de 44,5 mm para 35,0 mm utilizado para ajuste do modelo foi de 0,8.

Os dados de uma das três manobras com válvula R1 na posição 0 voltas foram perdidos, sendo o ajuste realizado com apenas duas manobras, mas sem prejuízo para a análise neste caso específico.

Outro fato a ser destacado nesta bateria de ensaios foi a verificação de uma oscilação expressiva da pressão antes da chegada da coluna líquida. A hipótese mais provável para explicar este fato foi a vibração da tubulação, fazendo com que o transdutor de pressão, que não havia sido preso, se chocasse com o chão.

A seguir, da Figura 48 a Figura 54, são mostrados os resultados destes ensaios com o respectivo ajuste do modelo.

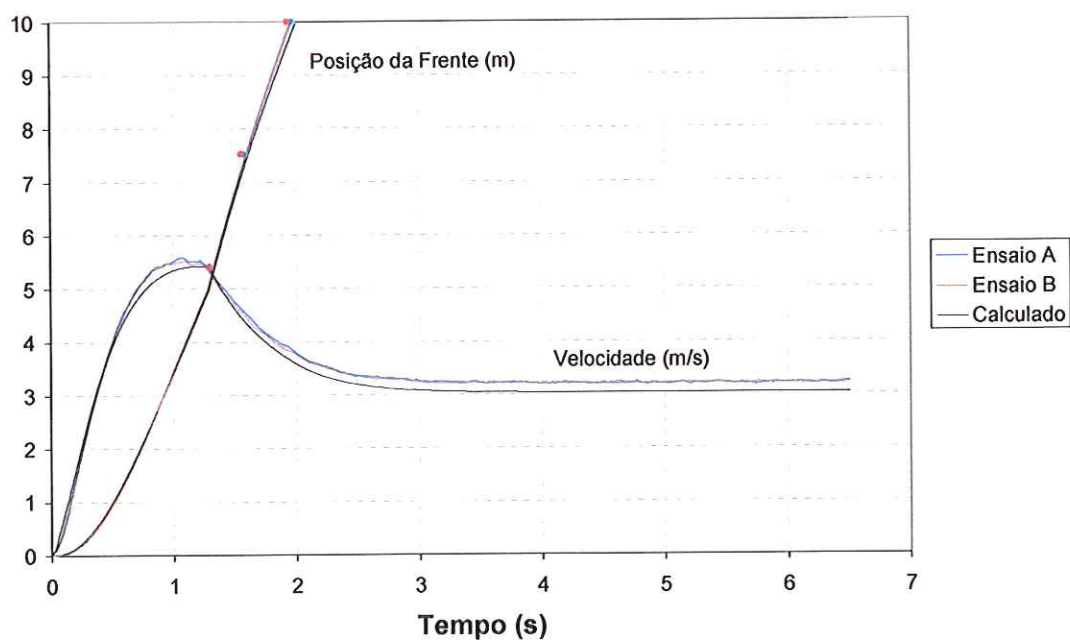


Figura 48 – Ensaio com cotovelo e redução: V e S (R1 = 0 volts)

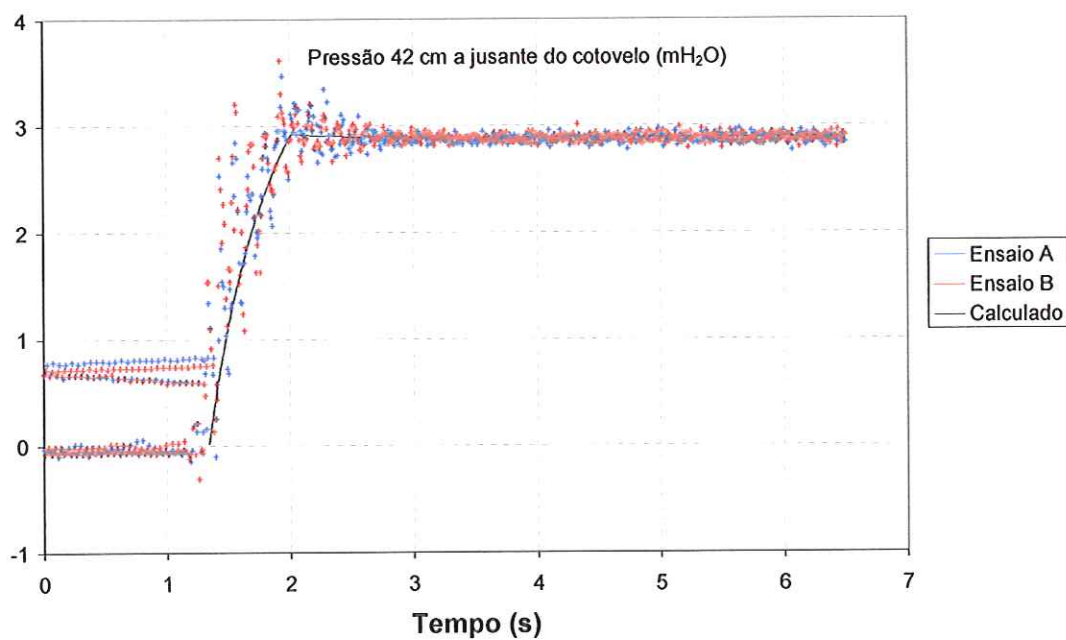


Figura 49 – Ensaio com cotovelo e redução: Pressões (R1 = 0 volts)

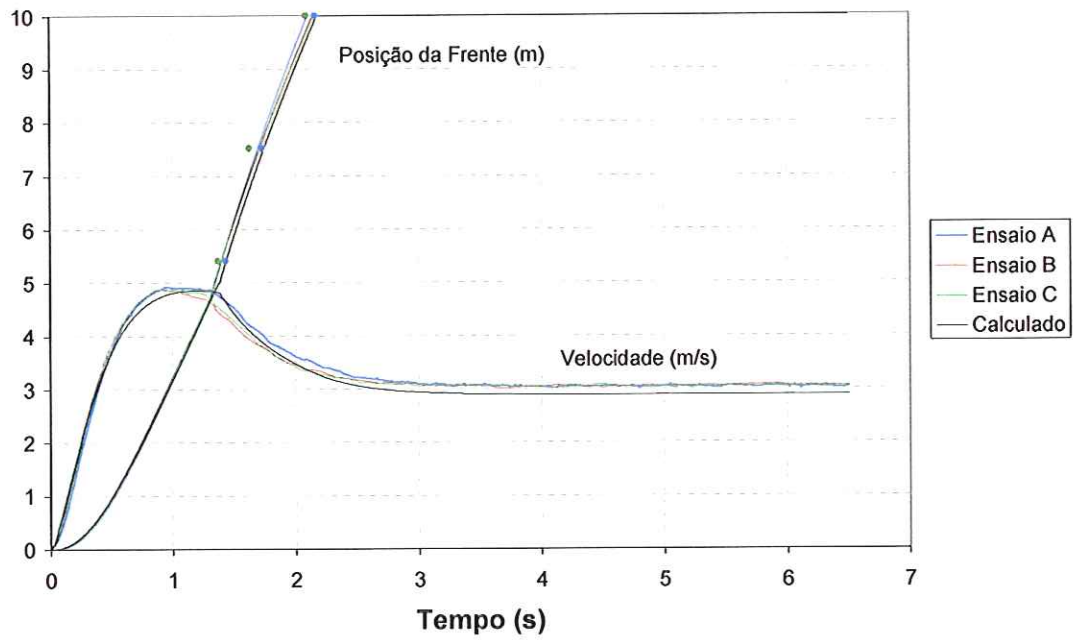


Figura 50 – Ensaio com cotovelo e redução: V e S (R1 = 7 volts)

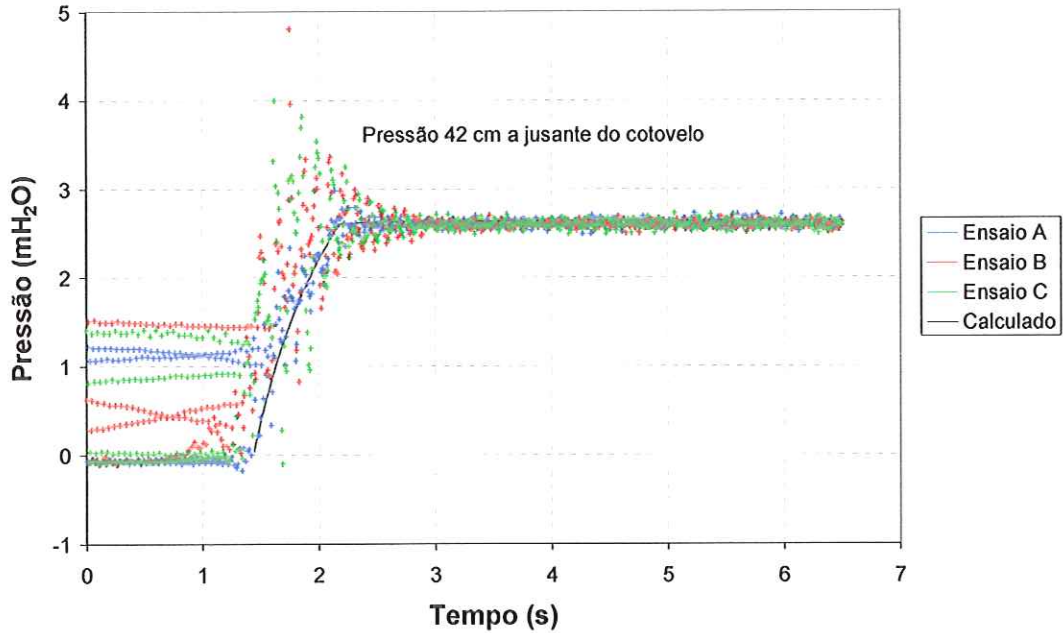


Figura 51 – Ensaio com cotovelo e redução: Pressões (R1 = 7 volts)

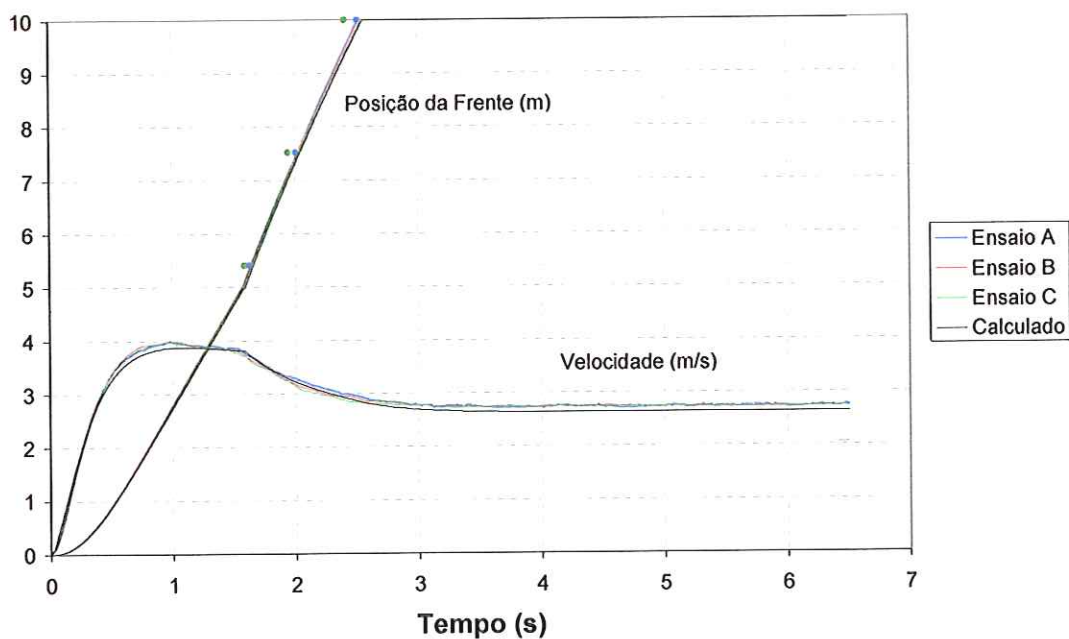


Figura 52 – Ensaio com cotovelo e redução: V e S (R1 = 9 volts)

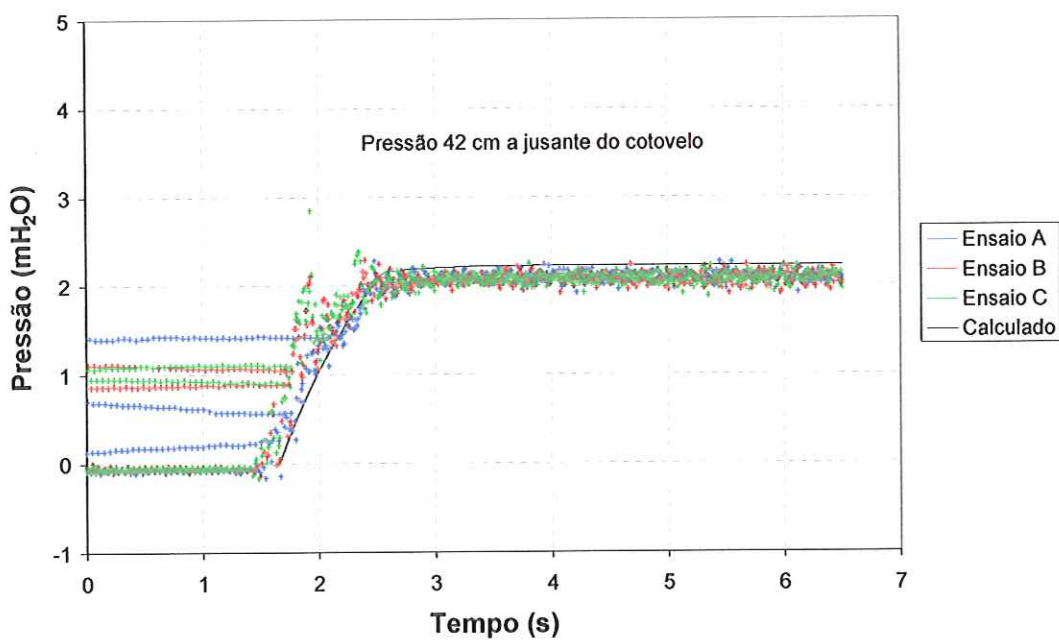


Figura 53 – Ensaio com cotovelo e redução: Pressões (R1 = 9 volts)

Esta bateria de ensaios também apresentou uma boa concordância entre os resultados experimentais e os obtidos através do modelo.

As diferenças verificadas entre as velocidades calculadas da coluna líquida em cada ensaio, com referência no tubo a montante da redução, e as obtidas experimentalmente foram bastante próximas. Para uma melhor comparação entre a posição da frente calculada e experimental, passou-se a fazer a integral numérica da velocidade experimental para todos os ensaios, com boa concordância em relação aos sensores de passagem.

Com relação a pressão, não foi identificada a razão exata para a oscilação da pressão após o cotovelo mesmo antes da chegada da coluna líquida. Este fato foi verificado em todos os ensaios da bateria. A Figura 54 destaca esta oscilação através da união, no gráfico, das pressões obtidas do transdutor de pressão no caso do primeiro ensaio.

A oscilação após a passagem da frente pelo cotovelo com redução de diâmetro pode ser explicada pela geração de uma onda devido ao choque que ocorre quando a coluna líquida atinge o cotovelo.

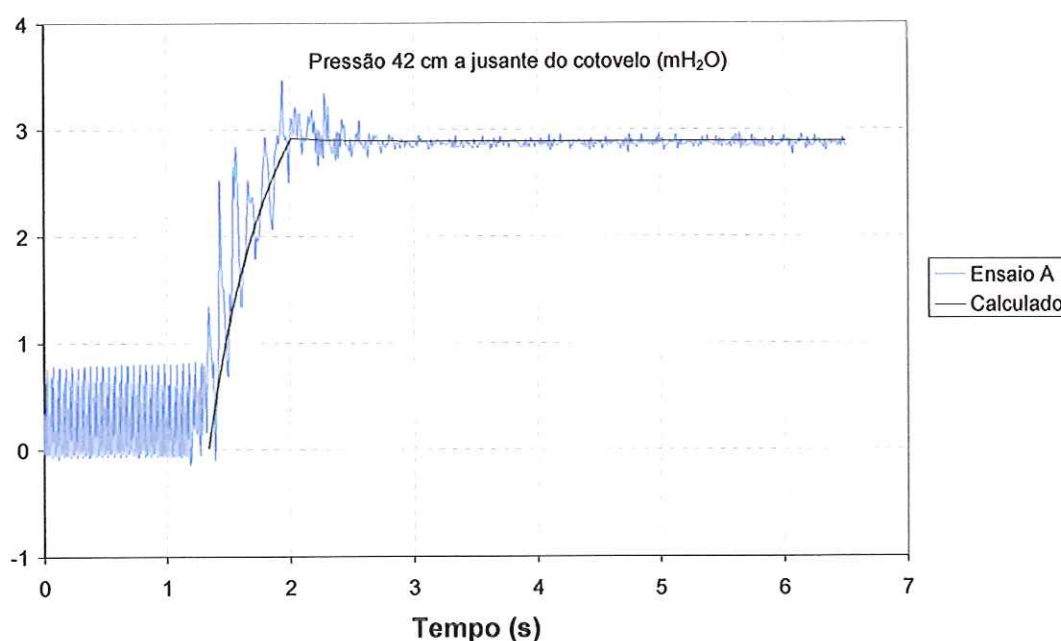


Figura 54 – Pressões interligadas (ensaio com cotovelo: R1 = 0 voltas)

6.6. Ensaio com conexão em “T” passagem direta e lateral

Utilizando-se a configuração mostrada na Figura 55 realizou-se uma bateria de ensaios para avaliação do ajuste do modelo no caso de uma ramificação, situação em que as condições de contorno ainda não foram estabelecidas. Isto foi realizado colocando-se um T com passagem direta e passagem lateral.

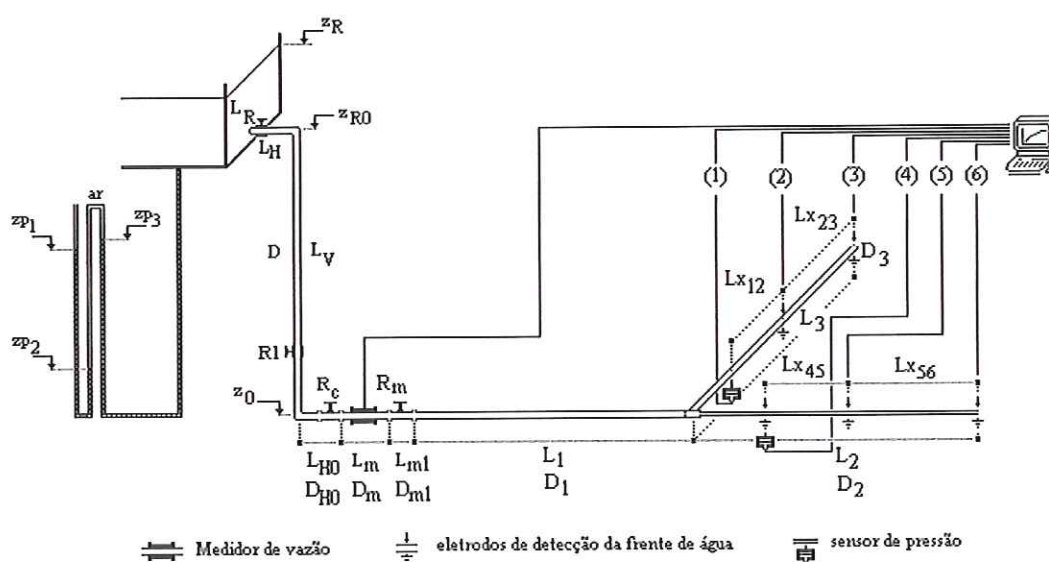


Figura 55 – Configuração do ensaio com T passagem direta

Tabela 22– Dimensões utilizadas na montagem apresentada na Figura 55

$L_H = 1,50 \text{ m}$	$L_2 = 5,00 \text{ m}$	$D_{H0} = 53,5 \text{ mm}$
$L_V = 6,75 \text{ m}$	$L_3 = 5,00 \text{ m}$	$D_m = 50,0 \text{ mm}$
$L_{H0} = 0,66 \text{ m}$	$L_{X12} = L_{X45} = 2,09 \text{ m}$	$D_0 = 53,5 \text{ mm}$
$L_m = 0,57 \text{ m}$	$L_{X23} = L_{X56} = 2,50 \text{ m}$	$D_1 = 44,5 \text{ mm}$
$L_{m1} = 0,14 \text{ m}$	$z_R = 7,41 \text{ m}$	$D_2 = 35,0 \text{ mm}$
$L_1 = 5,00 \text{ m}$	$D = 53,5 \text{ mm}$	$D_3 = 44,5 \text{ mm}$

6.6.1. Procedimentos e Resultados

A válvula de controle (R1) foi colocada em 2 posições diferentes de curso, sendo: 0 ou totalmente aberta e com 7 voltas, ou seja, parcialmente fechada. Os procedimentos para a realização de cada ensaio foram os mesmos já descritos anteriormente.

O coeficiente de perda de carga localizada na passagem direta com redução foi adotado igual a 1,1. No caso da passagem lateral, o coeficiente foi adotado igual a 2,9. Os valores dos comprimentos fictícios de aceleração, necessários para a solução do modelo, foram adotados iguais a 1 m, tanto na passagem direta quanto na passagem lateral.

O ajuste do modelo só foi adequado adotando as seguintes condições de contorno em relação às velocidades iniciais quando a frente atinge o T:

a) velocidade de entrada na passagem direta com redução de 44, para 35,0 mm:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

b) velocidade de entrada na passagem lateral do T:

$$V_3 = 0$$

A seguir, da Figura 56 a Figura 61, são mostrados os resultados dos ensaios com a válvula de controle (R1) nas posições estabelecidas.

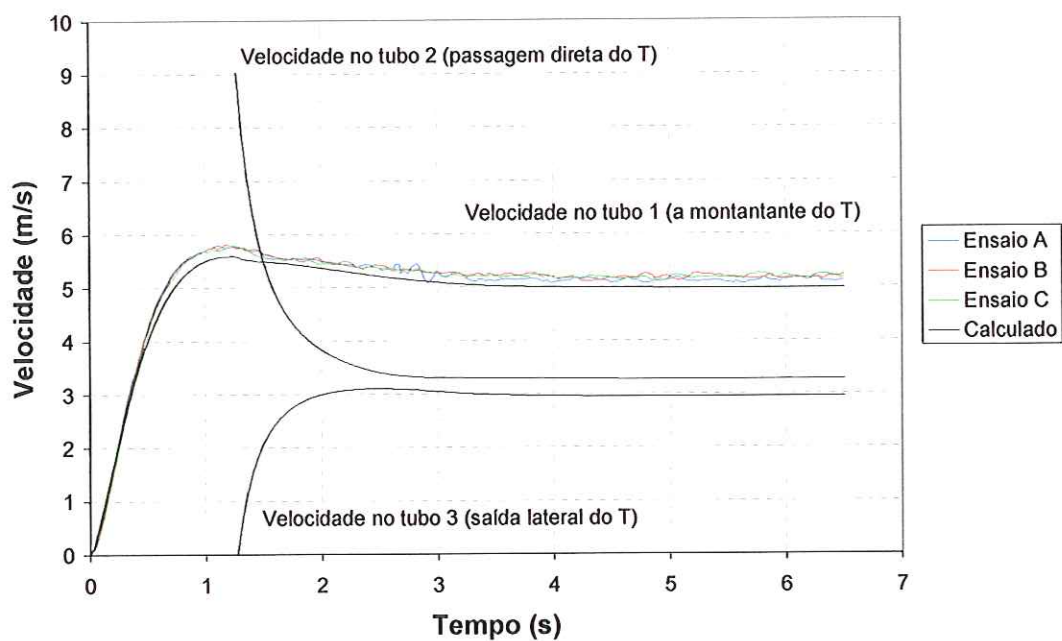


Figura 56 – Ensaio com T direto: velocidade ($R1 = 0$ voltas)

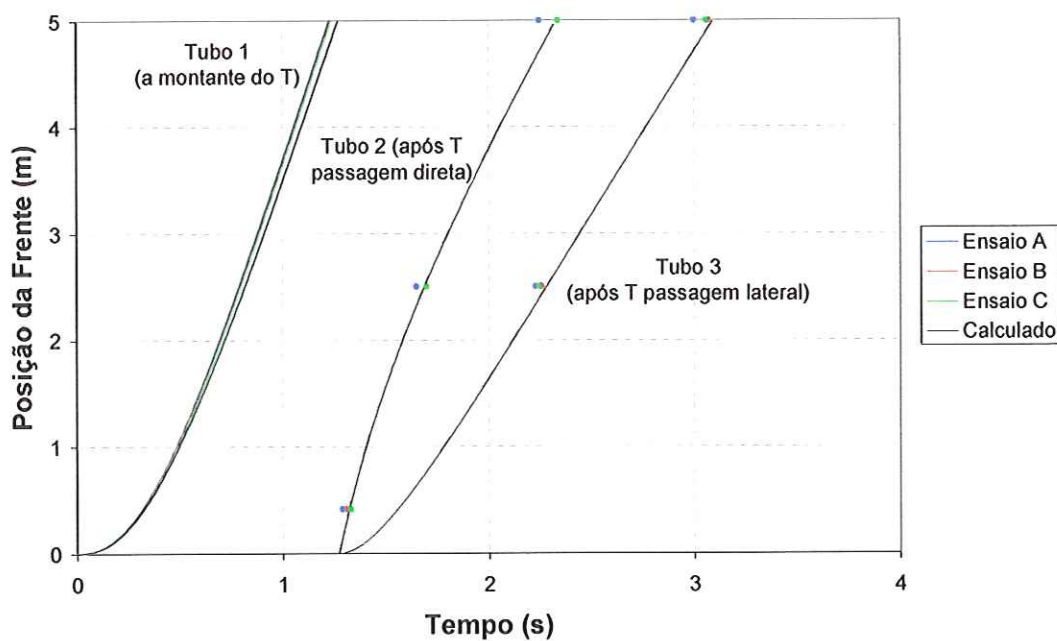


Figura 57 – Ensaio com T direto: posição ($R1 = 0$ voltas)

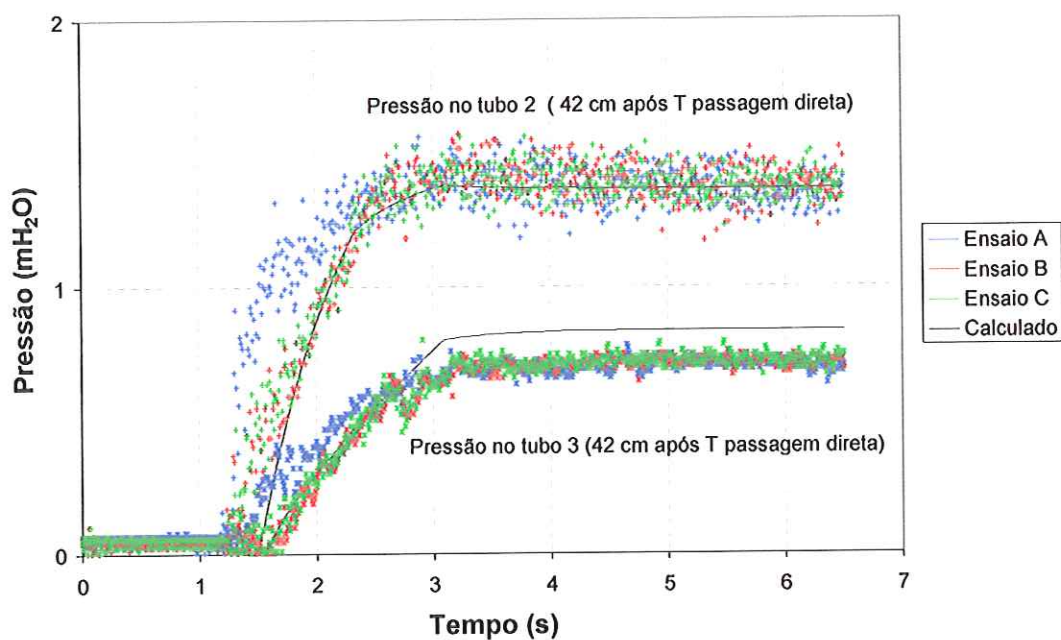


Figura 58 – Ensaio com T direto: Pressões (R1 = 0 volts).

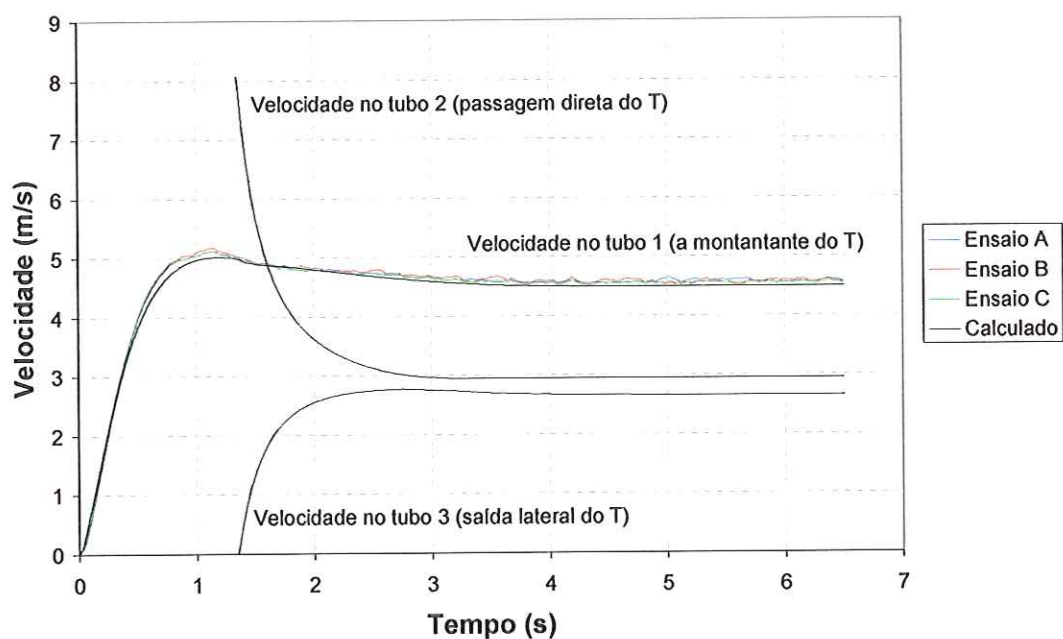


Figura 59 – Ensaio com T direto: velocidade (R1 = 7 volts).

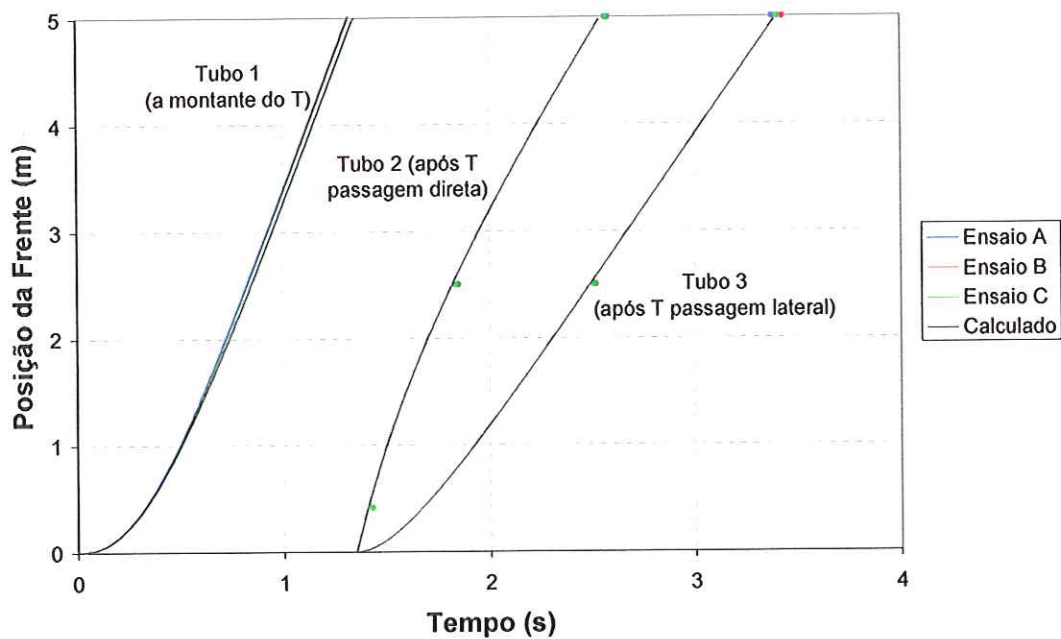


Figura 60 – Ensaio com T direto: posição (R1 = 7 voltas).

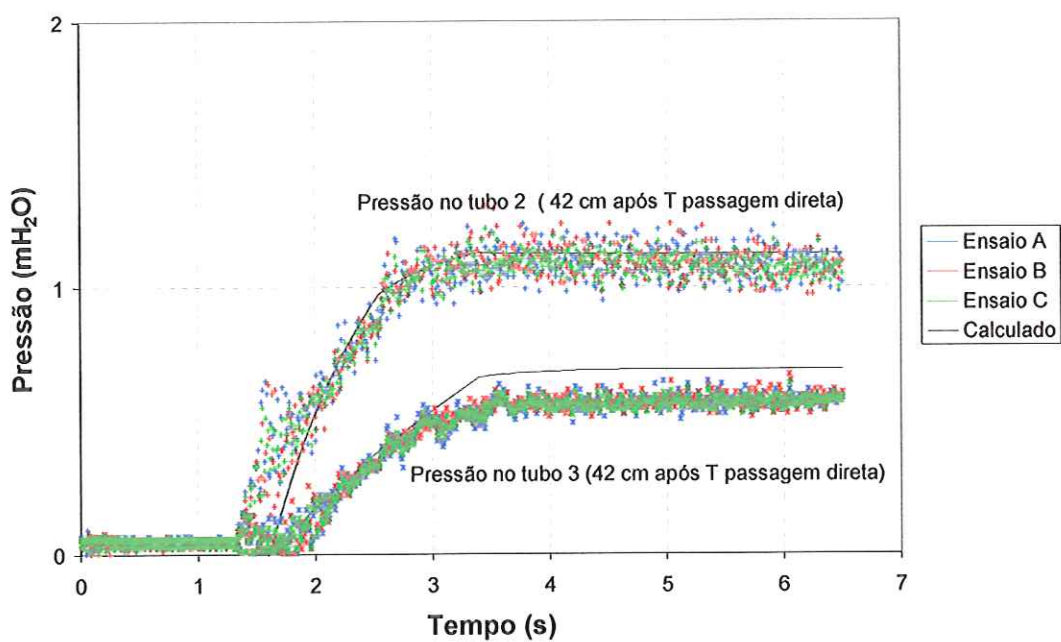


Figura 61 – Ensaio com T direto: Pressões (R1 = 7 voltas)

6.7. Ensaio com conexão em “T” passagem bilateral

Utilizando-se a configuração mostrada na Figura 62 realizou-se uma bateria de ensaios para avaliação do ajuste do modelo utilizando-se um “T” com passagem bilateral.

Foram adotados os mesmos procedimentos realizados nos ensaios anteriores. A válvula de controle (R1) foi colocada em 3 posições diferentes de curso, sendo: 0 ou totalmente aberta, 7, 8 e 9 voltas.

O coeficiente de perda de carga localizada na passagem lateral foi adotado igual a 2,9. Os valores dos comprimentos fictícios para a consideração da aceleração, necessários para a solução do modelo, foram adotados iguais a 0,8 m

Para o ajuste do modelo foi necessário adotar as seguintes condições de contorno em relação às velocidades iniciais quando a frente atinge o T:

a) velocidade inicial na passagem lateral direita do T com redução de 44,0 mm para 35,0 mm:

$$V_2 = 0,5 \cdot V_1 \cdot \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

b) velocidade inicial na passagem lateral esquerda:

$$V_3 = 0,5 \cdot V_1 \cdot \left(\frac{D_1}{D_3} \right)^2$$

Tabela 23– Dimensões utilizadas na montagem apresentada na Figura 62

$L_H = 1,50$ m	$L_2 = 3,00$ m	$D_{H0} = 53,5$ mm
$L_V = 6,75$ m	$L_{X12} = L_{X45} = 2,09$ m	$D_m = 50,0$ mm
$L_{H0} = 0,66$ m	$L_{X23} = 2,50$ m	$D_0 = 53,5$ mm
$L_m = 0,57$ m	$L_{X56} = 0,50$ m	$D_1 = 44,5$ mm
$L_{m1} = 0,14$ m	$z_R = 7,41$ m	$D_2 = 35,0$ mm
$L_1 = L_3 = 5,00$ m	$D = 53,5$ mm	$D_3 = 44,5$ mm

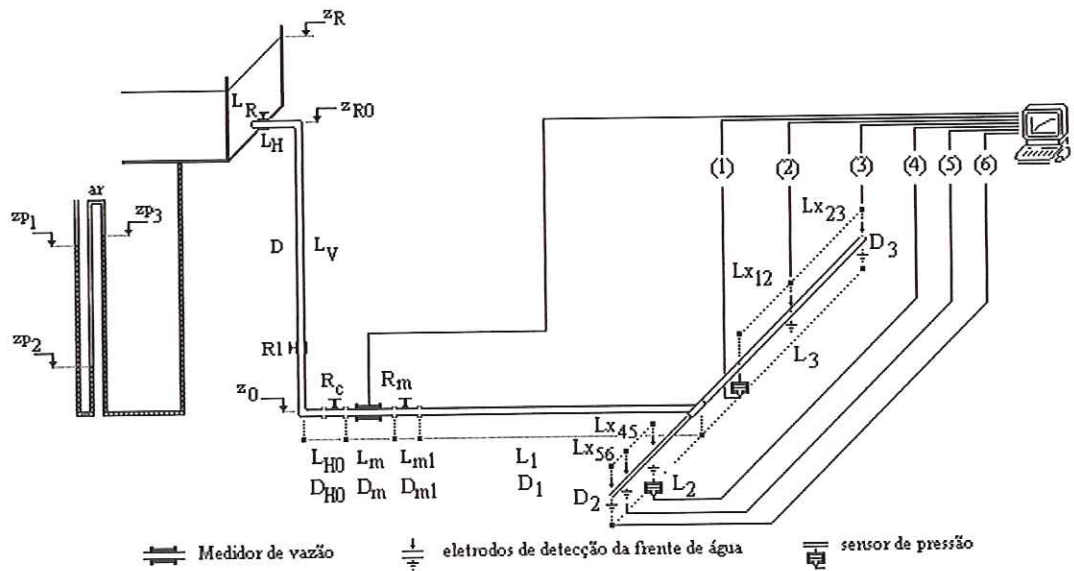


Figura 62 – Configuração do ensaio com T passagem bilateral

A seguir, da Figura 63 a Figura 78, são mostrados os resultados dos ensaios com a válvula de controle (R1) nas posições estabelecidas.

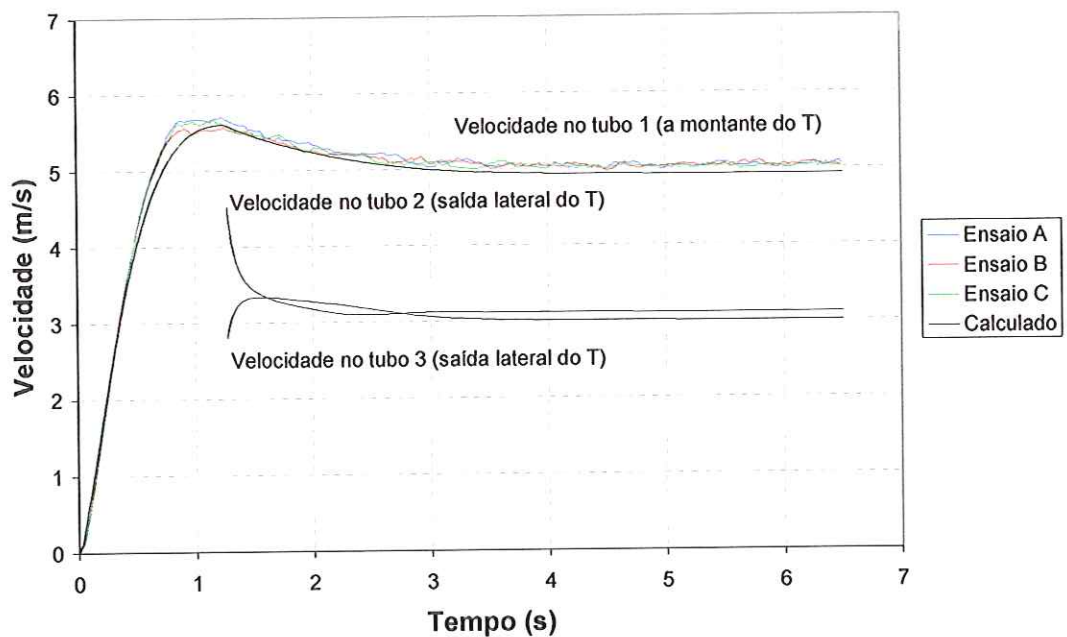


Figura 63 – Ensaio com T bilateral: velocidade (R1 = 0 volts)

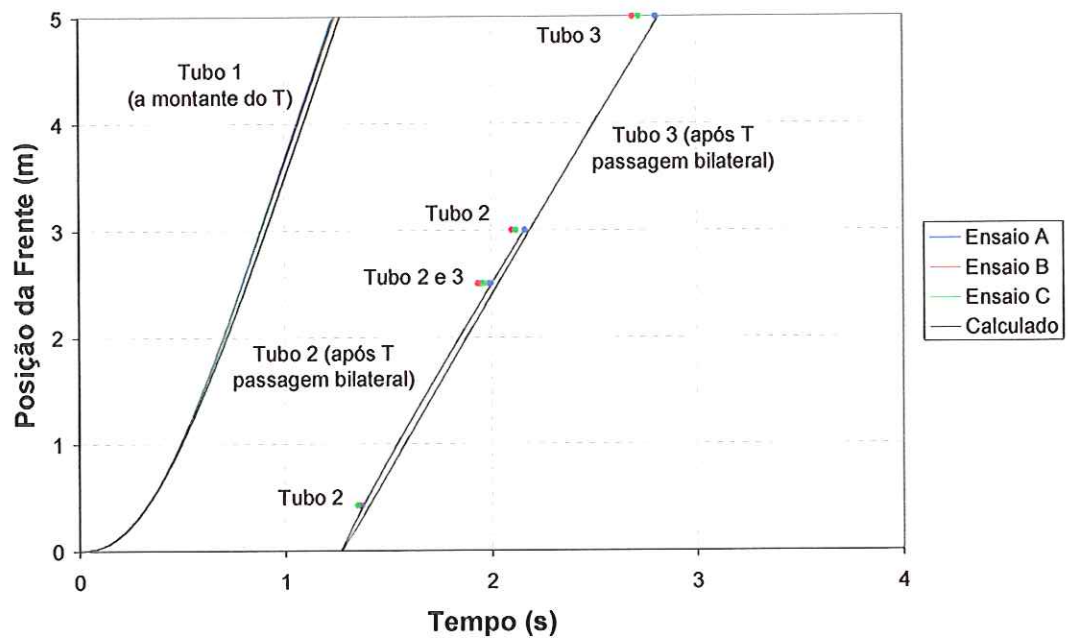


Figura 64 – Ensaio com T bilateral: posição (R1 = 0 voltas)

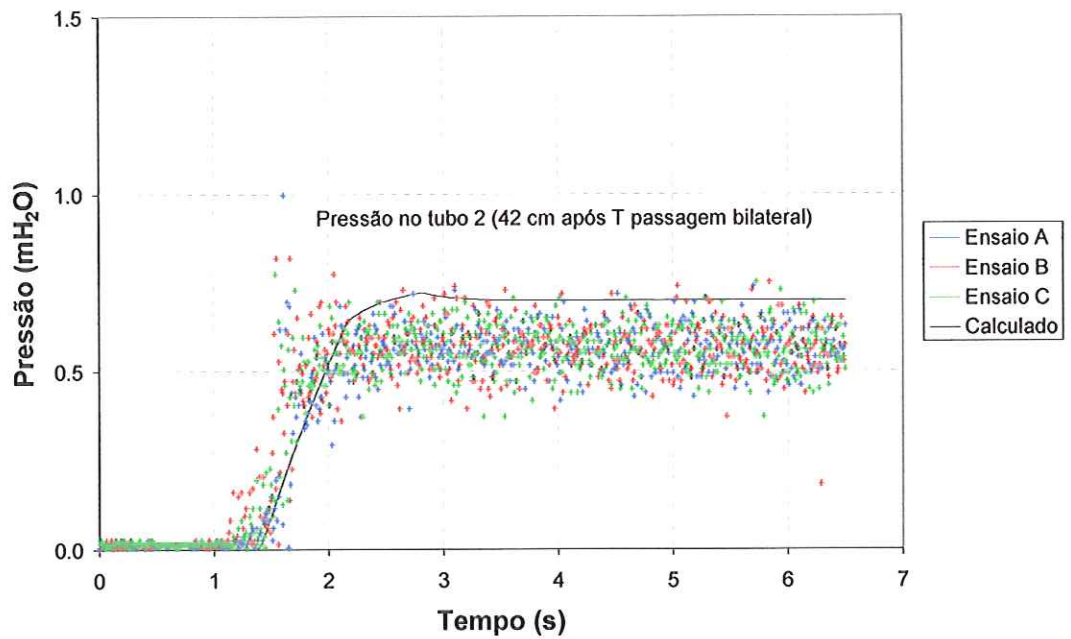


Figura 65 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 2 (R1 = 0 voltas)

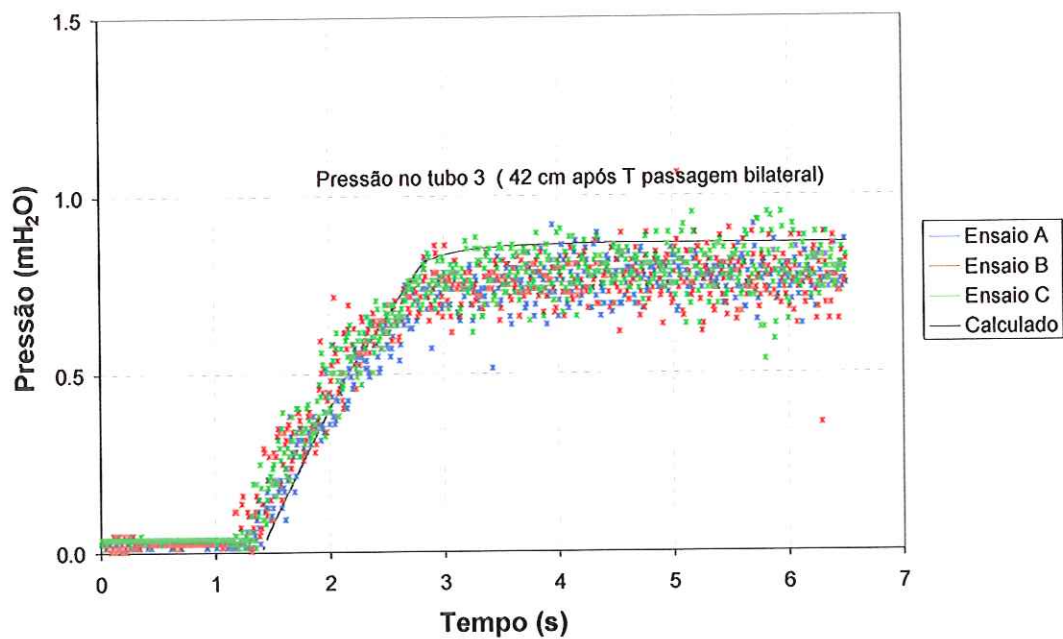


Figura 66 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 3 (R1 = 0 voltas)

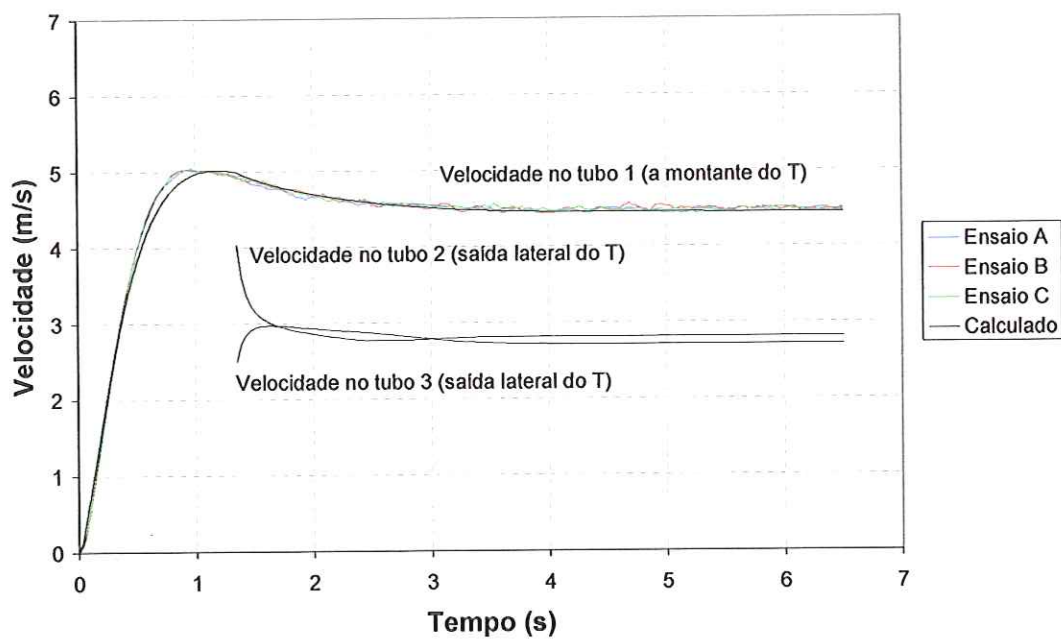


Figura 67 – Ensaio com T bilateral: velocidade (R1 = 7 voltas)

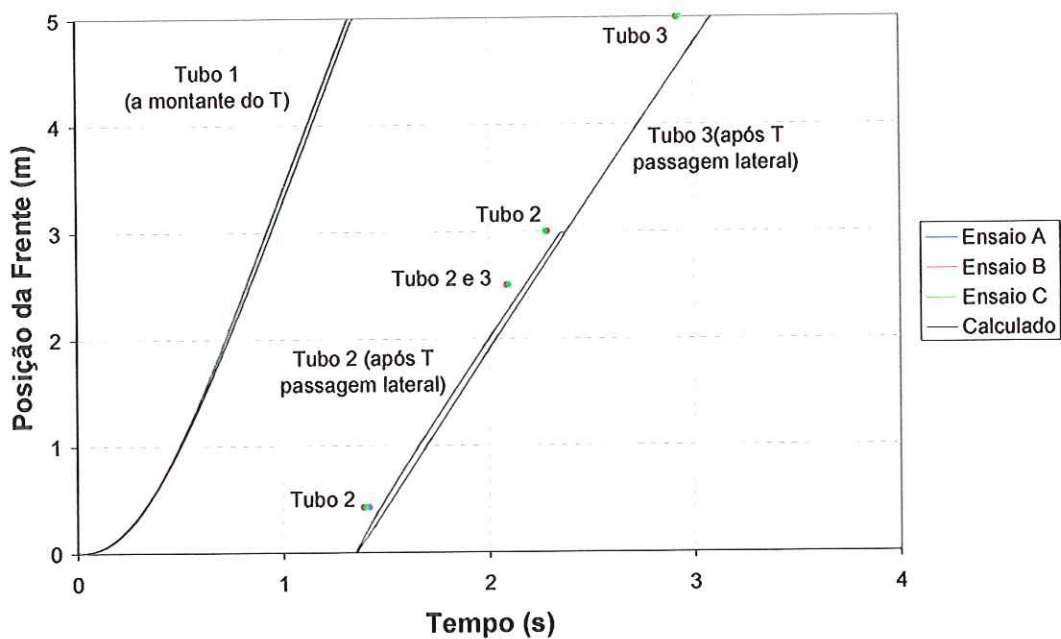


Figura 68 – Ensaio com T bilateral: posição (R1 = 7 voltas)

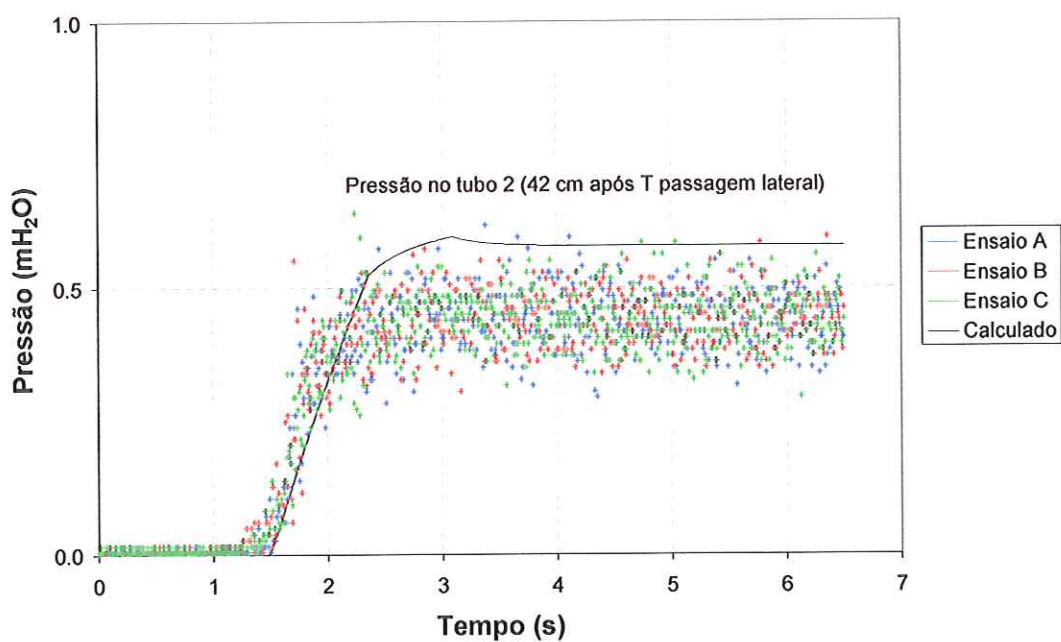


Figura 69 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 2 (R1 = 7 voltas)

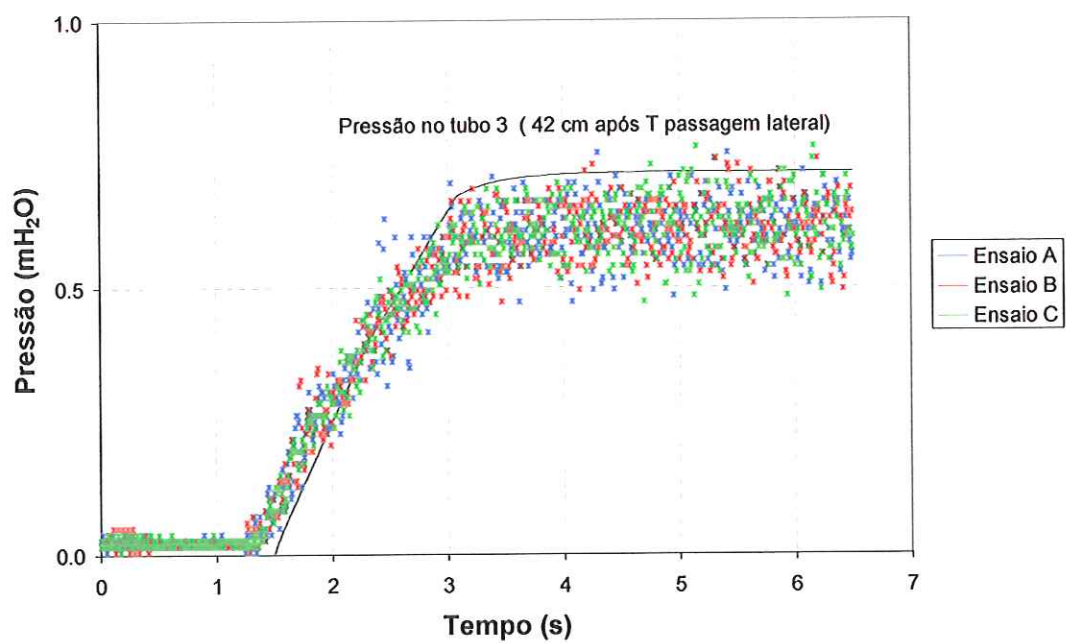


Figura 70 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 3 (R1 = 7 volts)

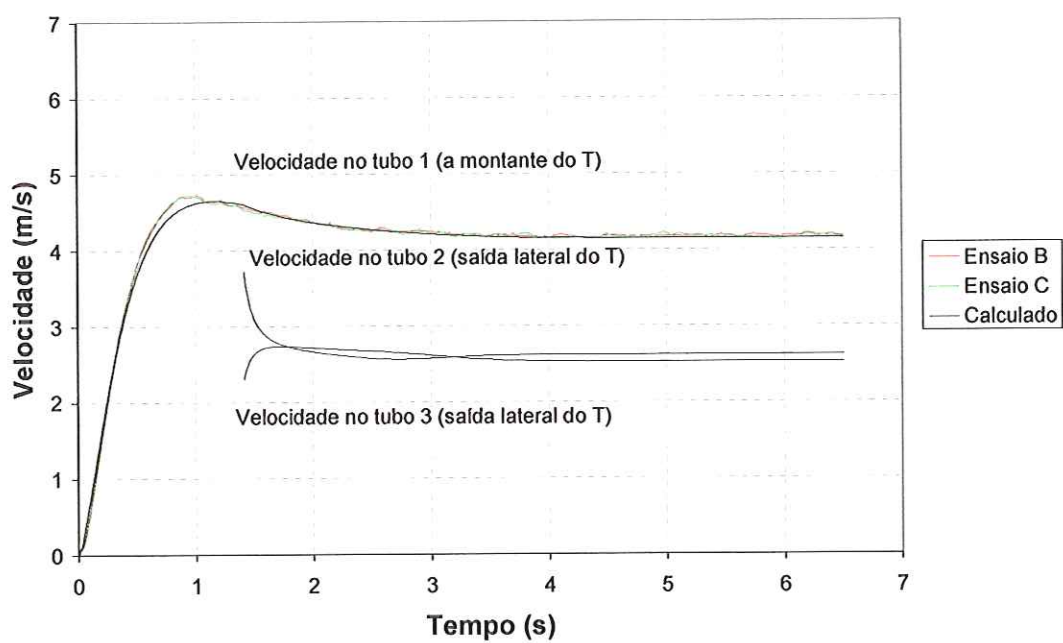


Figura 71 – Ensaio com T bilateral: velocidade (R1 = 8 volts)

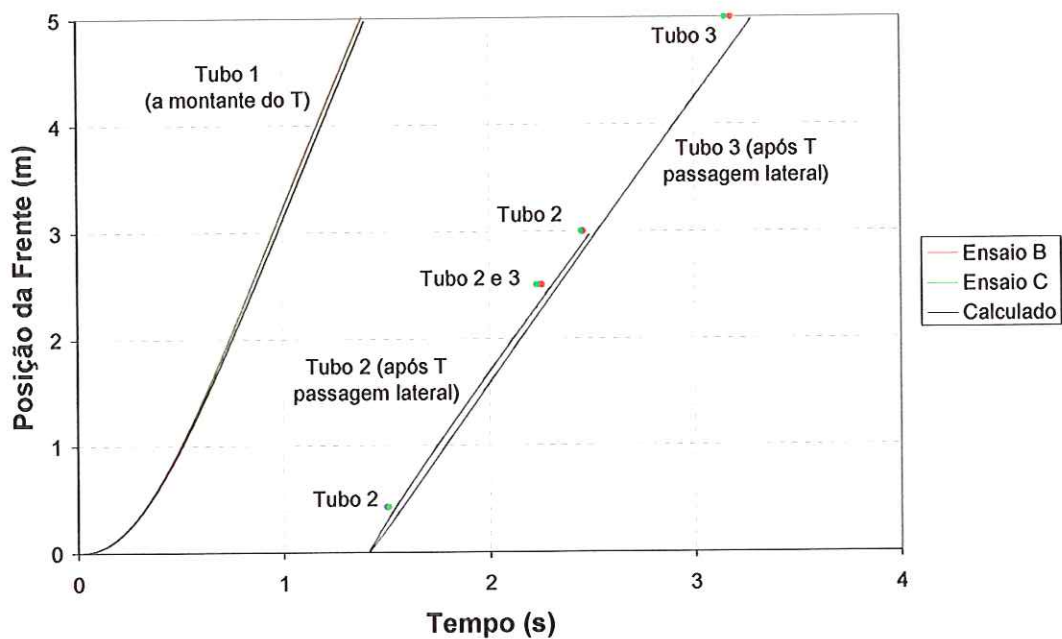


Figura 72 – Ensaio com T bilateral: posição (R1 = 8 voltas)

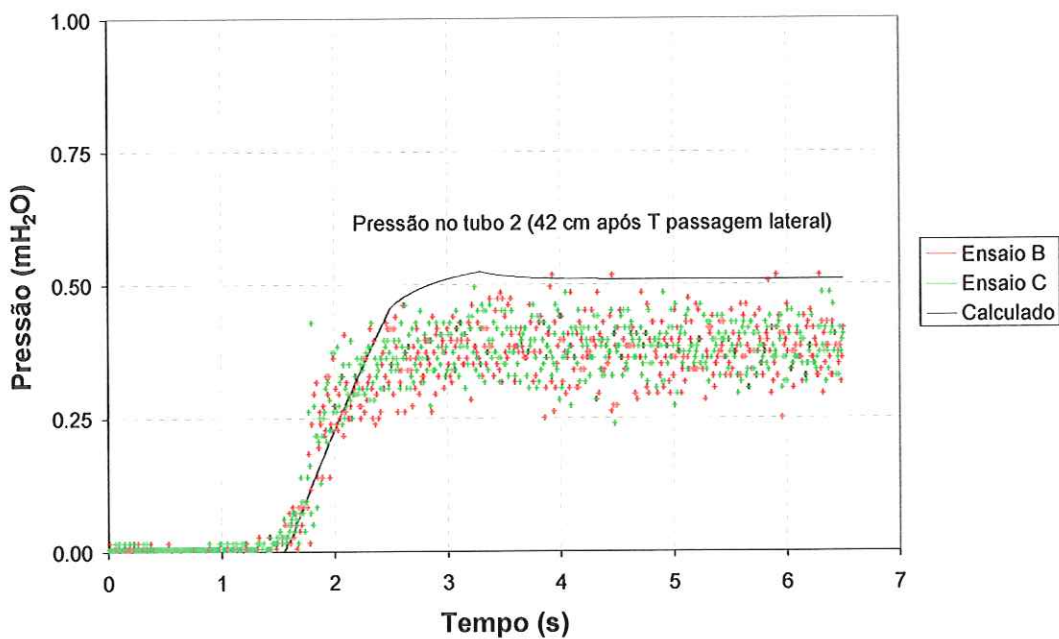


Figura 73 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 2 (R1 = 8 voltas)

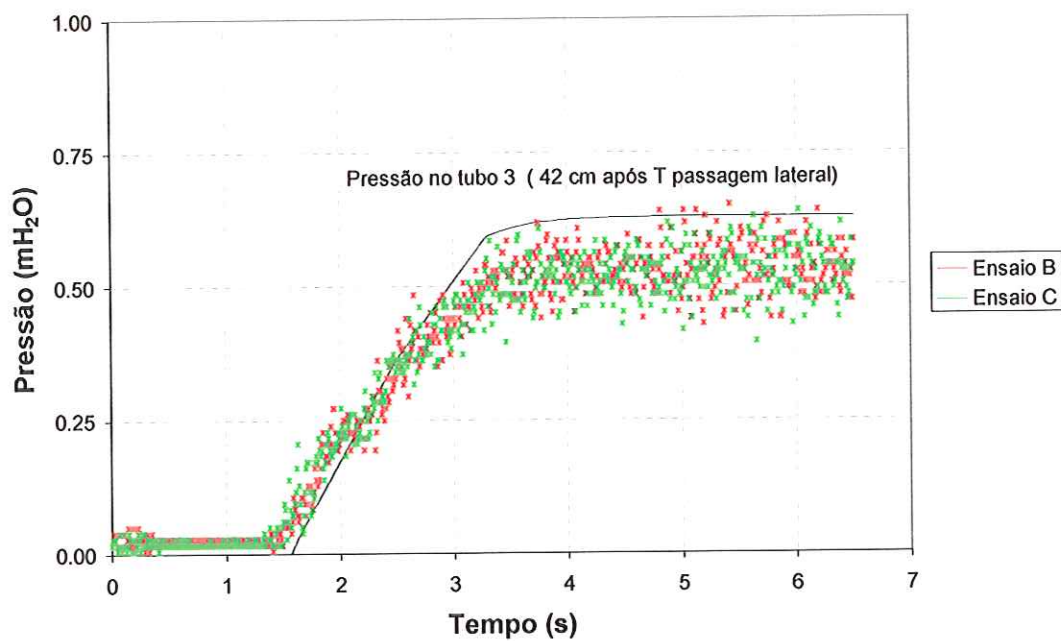


Figura 74 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 3 (R1 = 8 voltas)

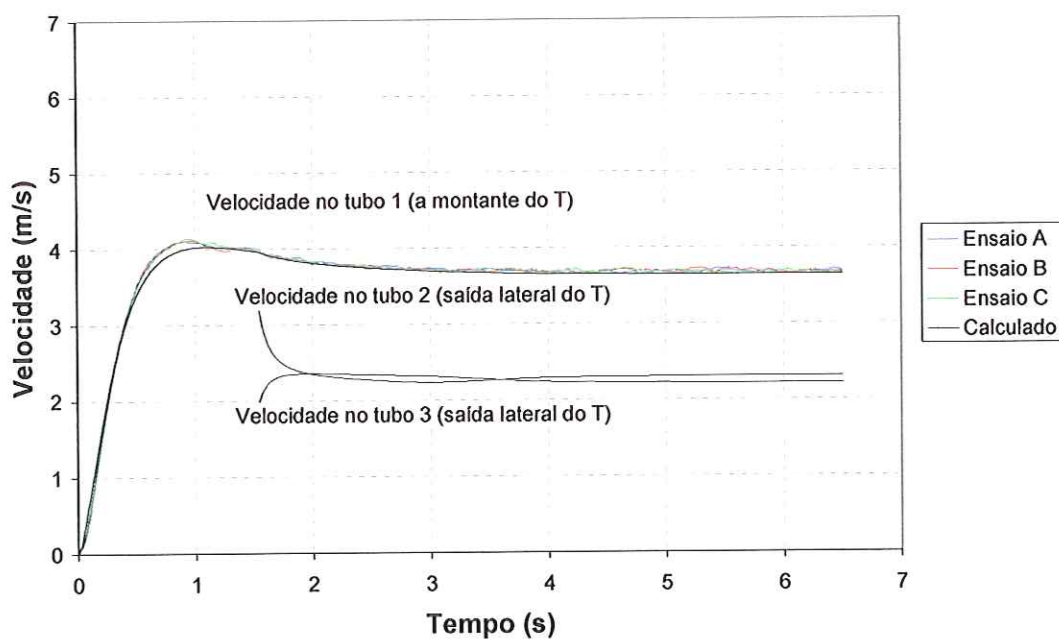


Figura 75 – Ensaio com T bilateral: velocidade (R1 = 9 voltas)

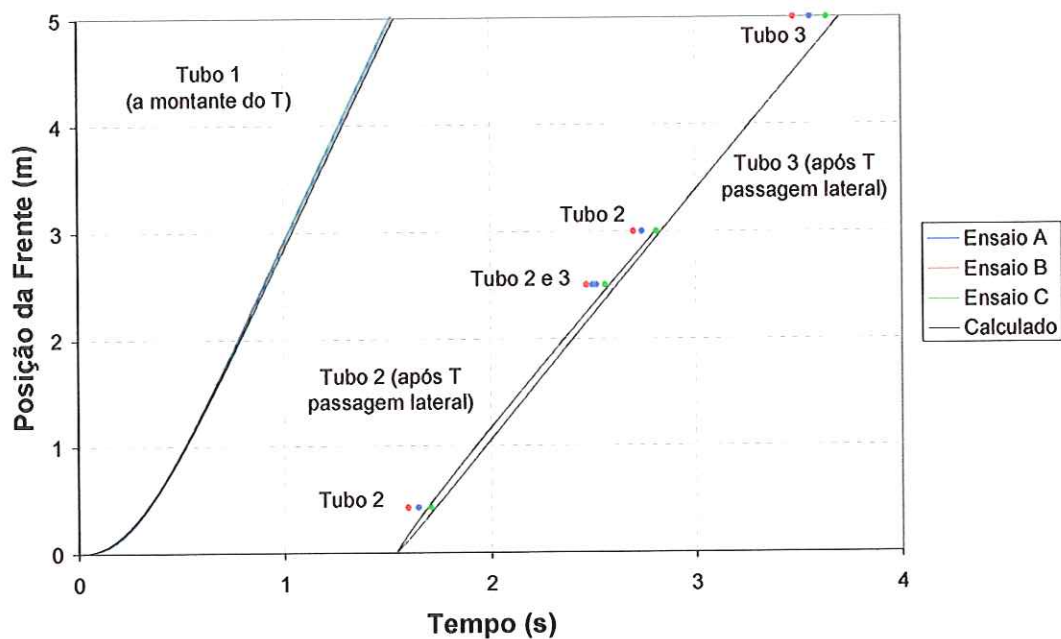


Figura 76 – Ensaio com T bilateral: posição (R1 = 9 voltas)

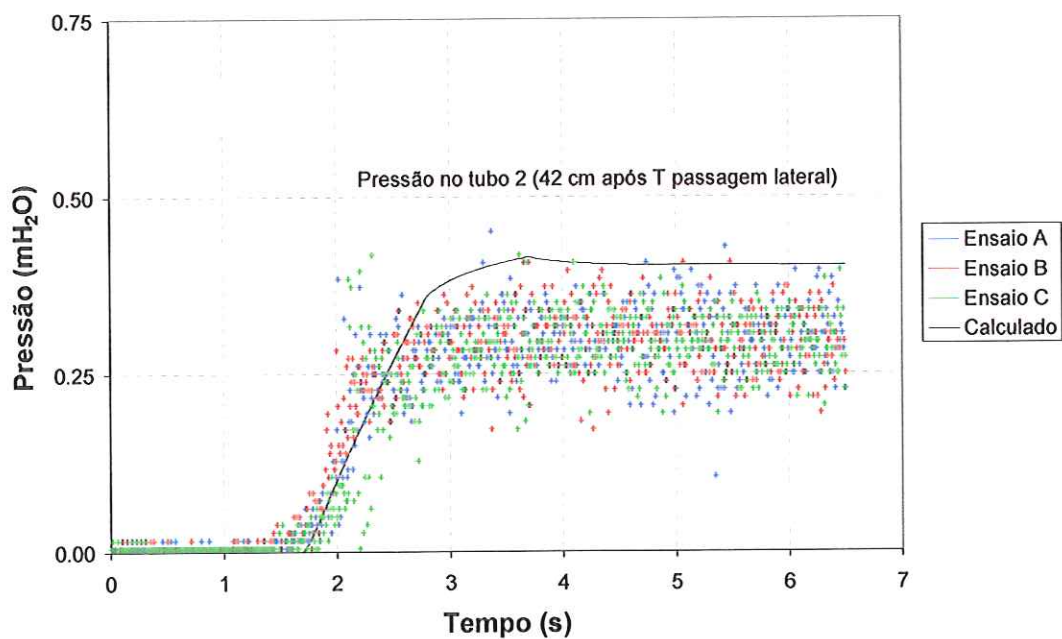


Figura 77 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 2 (R1 = 9 voltas)

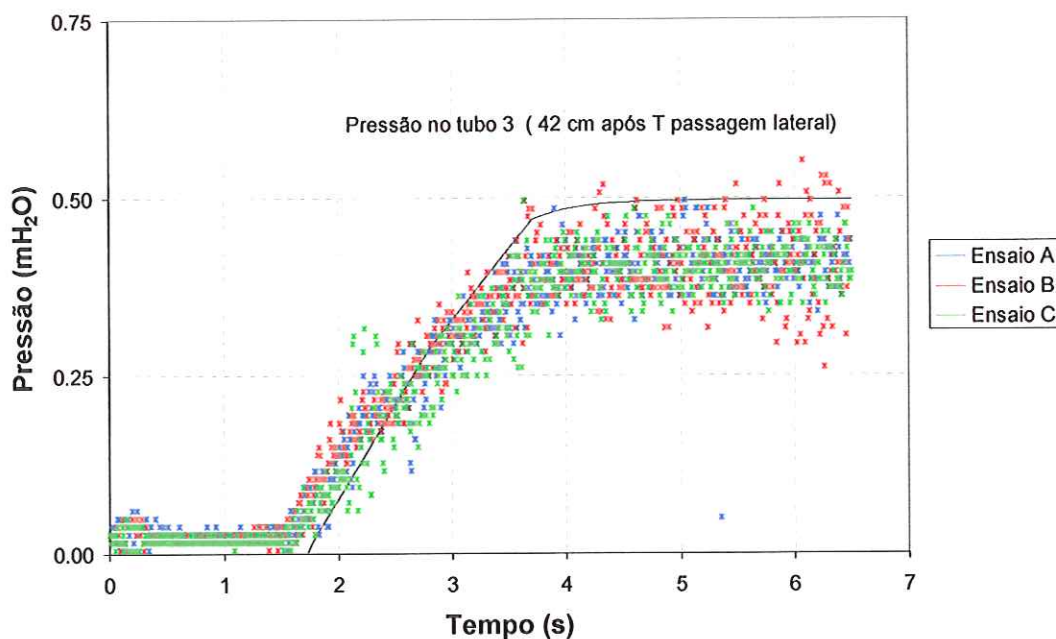


Figura 78 – Ensaio com T bilateral: pressões tubo 3 (R1 = 9 voltas)

6.8. Ensaio com Conexão em “Y”: redução na passagem direta

Utilizando-se a configuração mostrada na Figura 79 realizou-se uma bateria de ensaios para avaliação do ajuste do modelo no caso de uma conexão em “Y” com redução na passagem direta de 44,5 mm para 35 mm.

Tabela 24– Dimensões utilizadas na montagem apresentada na Figura 79

$L_H = 1,50$ m	$L_2 = 5,00$ m	$D_{H0} = 53,5$ mm
$L_V = 6,75$ m	$L_3 = 5,00$ m	$D_m = 50,0$ mm
$L_{H0} = 0,66$ m	$L_{X12} = L_{X45} = 2,09$ m	$D_0 = 53,5$ mm
$L_m = 0,57$ m	$L_{X23} = L_{X56} = 2,50$ m	$D_1 = 44,5$ mm
$L_{m1} = 0,14$ m	$z_R = 7,41$ m	$D_2 = 35,0$ mm
$L_1 = 5,00$ m	$D = 53,5$ mm	$D_3 = 44,5$ mm

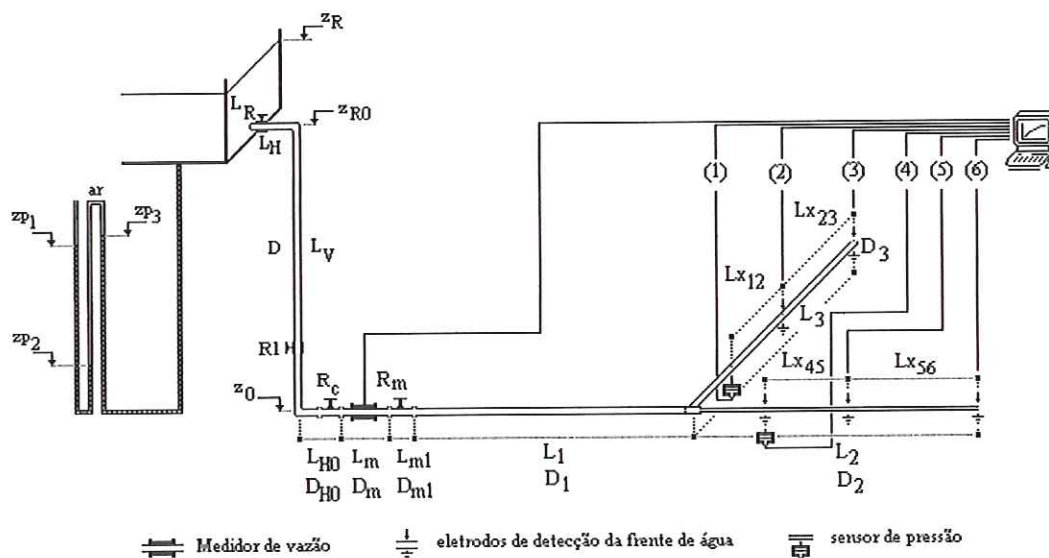


Figura 79 – Configuração do ensaio com Y com redução na passagem direta

6.8.1. Procedimentos e Resultados

A válvula de controle (R1) foi colocada em 4 posições diferentes de curso, sendo: 0 ou totalmente aberta e com 7, 8 e 9 voltas. Os procedimentos para a realização de cada ensaio foram os mesmos já descritos anteriormente.

Os coeficientes de perda de carga localizada adotados para a passagem direta com redução e passagem lateral foram respectivamente 0,9 e 1,5. Os comprimentos fictícios de aceleração foram adotados iguais a 0,2 m.

Para permitir um ajuste adequado do modelo foram adotadas as seguintes condições de contorno em relação às velocidades iniciais quando a frente atinge o “Y”:

a) velocidade inicial na passagem direta com redução de 44, para 35,0 mm:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

b) velocidade inicial na passagem lateral do “Y”: $V_3 = 0$

A seguir, da Figura 80 a Figura 92, são mostrados os resultados dos ensaios com a válvula de controle (R1) nas posições estabelecidas.

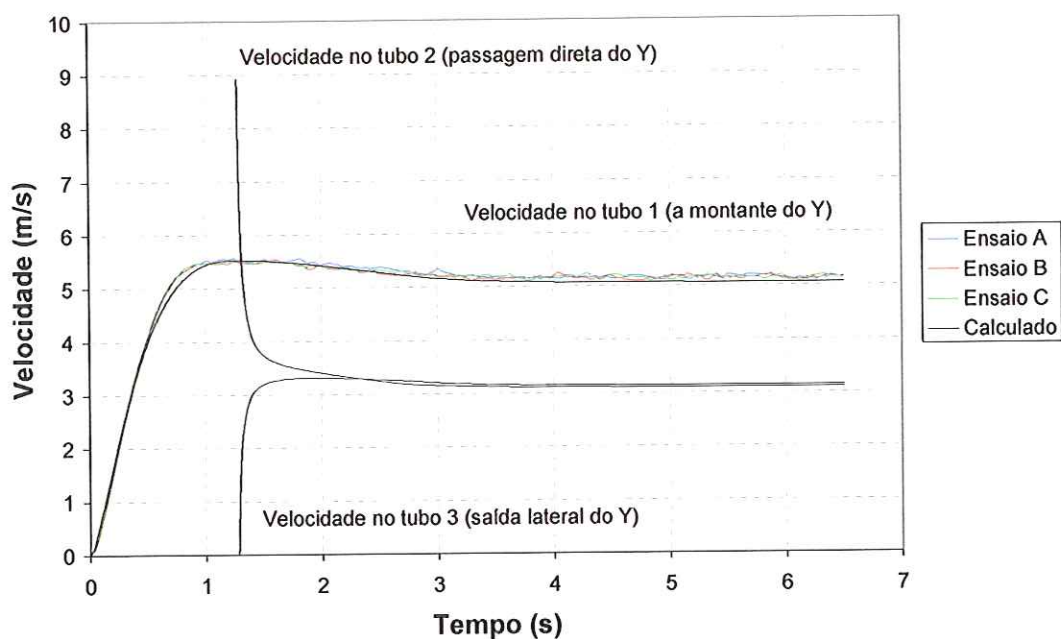


Figura 80 – Y com redução direta: velocidade (R1 = 0 voltas)

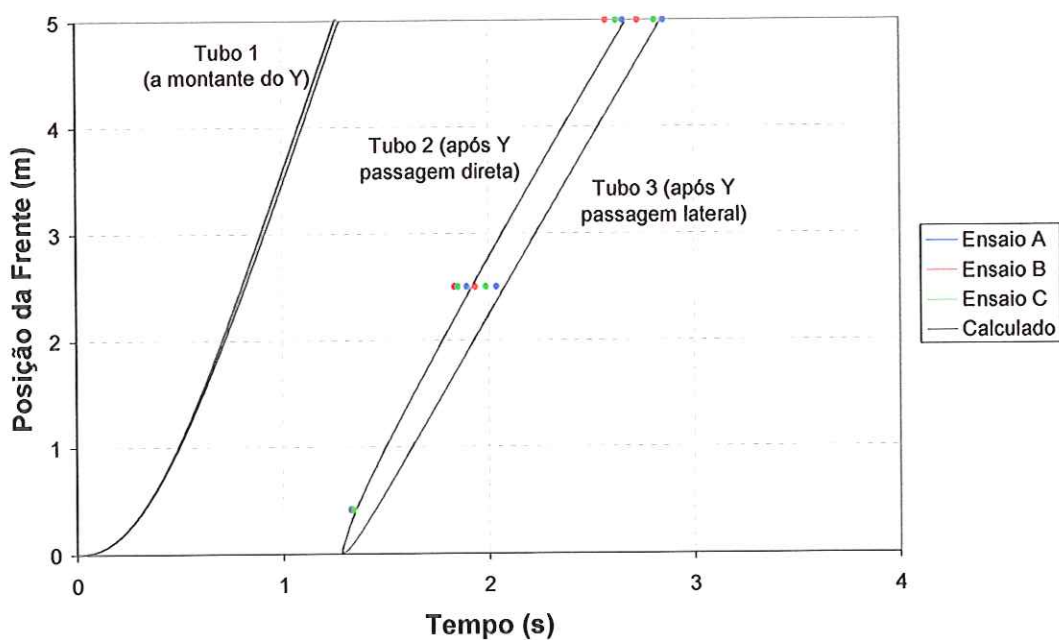


Figura 81 – Y com redução direta: posição (R1 = 0 voltas)

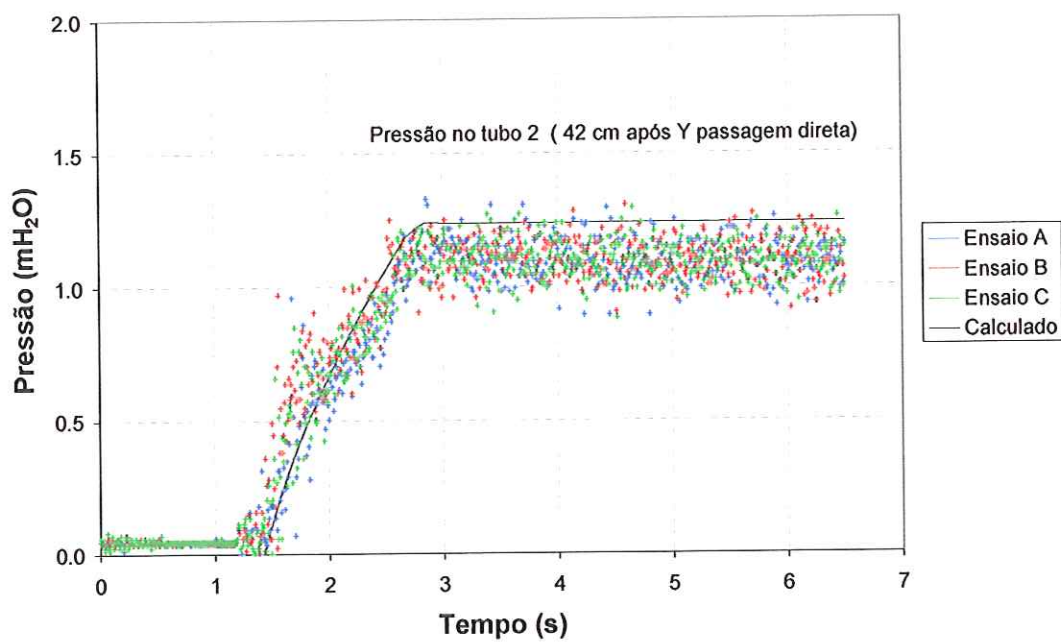


Figura 82 – Y com redução direta: pressões tubo 2 (R1 = 0 volts)

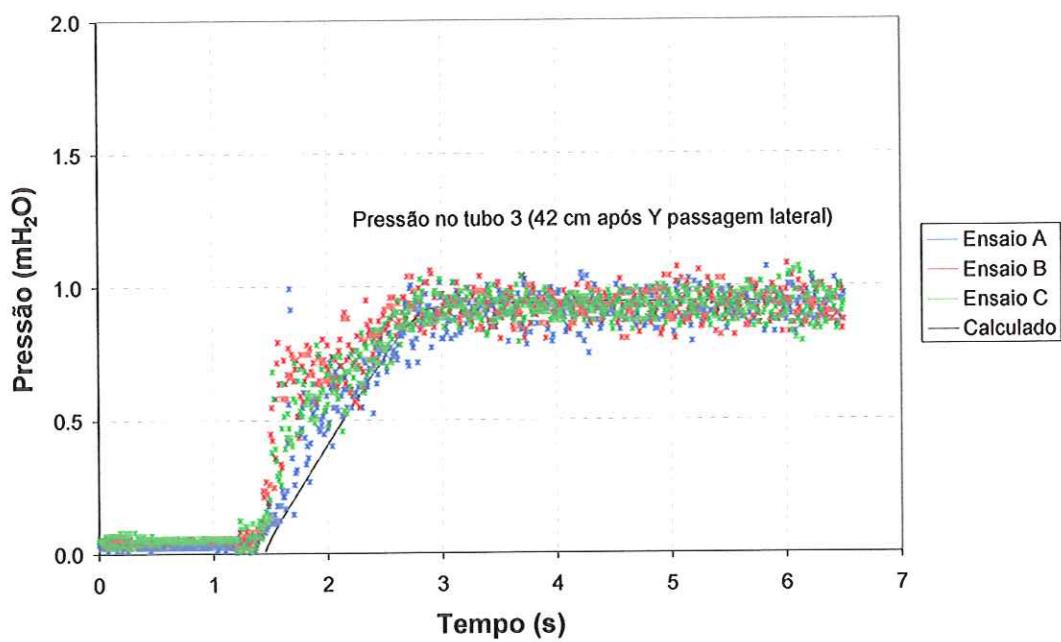


Figura 83 – Y com redução direta: pressões tubo 3 (R1 = 0 volts)

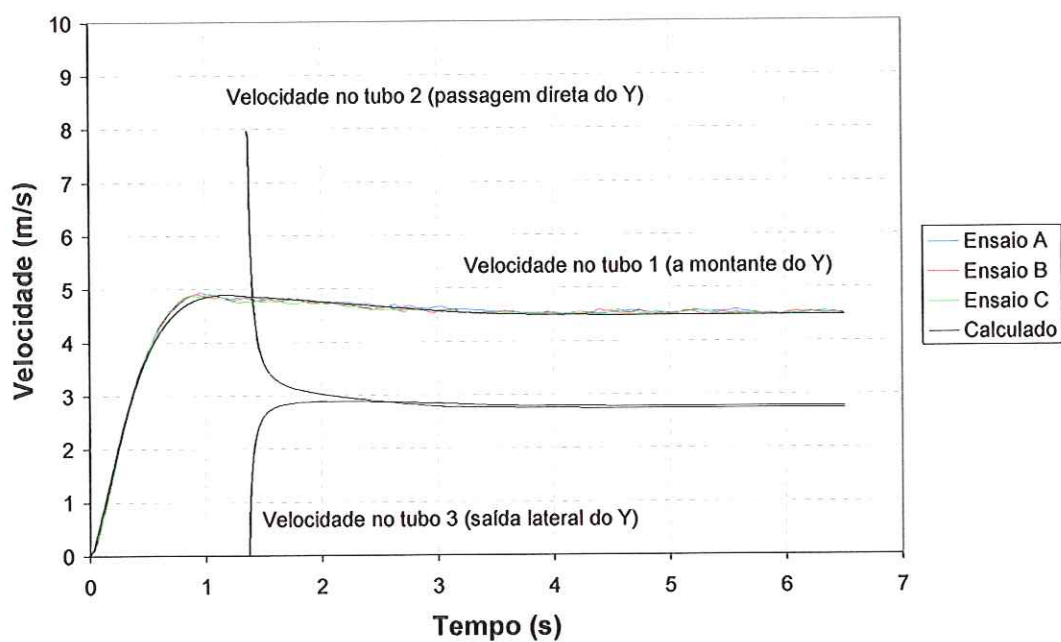


Figura 84 – Y com redução direta: velocidade (R1 = 7 voltas)

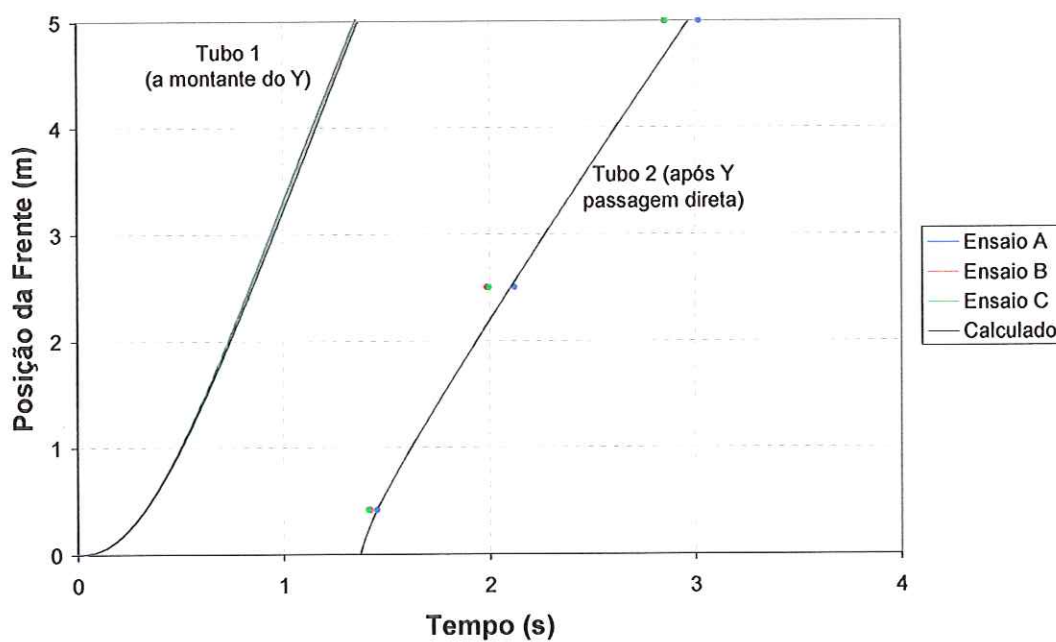


Figura 85 – Y com redução direta: posição tubo 2 (R1 = 7 voltas)

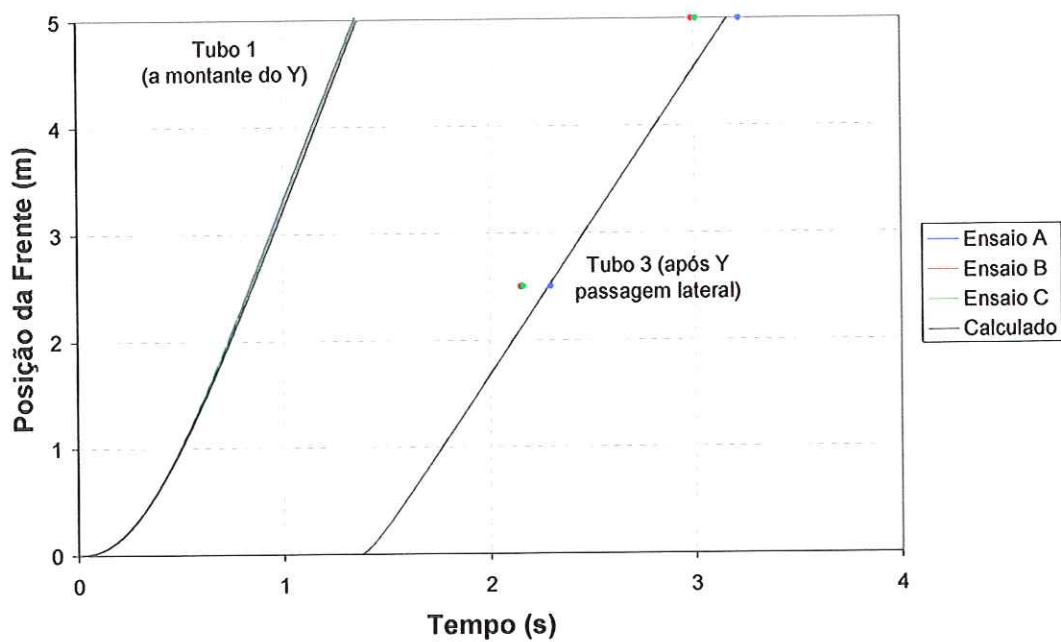


Figura 86 – Y com redução direta: posição tubo 3 (R1 = 7 voltas)

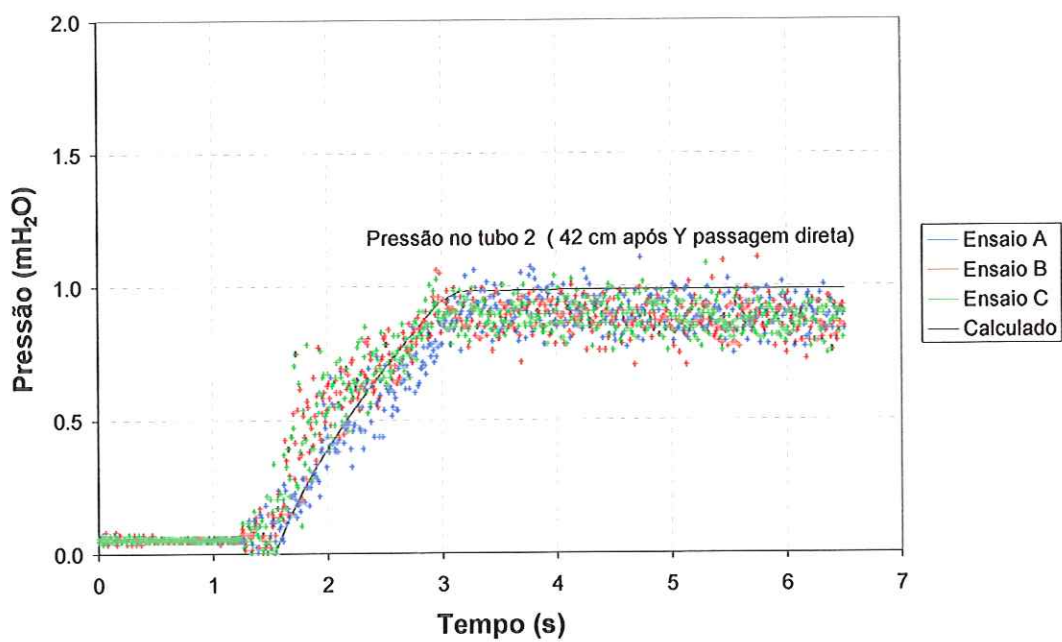


Figura 87 – Y com redução direta: pressões tubo 2 (R1 = 7 voltas)

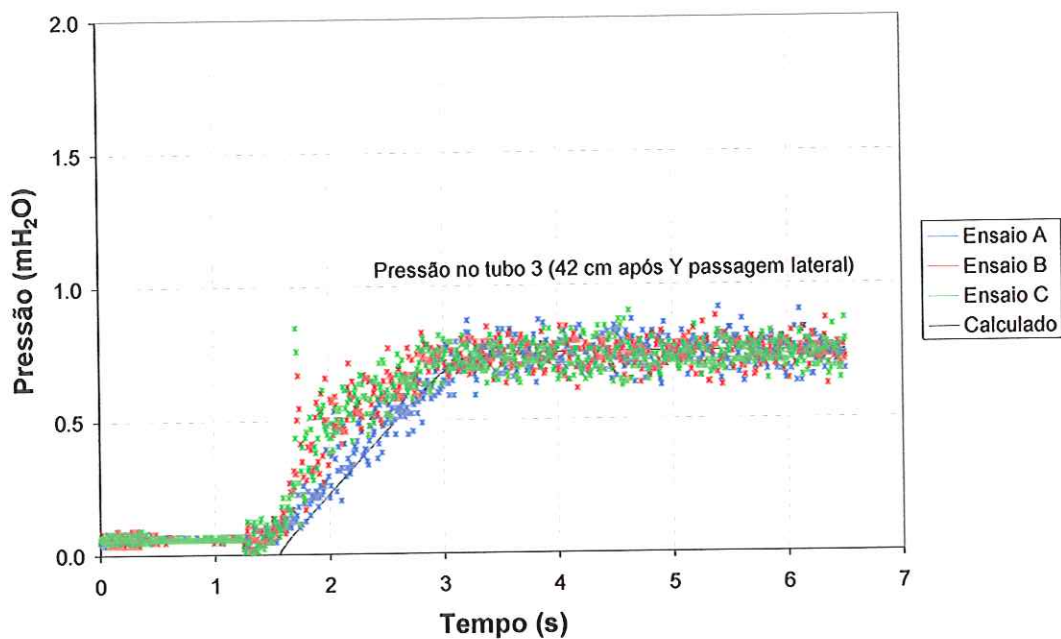


Figura 88 – Y com redução direta: pressões tubo 3 (R1 = 7 voltas)

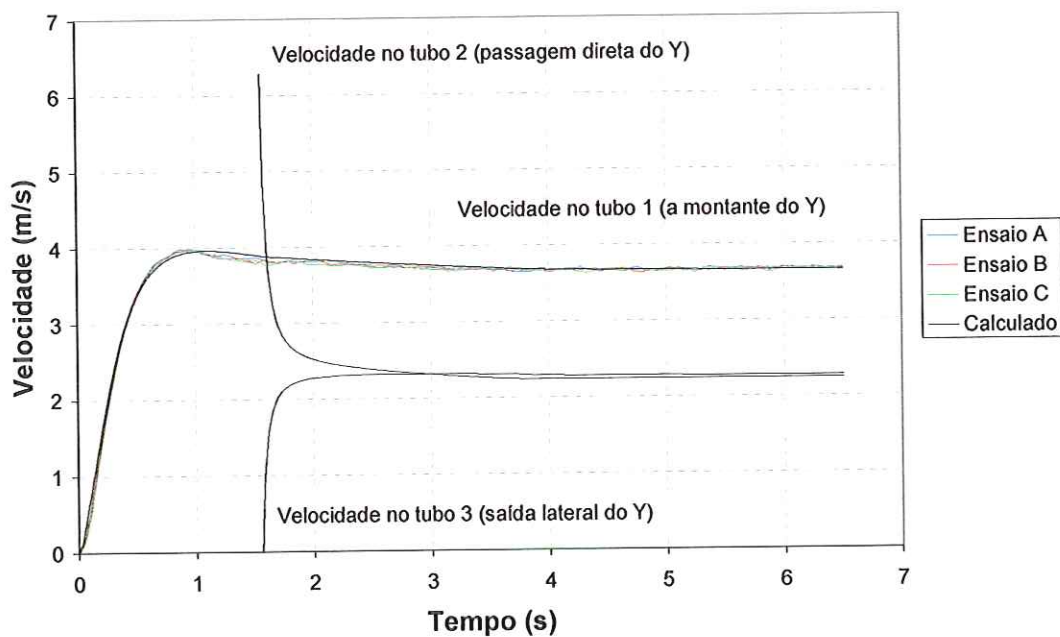


Figura 89 – Y com redução direta: velocidade (R1 = 9 voltas)

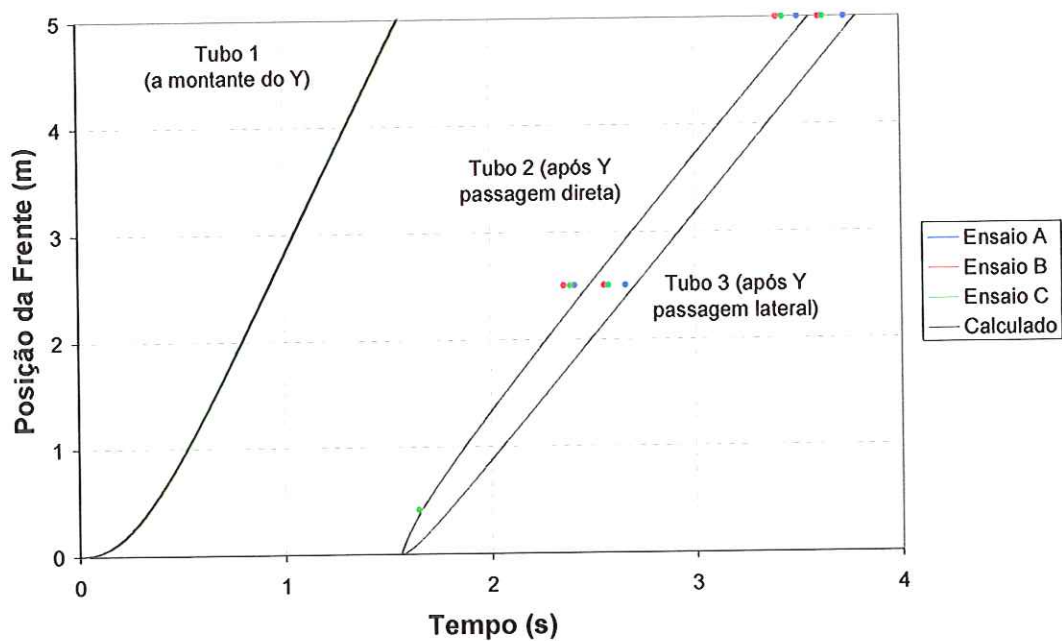


Figura 90 – Y com redução direta: posição (R1 = 9 voltas)

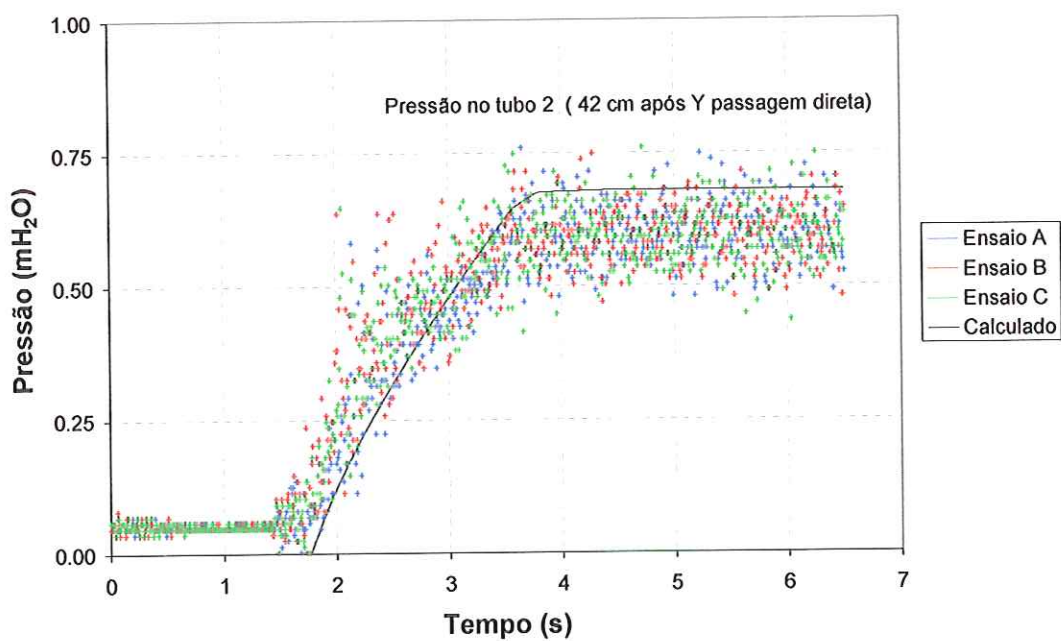


Figura 91 – Y com redução direta: pressões tubo 2 (R1 = 9 voltas)

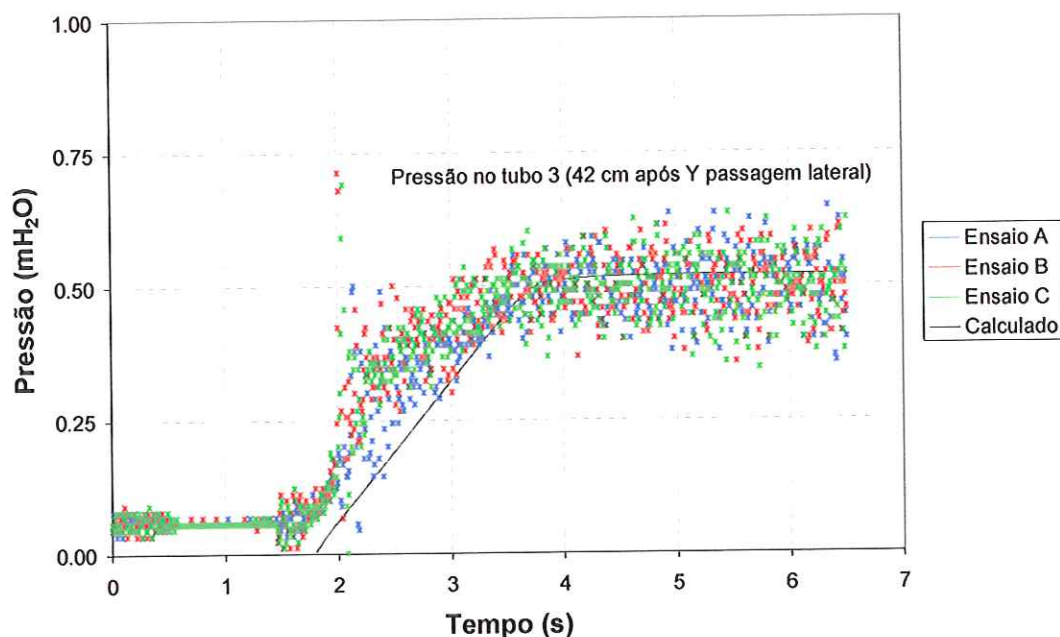


Figura 92 – Y com redução direta: pressões tubo 3 ($R1 = 9$ voltas)

6.9. Ensaio com Conexão em “Y”: redução na passagem lateral

Utilizando-se a configuração mostrada na Figura 93 realizou-se uma bateria de ensaios para avaliação do ajuste do modelo no caso de uma conexão em “Y” com redução na passagem lateral de 44,5 mm par 35 mm.

Tabela 25– Dimensões utilizadas na montagem apresentada na Figura 93

$L_H = 1,50$ m	$L_2 = 5,00$ m	$D_{H0} = 53,5$ mm
$L_V = 6,75$ m	$L_3 = 5,00$ m	$D_m = 50,0$ mm
$L_{H0} = 0,66$ m	$L_{X12} = L_{X45} = 2,09$ m	$D_0 = 53,5$ mm
$L_m = 0,57$ m	$L_{X23} = L_{X56} = 2,50$ m	$D_1 = 44,5$ mm
$L_{m1} = 0,14$ m	$z_R = 7,42$ m	$D_2 = 44,5$ mm
$L_1 = 5,00$ m	$D = 53,5$ mm	$D_3 = 35,0$ mm

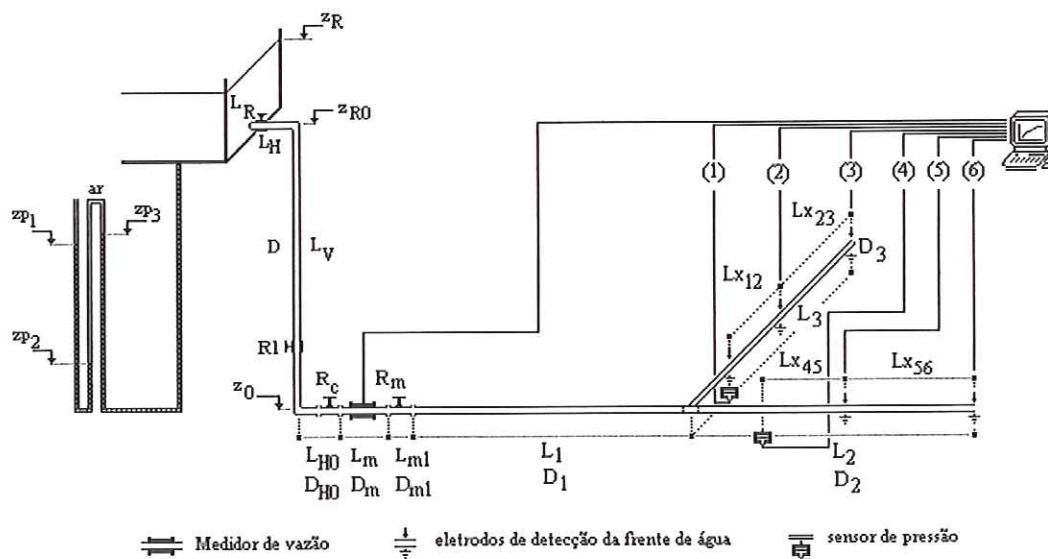


Figura 93 – Configuração do ensaio com Y (redução na passagem lateral)

6.9.1. Procedimentos e Resultados

A válvula de controle (R1) foi colocada em 4 posições diferentes de curso, sendo: 0 ou totalmente aberta e com 7, 8 e 9 voltas. Os procedimentos para a realização de cada ensaio foram os mesmos aplicados aos demais ensaios.

Foram adotadas as seguintes condições de contorno em relação às velocidades iniciais quando a frente atinge o “Y”:

a) velocidade inicial na passagem direta:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

b) velocidade inicial na passagem lateral do “Y”:

$$V_3 = 0$$

A seguir, da Figura 94 a Figura 105, são mostrados os resultados dos ensaios com a válvula de controle (R1) nas posição estabelecidas.

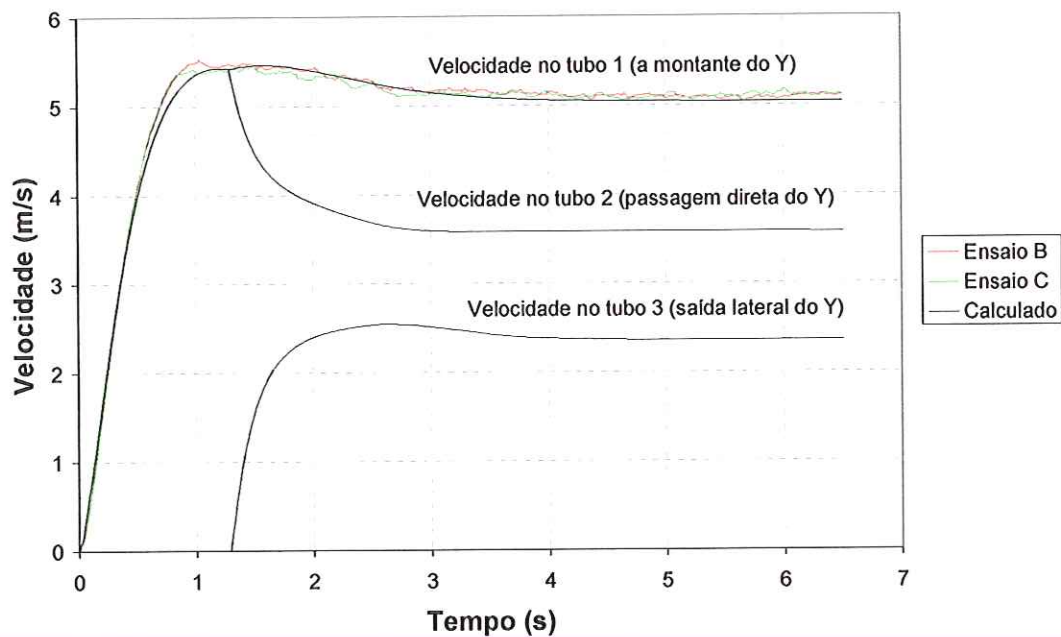


Figura 94 – Y com redução lateral: velocidade (R1 = 0 volts)

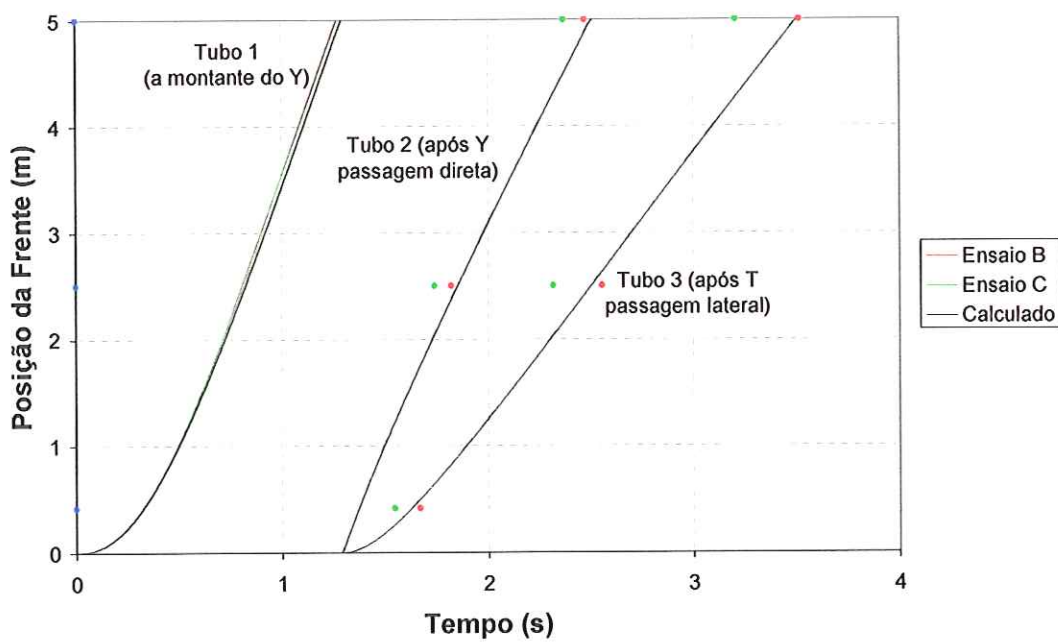


Figura 95 – Y com redução lateral: posição (R1 = 0 volts)

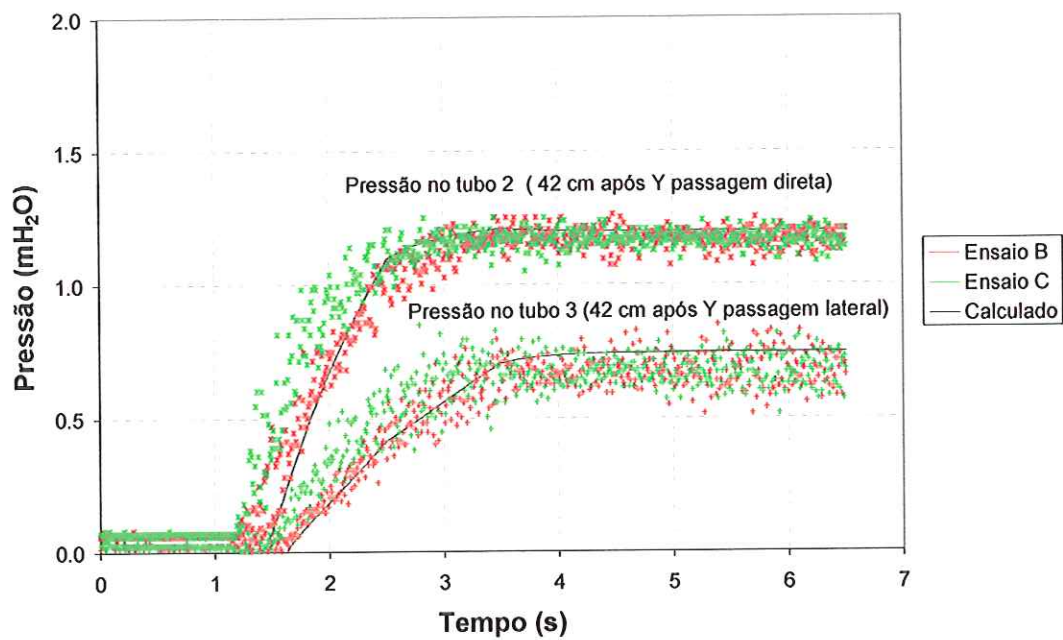


Figura 96 – Y com redução lateral: pressões (R1 = 0 volts)

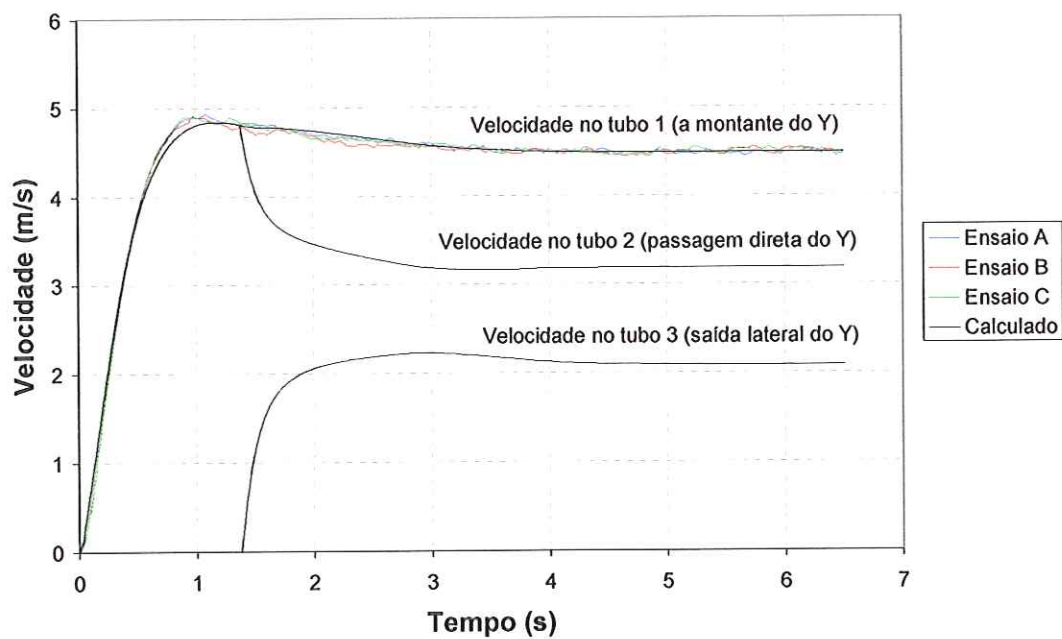


Figura 97 – Y com redução lateral: velocidade (R1 = 7 volts)

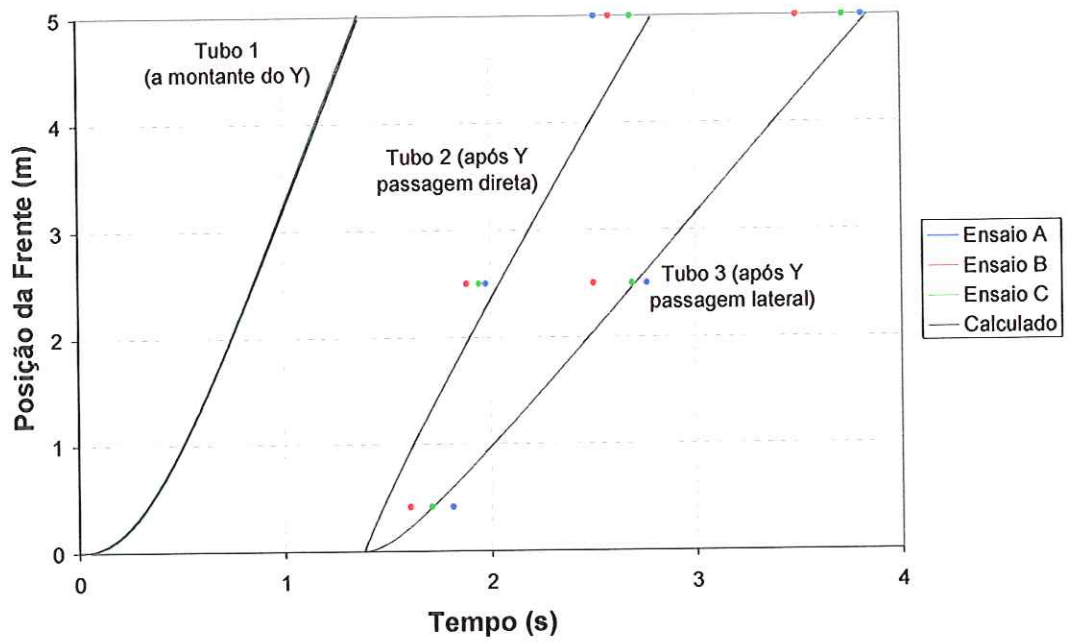


Figura 98 – Y com redução lateral: posição (R1 = 7 voltas)

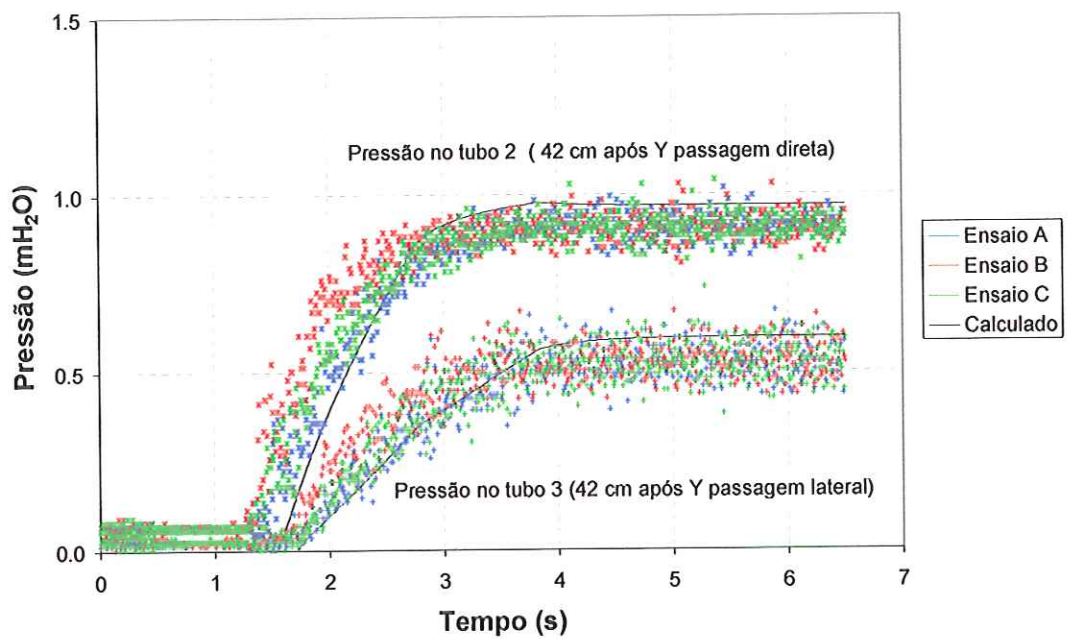


Figura 99 – Y com redução lateral: pressões (R1 = 7 voltas)

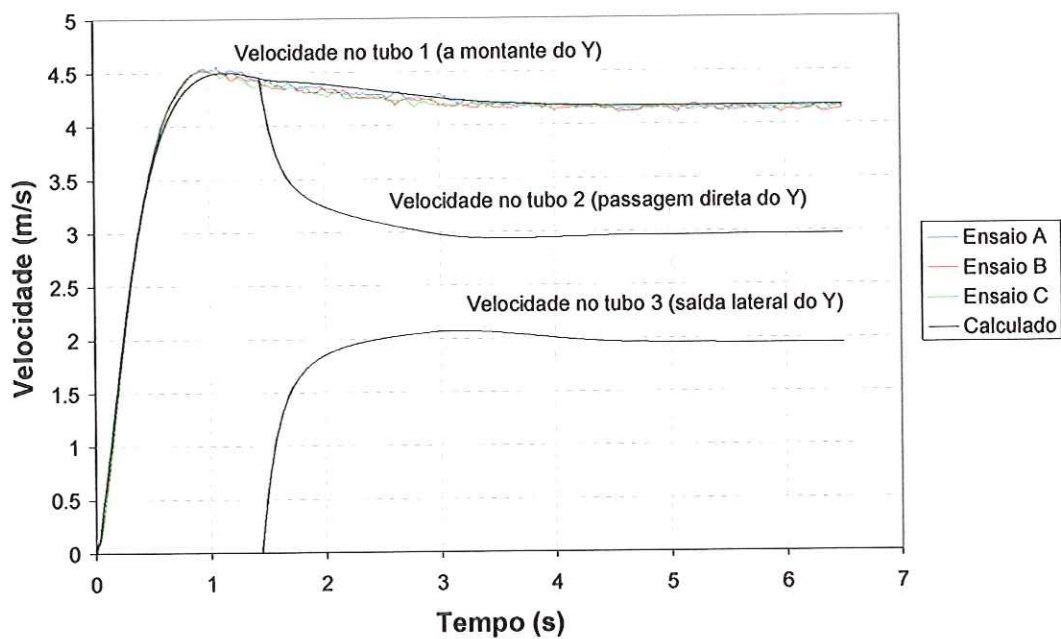


Figura 100 – Y com redução lateral: velocidade (R1 = 8 voltas)

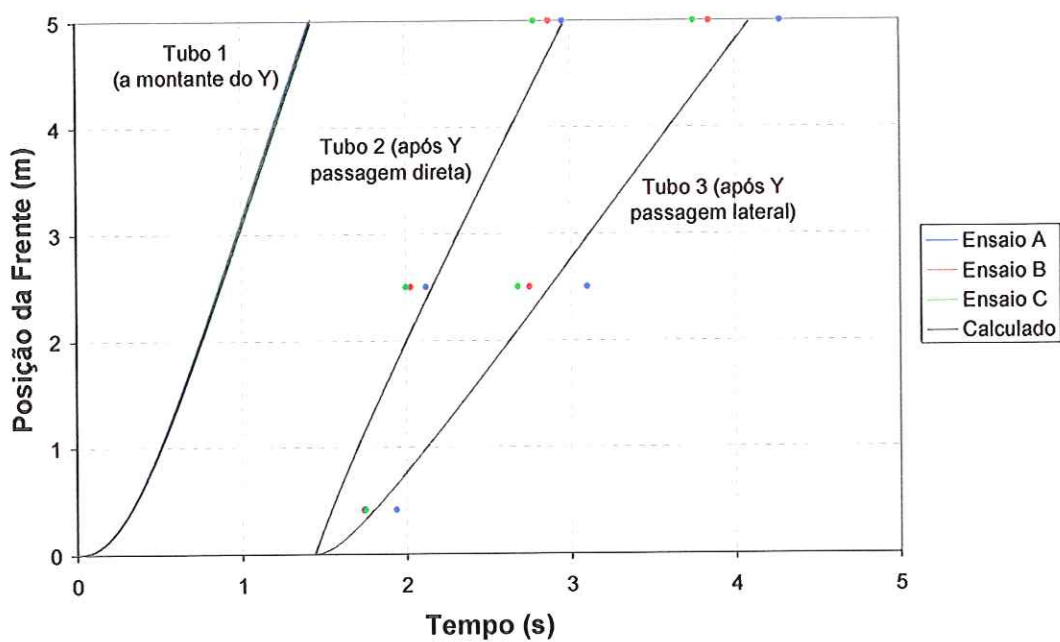


Figura 101 – Y com redução lateral: posição (R1 = 8 voltas)

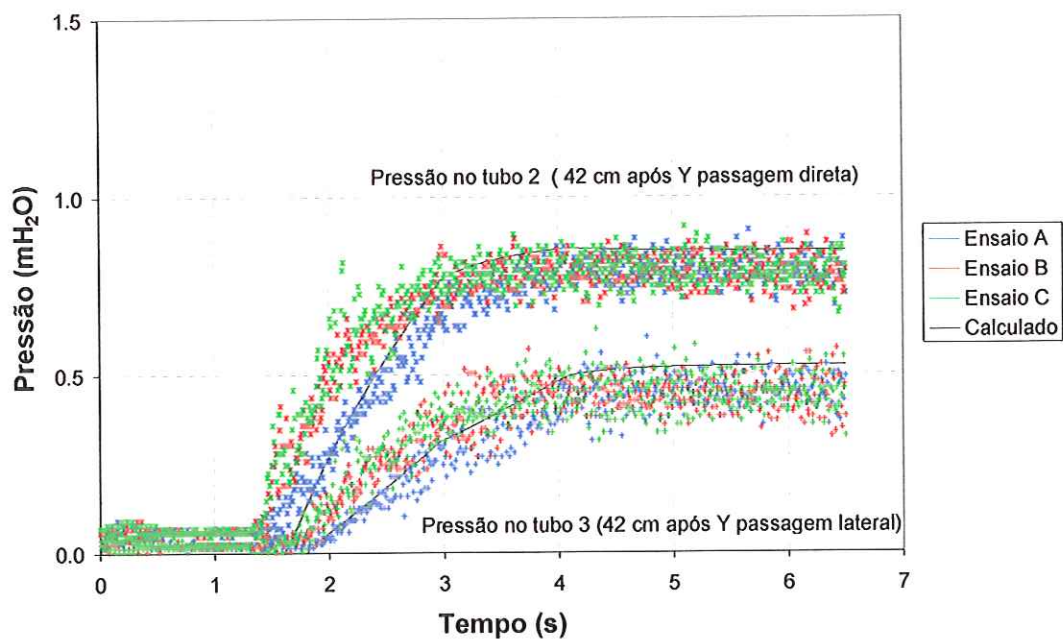


Figura 102 – Y com redução lateral: pressões (R1 = 8 volts)

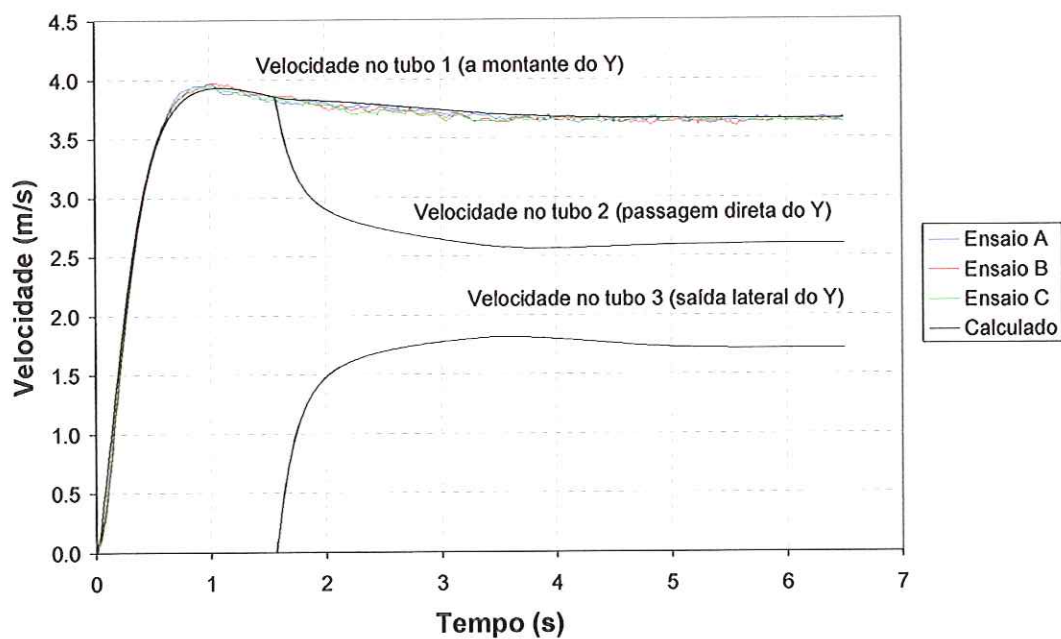


Figura 103 – Y com redução lateral: velocidade (R1 = 9 volts)

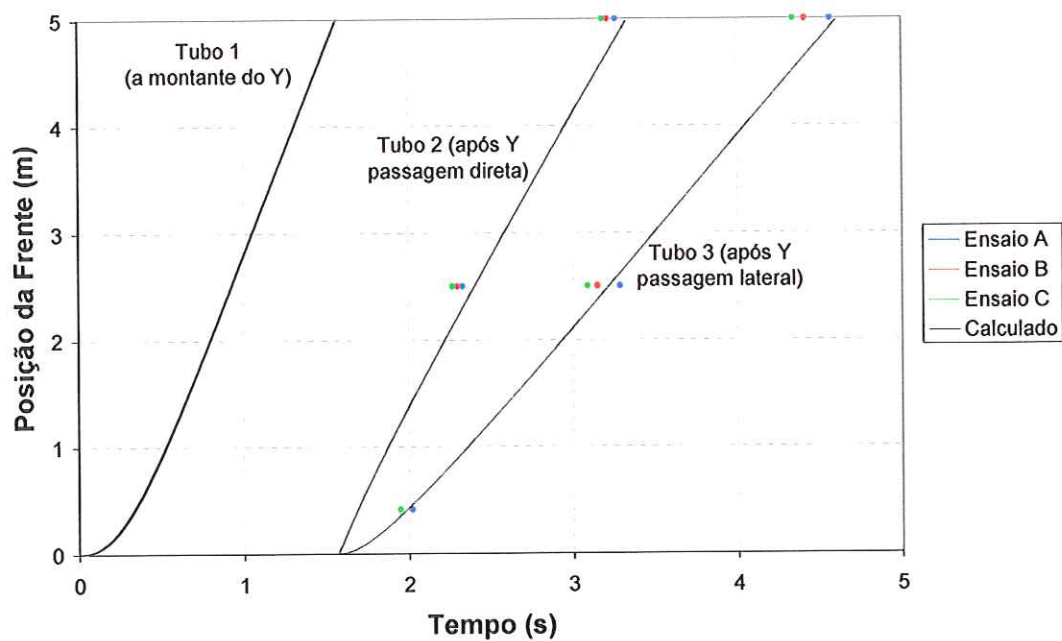


Figura 104 – Y com redução lateral: posição (R1 = 9 voltas)

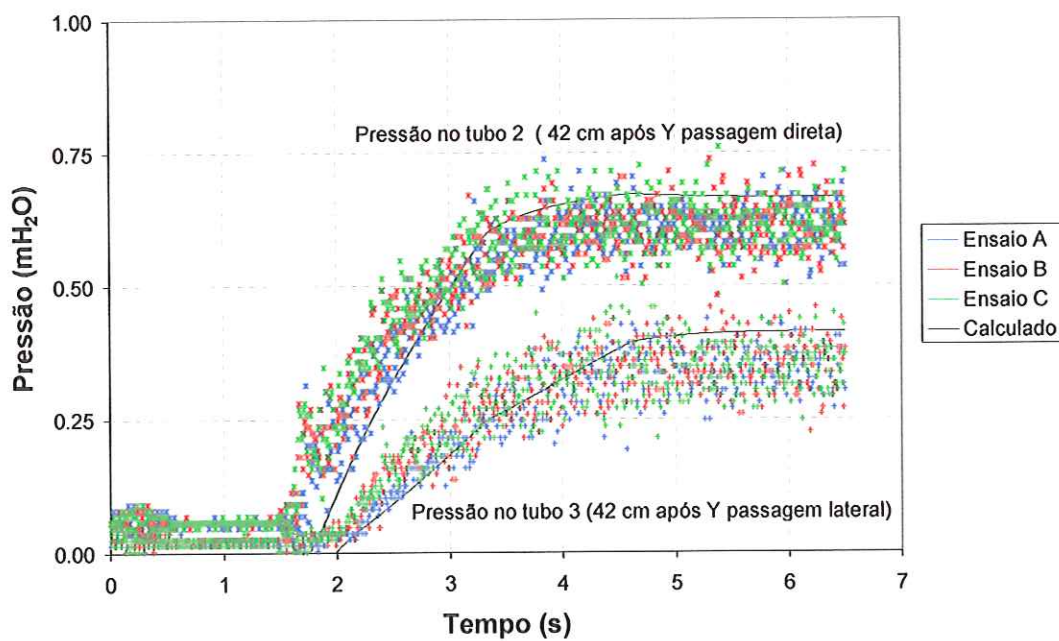


Figura 105 – Y com redução lateral: pressões (R1 = 9 voltas)

6.10. Análise do efeito dos parâmetros ajustados

6.10.1. Efeito do ajuste do L_0 (comprimento de aceleração)

Foi analisado o efeito da variação de L_0 no ajuste das curvas. As figuras a seguir ilustram este fato para alguns dos ensaios.

A Figura 106 mostra o efeito do comprimento L_0 a montante da saída do reservatório para o ensaio com redução. Os demais parâmetros do modelo foram mantidos constantes e iguais aos obtidos no respectivo ajuste com os dados experimentais. Para o ajuste de todos os ensaios o valor de L_0 no laboratório foi adotado igual a 0,20 m.

A Figura 107 mostra o efeito da consideração de um L_0 na redução. Pode-se observar que seu efeito é desprezível e seu emprego neste caso é discutível. Para todos os ensaios com redução na canalização e com cotovelo seguido de redução adotou-se este $L_0 = 0$.

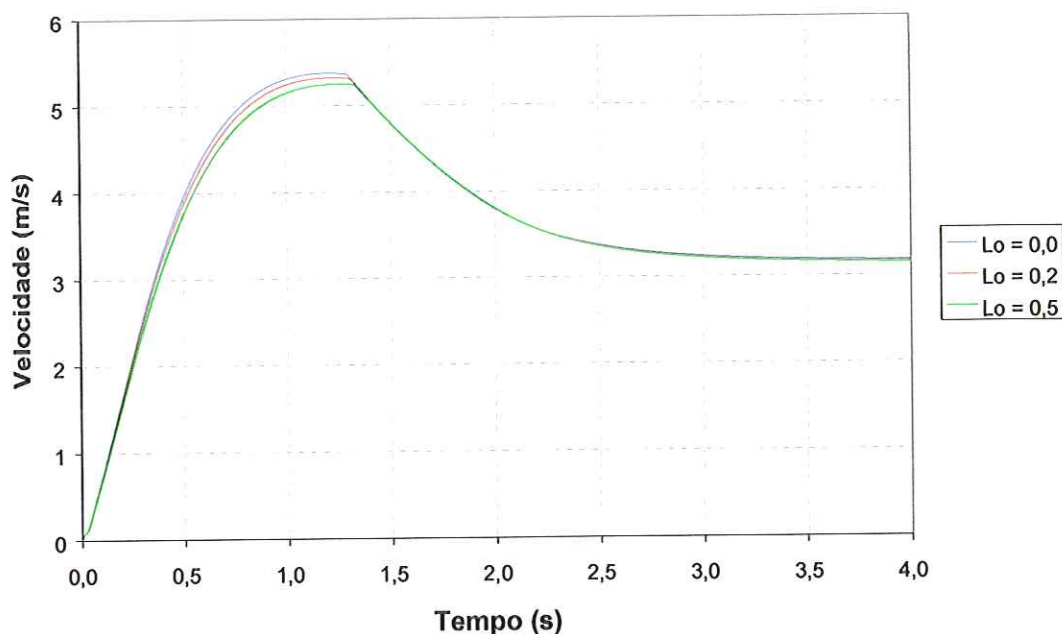


Figura 106 – Ensaio com redução: efeito do comprimento L_0 no reservatório ($R1 = 0$ voltas)

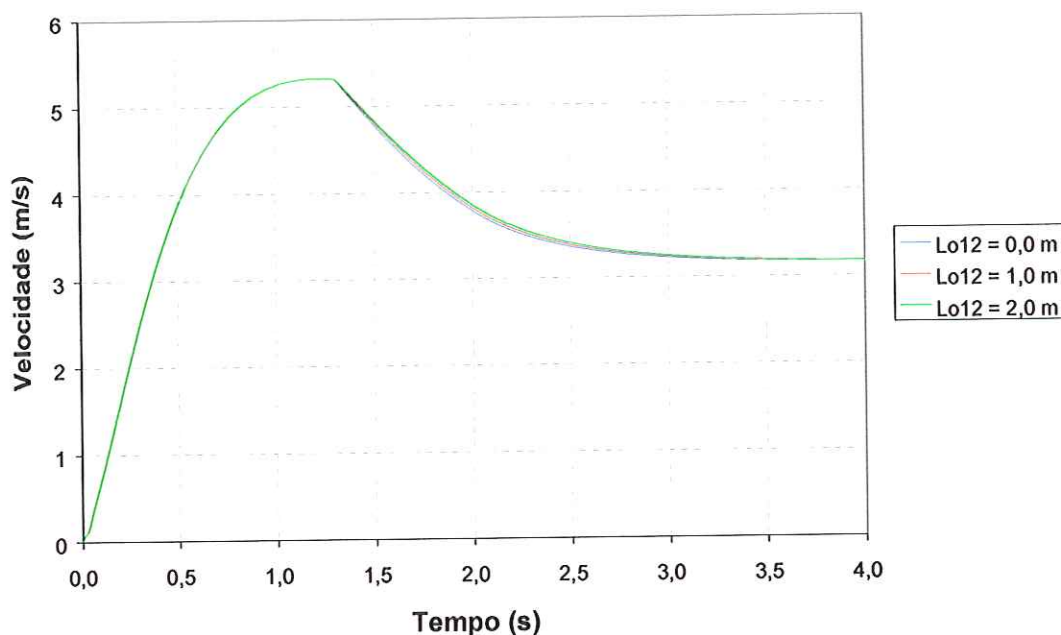


Figura 107 – Ensaio com redução: efeito do comprimento L_o na própria redução ($R1 = 0$ voltas)

Nos casos em que há derivação, como é o caso de conexões em “Y” e “T”, o efeito do comprimento fictício L_o torna-se imprescindível para o ajuste do modelo. Só é possível a solução do sistema numérico se um dos valores de L_o na conexão T ou Y for diferente de zero. Quanto maior o valor de L_o , mais suave é a evolução da velocidade nas derivações. Seria necessário um estudo mais específico para estabelecer uma forma de determinar L_o nestes casos. Da Figura 108 a Figura 113 é mostrado o efeito de L_o para cada um dos casos. Os demais parâmetros foram mantidos constantes e são os mesmos obtidos no ajuste com os dados experimentais.

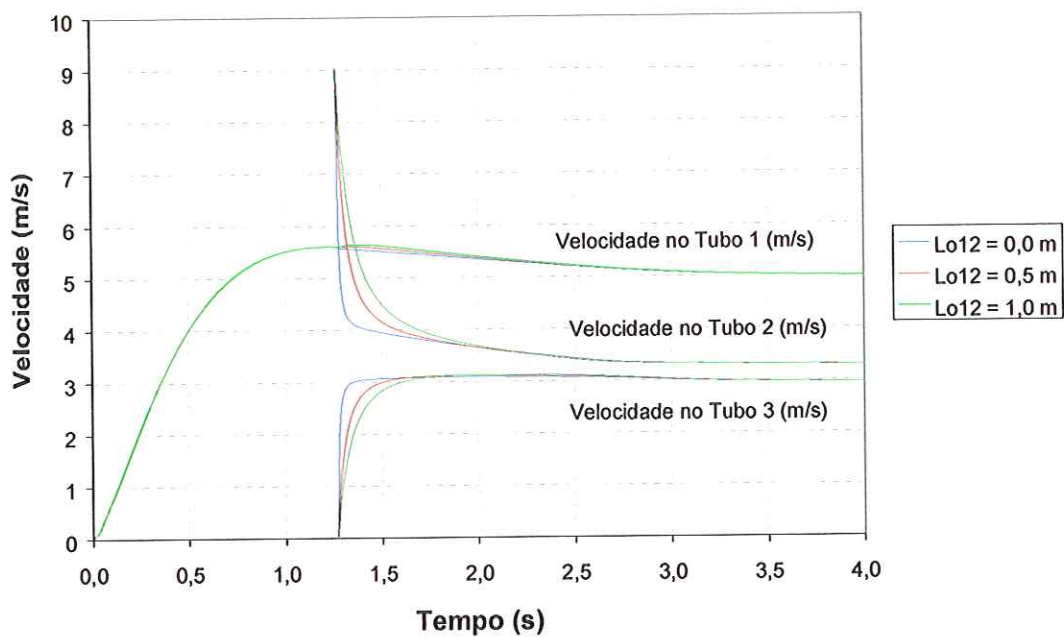


Figura 108 – Efeito do comprimento Lo na passagem direta do T, sendo Lo na passagem lateral igual a 0,2 m ($R1 = 0$ voltas)

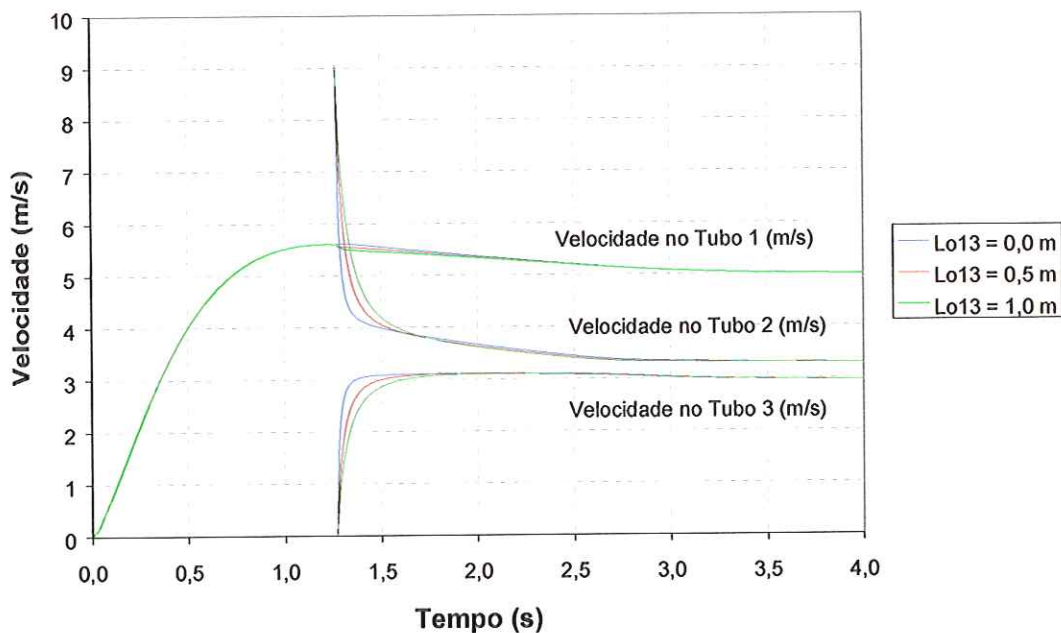


Figura 109 – Efeito do comprimento Lo na passagem lateral do T, sendo Lo na passagem direta igual a 0,2 m ($R1 = 0$ voltas)

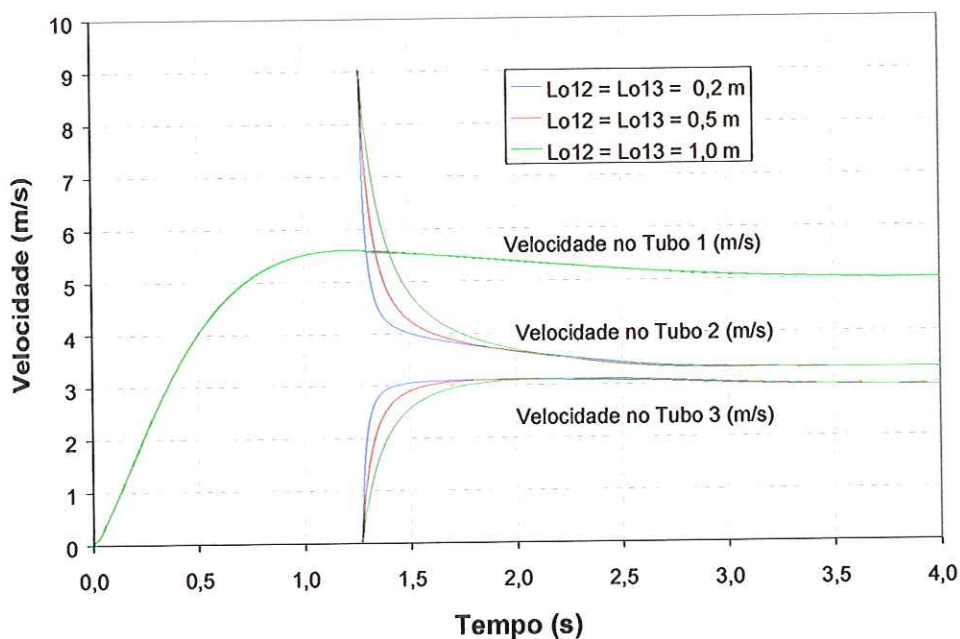


Figura 110 – Efeito do comprimento Lo na passagem direta e passagem lateral do T com variações idênticas ($R1 = 0$ voltas)

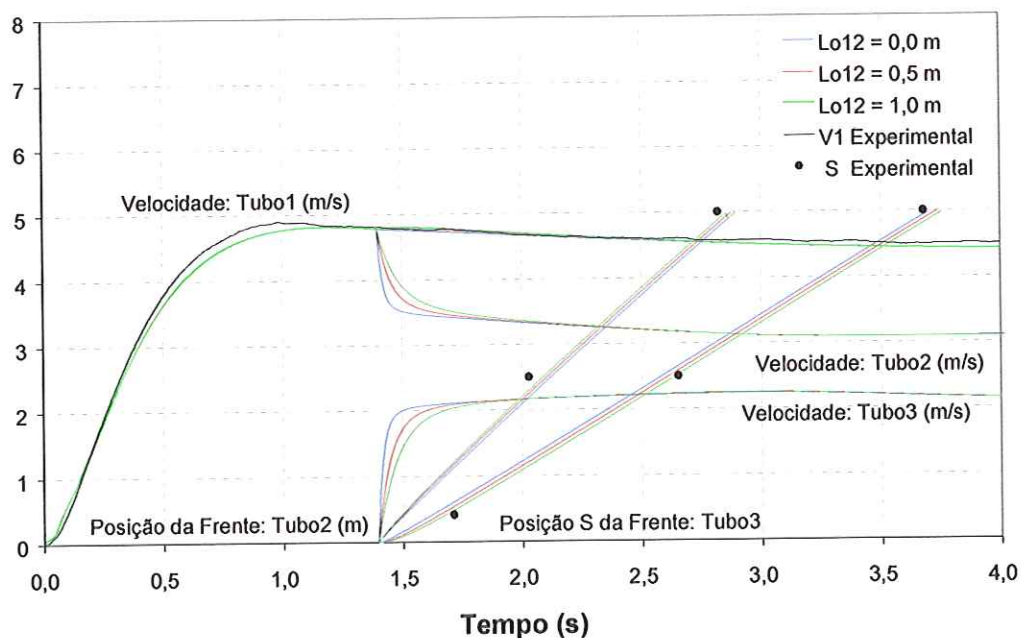


Figura 111 – Efeito do comprimento Lo na passagem direta do Y, sendo Lo na passagem lateral igual a $0,2 \text{ m}$ ($R1 = 0$ voltas)

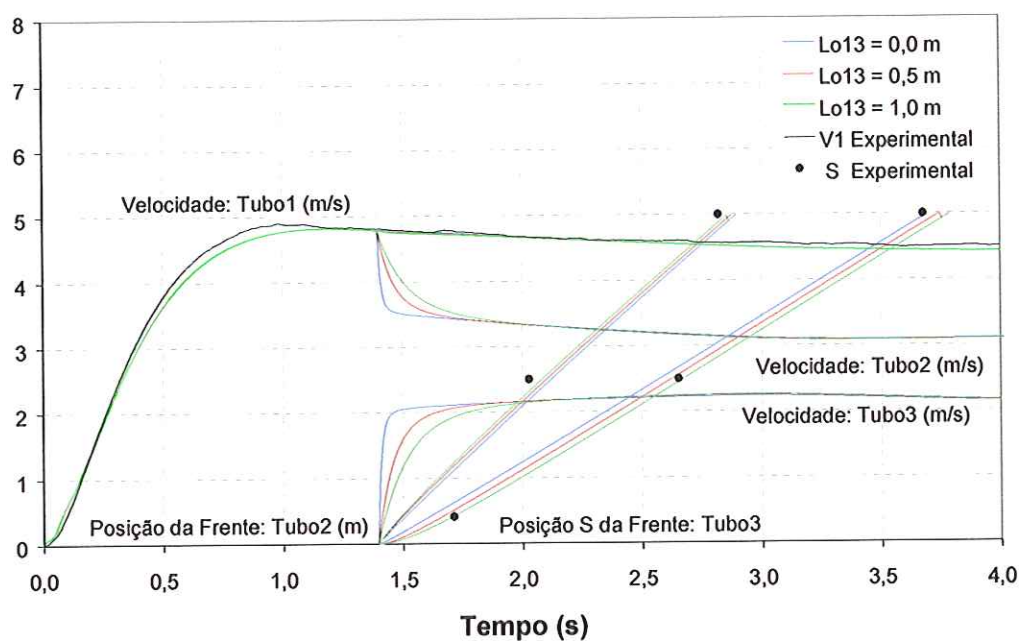


Figura 112 – Efeito do comprimento Lo na passagem lateral do Y, sendo Lo na passagem direta igual a 0,2 m ($R1 = 0$ voltas)

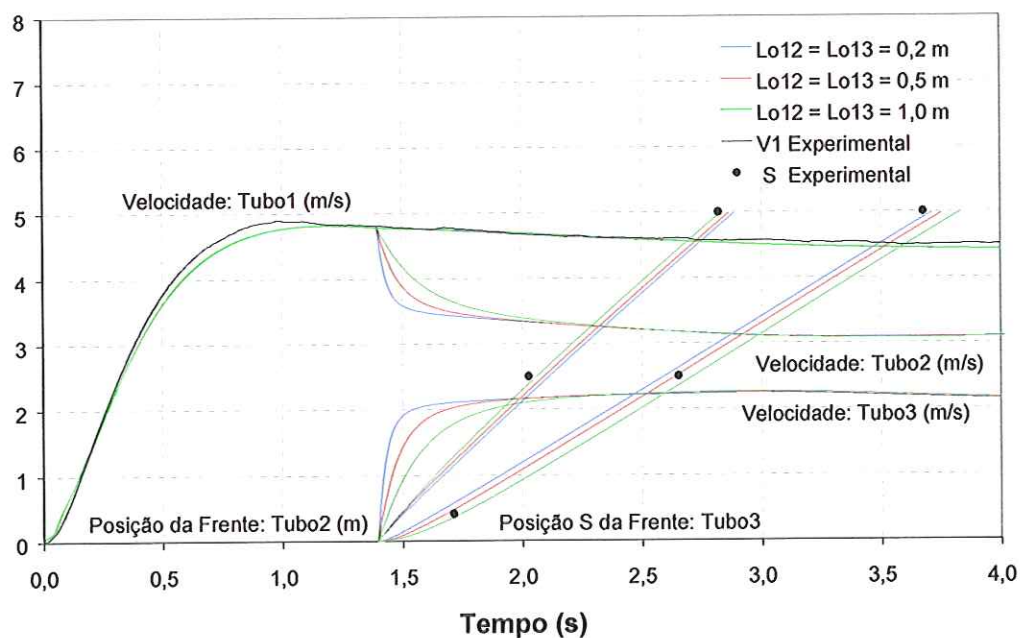


Figura 113 – Efeito do comprimento Lo na passagem direta e passagem lateral do Y com variações idênticas ($R1 = 0$ voltas)

6.10.2. Estudo das velocidades iniciais no T e Y

A suposição adotada no item 4.3.3 que resultou nas equações 25 e 26, a qual propunha uma relação direta com a perda localizada para determinar as velocidades de entrada e saída no “T” e no “Y” não se confirmou.

No caso do “T” e do “Y”, a velocidade igual a zero na saída lateral foi a que promoveu o melhor ajuste do modelo. Este fato faz sentido, levando-se em conta a inércia da coluna líquida e também a direção e sentido da aceleração imposta ao escoamento.

Além disso, deve-se satisfazer a condição da continuidade, que foi uma das hipóteses assumidas para a formulação do modelo. Sendo assim, havendo uma conexão com passagem direta para o escoamento, a velocidade deve ser obtida pela aplicação da continuidade, assumindo a velocidade na passagem lateral igual a zero.

No caso de haver uma conexão específica que apresente alguma deflexão em relação a direção da tubulação haverá um choque das partículas do fluido para a mudança de direção. Propõe-se então, a seguinte relação geométrica e empírica para a determinação da velocidade de entrada em conexões com 2 derivações, válida para $0^\circ \leq \beta_2 \leq 90^\circ$ e $0^\circ \leq \beta_3 \leq 90^\circ$:

$$V_2 = \frac{\beta_3}{\beta_2 + \beta_3} V_1 \cdot \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \quad (36)$$

$$V_3 = \frac{\beta_2}{\beta_2 + \beta_3} V_1 \cdot \left(\frac{D_1}{D_3} \right)^2 \quad (37)$$

A Figura 114 ilustra os termos utilizados nas equações acima.

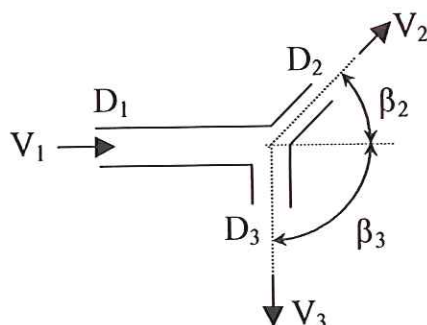


Figura 114 – Geometria para estabelecimento das condições de contorno

Foi analisado o efeito da velocidade de entrada no tubo 2 e tubo 3 após a conexão “T” e “Y”, para outras relações diferentes da proposta acima. Foi mantida a equação da continuidade utilizando-se, para isto, os coeficientes COEF2 e COEF3, positivos e com soma sempre igual a 1 com as seguintes equações:

$$V_2 = COEF2 \cdot V_1 \cdot \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (38)$$

$$V_3 = COEF3 \cdot V_1 \cdot \left(\frac{D_1}{D_3}\right)^2 \quad (39)$$

As figuras a seguir ilustram a aplicação das equações 31 e 32 com variação dos coeficientes para os ensaios com conexão em “Y” e “T” de passagem direta. Os demais parâmetros do modelo foram mantidos conforme ajuste anterior. Os melhores resultados foram obtidos com os coeficientes COEF2 e COEF3 de acordo com as equações 29 e 30, reafirmando a tese levantada.

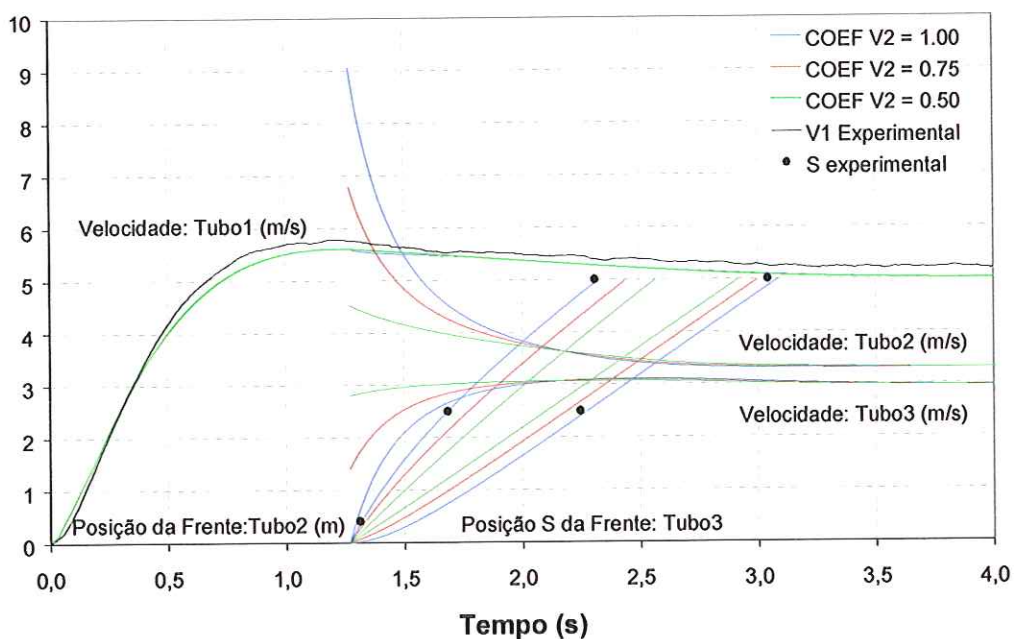


Figura 115 – Efeito das diferentes velocidades iniciais no T passagem direta
(R1 = 0 voltas)

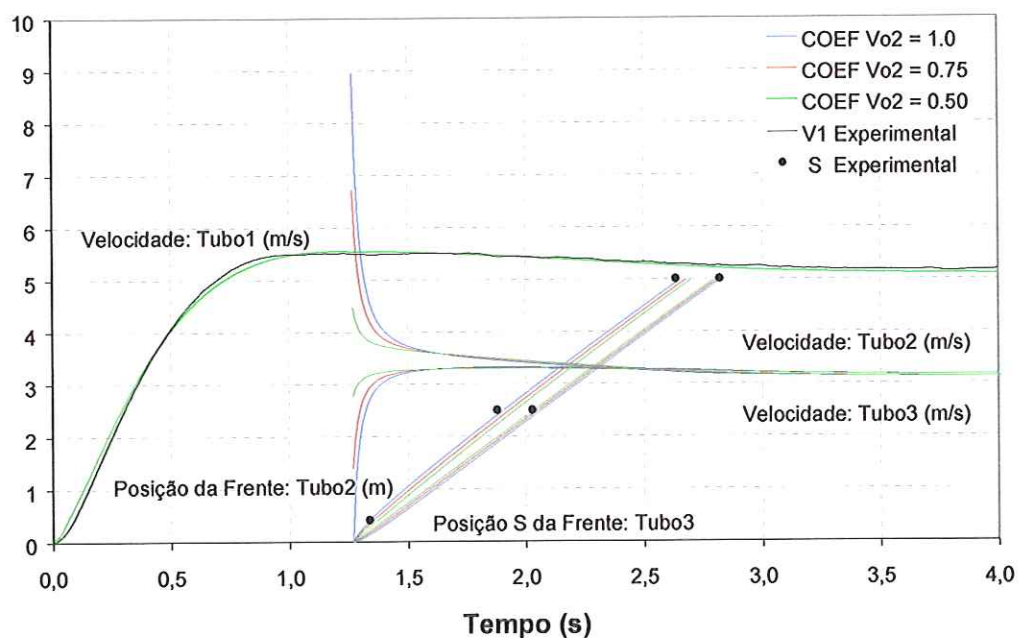


Figura 116 – Efeito das diferentes velocidades iniciais no Y passagem direta
com redução (R1 = 0 voltas)

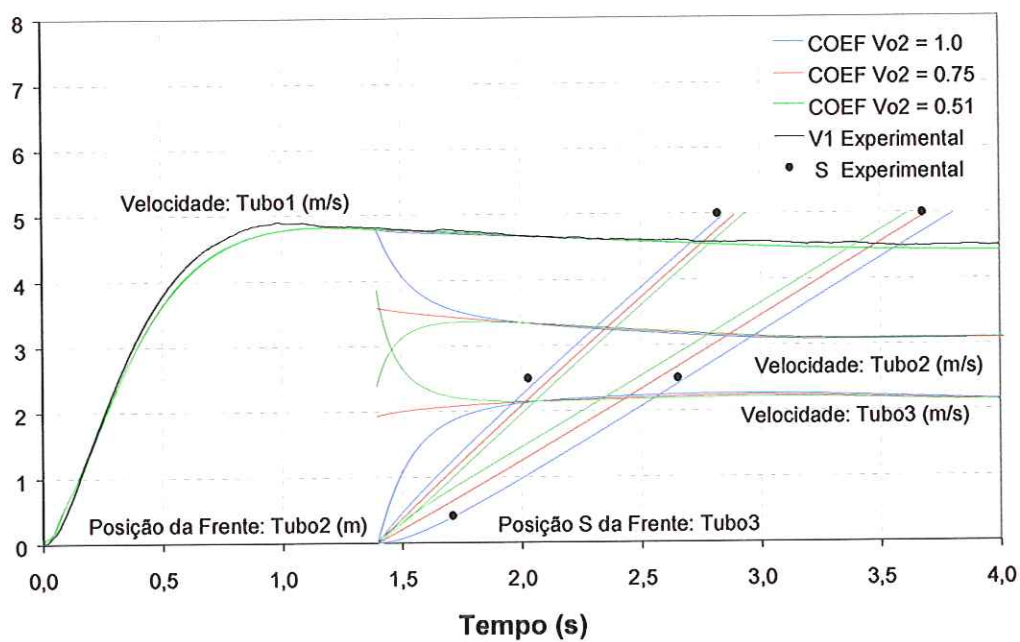


Figura 117 – Efeito das diferentes velocidades iniciais no Y passagem lateral com redução ($R1 = 0$ voltas)

7. CONCLUSÕES

Foram estabelecidos métodos com potencial para aplicação prática na avaliação de pressões e velocidades transitórias durante o período de enchimento de tubulações ramificadas. Além disso, pode-se determinar com boa precisão a posição da frente no tubo.

A principal contribuição desta tese foi quanto ao estabelecimento das condições de contorno, desconhecidas até então para esta situação.

Outra situação levantada foi o efeito, ainda não totalmente esclarecido, do comprimento inicial de aceleração, L_0 , no caso de tubos com ramificação. Não foi possível a determinação teórica ou mesmo empírica de uma relação que permita determinar este comprimento. Isto só seria possível com a utilização de medidores de vazões precisos nas ramificações e com a realização de um estudo específico.

Foi realizada a validação do modelo sob várias condições utilizando-se uma escala inédita em laboratório, mostrando boa concordância entre os resultados obtidos.

O aumento da capacidade e da velocidade de processamento dos computadores foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho. O tempo de processamento para um escoamento de 6 segundos caiu de 5 minutos na fase inicial da pesquisa para em torno de 20 segundos, com a utilização dos recursos atuais, mesmo incluindo no cálculo a variação do fator de atrito em função da velocidade.

8. RECOMENDAÇÕES

A partir deste trabalho, criam-se várias situações potenciais para ampliar o estudo de transitórios hidráulicos.

Seria interessante um estudo utilizando-se o recurso da filmagem da interface ar água, principalmente na ramificação. Isto mostraria com maior clareza o fenômeno que ocorre nestas circunstâncias.

Pode-se realizar um estudo inédito para determinação de critérios teóricos ou empíricos para a determinação do comprimento fictício inicial de aceleração, termo muito importante para o ajuste do modelo. Poderia ser realizado praticamente nas mesmas situações testadas nesta tese. Seria necessário apenas acrescentar medidores precisos da vazão em cada ramificação.

A realização de experimentos com a utilização de inclinação ascendente também poderia permitir um estudo mais amplo das condições de contorno no caso de ramificação, garantindo a integridade da frente independente da velocidade do escoamento.

As considerações da celeridade necessária para garantir a não intrusão de ar, mantendo a integridade da frente para casos de inclinação descendente da canalização poderiam ser revisadas e testadas em laboratório.

Para aumentar a precisão dos estudos, seria interessante a realização de ensaios da perda localizada em cada peça a ser utilizada, se possível com a determinação de seu coeficiente em função da velocidade.

Fica aberta a possibilidade de associação do método aqui utilizado com o método de cálculo considerando-se o aprisionamento de ar na tubulação, nos casos em que o modelo rígido pode ser utilizado.

A generalização do modelo para aplicação em condições mais abrangentes.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTSON, M. L. e ANDREWS, J. S. (1971). Transients caused by air release. *Proc., Control of Flow in Closed Conduits*, J. P. Tullis, Colorado State University, Fort Collins, p.315-340.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1990). *NBR 12214 – Projeto de Sistema de Bombeamento de Água para Abastecimento Público*. 15p., Rio de Janeiro

BENJAMIN (1968). Gravity currents and related phenomena. *Journal of Fluid Mechanics*, v.85, parte 2, p.209-248.

BRUNONE, B.; GOLIA, U. M.; GRECO, M. (1995). Effects of two-dimensionality on pipe transients modeling. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, v.121, n.12, p.906-912, dez.

CABRERA et al. (1992). Influence of liquid length variation in hydraulic transients. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, v.118, n.12, p.1639-1650, dez.

CHAUDHRY, M. H. (1989). Application of lumped and distributed approaches for hydraulic transients analysis. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON CASES AND ACCIDENTS IN FLUID SYSTEMS, São Paulo. Anais. Politécnica - Universidade de São Paulo, v.I, p.72-79, mar.

GUARGA, R.; LORENZO, E.; ACOSTA, A. (1994). Aire atrapado en una tuberia. Analisis de los modelos. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, XVI, Santiago, Chile, 1994. Anais. Santiago, IAHR. p. 355-367, nov.

KOELLE, E., (1998). *Educação continuada em engenharia hidromecânica. Módulo 3: tubulações para transporte de líquidos*. São Paulo, Ed. Koelle Engineering. Parte B: Acessórios de tubulações: ventosas e descargas (dimensionamento, instalação e operação) – Capítulo 3: Enchimento de adutoras.

KREYSZIC, E. (1988). *Advanced engineering mathematics*. New York, John Wiley e Sons.

LIU, C. P. e HUNT, W. A. (1996). Filling of pipelines with undulating elevation profiles. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, v.122, n.10, p.534-539, out.

MAGALHÃES, C. A. C. (1999). *Estudo analítico e experimental dos fenômenos transitórios ocasionados por grandes bolsas de ar confinadas nos sistemas hidráulicos*. São Carlos (Relatório n. 3, referente a bolsa de Doutorado, apresentado à FAPESP - Processo: 96 / 9929-5)

MAGALHÃES, C. A. C. (2001). *Estudo analítico e experimental dos fenômenos transitórios ocasionados por grandes bolsas de ar confinadas nos sistemas hidráulicos*. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MARTIN, C. S. (1976). Entrapped air in pipelines. In: Proc., SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRESSURE SURGES, London, B.H.R.A. Fluid Engineering, p.F2`15-F2`28, set.

PORTO, R.M.(1997) *Hidráulica Básica – 1ª Parte. Escoamento Permanente em Conduitos Forçados*. São Carlos. Editora EESC USP.

RESNICK, R. e HALLIDAY, D. (1976). *Física I*. Trad. de Márcio Quintão Moreno et al., 2.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos S.A.

SILVESTRE, P. (1979). *Hidráulica Geral*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos S.A. Reimpressão 1985.

STREETER, V. L. (1971). Transients in closed conduit systems. *Control of Flow in Closed Conduits*, J. P. Tullis, Colorado State University, Fort Collins, p.229-255.

SWAMEE, P. K. (1993) Design of submarine pipeline. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, V.119, n.1, p. 159-170, Jan/Fev.

TULLIS, J. P. (1989). *Hydraulics of pipelines*. New York, John Wiley e Sons.

WHITE, F. M. (1991) *Viscous fluid flow*. 2ª ed. Singapore, McGraw-Hill.

ZUKOSKI, E. E. (1966). Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes. *Journal of Fluid Mechanics*, v.25, parte 4, p.821-837.

ANEXO A:**Método Runge-Kutta para N equações diferenciais simultâneas**

WHITE (1991) adaptou um programa para solução N equações diferenciais através do método de Runge-Kutta desenvolvido na Universidade de Michigan na linguagem MAD e vem utilizando essa rotina há mais de 25 anos com sucesso.

Para utilização do método citado, a rotina publicada em WHITE (1991) foi estruturada e otimizada, sendo reescrita na linguagem Visual Basic.

A rotina foi utilizada neste trabalho para a solução de Derivadas de ordem superior. Neste caso, estas foram quebradas em uma seqüência de equações diferenciais de primeira ordem. Esta rotina é muito prática pois permite a solução de n equações diferenciais simultâneas de ordem m.

Exemplo: a solução simultânea das equações diferenciais:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = t^2 - 3 \cdot \frac{dx}{dt} - x^2 + 5 \cdot \frac{dy}{dt} + y^3 \\ \frac{d^2y}{dt^2} = 2 \cdot \frac{dx}{dt} + x + 3 \cdot \frac{dy}{dt} + y^2 \end{cases}$$

pode ser realizado reescrevendo as equações como:

$$F(1) = t^2 - 3 \cdot \frac{dx}{dt} - x^2 + 5 \cdot \frac{dy}{dt} + y^3$$

$$F(2) = \frac{dx}{dt}$$

$$F(3) = 2 \cdot \frac{dx}{dt} + x + 3 \cdot \frac{dy}{dt} + y^2$$

$$F(4) = \frac{dy}{dt}$$

Para facilitar o entendimento, são mostradas a seguir a correspondência das variáveis apresentadas no programa.

$$x = t$$

$$Y(1) = \frac{dx}{dt}$$

$$Y(2) = x$$

$$Y(3) = \frac{dy}{dt}$$

$$Y(4) = y$$

No programa apresentado a seguir, os textos exibidos após uma aspa simples são comentários para um melhor entendimento. O bloco de leitura de dados e condições de contorno devem ser determinados pelo usuário. Os valores apresentados são apenas ilustrativos.

Sub Runge-Kutta()

Dim Y(10), F(10), Q(10), a As Double 'a dimensão dos vetores pode ser fixada de acordo com a necessidade do usuário, mas devem ter todos a mesma dimensão

'Leitura de dados

x = 0 'variável independente

n = 4 'número de eq diferenciais para solução

xlim = 10 'limite de x (que x vai terminar)

h = 0.001 'delta (step size)

'Condições de contorno: entre com os Y(i) conforme o número de Eq. Diferencial

Y(1) = 0 'valor inicial de Y(1) - condição de contorno

Y(2) = 0 'valor inicial de Y(2) - condição de contorno

Y(3) = 0 'valor inicial de Y(1) - condição de contorno

Y(4) = 0 'valor inicial de Y(2) - condição de contorno

While x <= xlim

 For m = 1 To 4

 If m = 1 Then

 For i = 1 To n

 Q(i) = 0

 Next

 a = 0.5

 Else

 Select Case m

 Case 2

```

        x = x + 0.5 * h
    Case 4
        a = 1.70710678118655
        x = x + 0.5 * h
    End Select
    For i = 1 To n
        Y(i) = Y(i) + a * (F(i) * h - Q(i))
        Q(i) = 2 * a * h * F(i) + (1 - 3 * a) * Q(i)
    Next
    a = 0.292893218813452
End If
'Entre com as n eq diferenciais F(i)
F(1) = F3(x, Y(1), Y(2), Y(3), Y(4))
F(2) = F2(x, Y(1))
F(3) = F5(x, Y(3), Y(4), Y(1), Y(2))
F(4) = F2(x, Y(3))
Next
For i = 1 To n
    Y(i) = Y(i) + h * F(i) / 6 - Q(i) / 3
Next
'Saída dos resultados
Print x, Y(1), Y(2), Y(3), Y(4)
Wend
End Sub

```

A seguir, encontra-se o programa original apresentado por WHITE (1991):

```

Dim Y(10), F(10), Q(10)
DATA 0, 1, 2, 2, 0, 1

```

```

READ x, n, xlim,h,m,y(1)
48 If x > xlim Then STOP
GoTo 500
50 If k = 1 Then GoTo 60
If k = 2 Then GoTo 90
60 F(1) = (The given 1st derivative)
GoTo 500
90 Print x,y(1)
GoTo 48
500 REM The Routine for Runge:
m = m + 1
If m = 1 Then GoTo 501
If m = 2 Then GoTo 504
If m = 3 Then GoTo 505
If m = 4 Then GoTo 503
If m = 5 Then GoTo 507
501 For i = 1 To n
Q(i) = 0
Next
a = 0.5
GoTo 509
503 a = 1.707107
504 x = x + 0.5 * h
505 For i = 1 To n
Y(i) = Y(i) + a * (F(i) * h - Q(i))
Q(i) = 2 * a * h * F(i) + (1 - 3 * a) * Q(i)
Next i
a = 0.2928932
509 k = 1
GoTo 50

```

```
507 For i = 1 To n
Y(i) = Y(i) + h * F(i) / 6 - Q(i) / 3
Next i
m = 0
k = 2
GoTo 50
END
```


ANEXO B:

Relatório Fotográfico



Foto 1 – Vistas do reservatório elevado

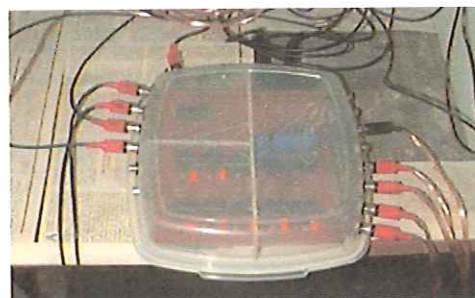


Foto 2 – Sensor de passagem e seu respectivo circuito eletrônico



Foto 3 – Medidor de vazão eletromagnético CONAUT



Foto 4 – Bancada: conversor CONAUT, circuito do sensor de passagem e microcomputador com placa de aquisição de dados.



Foto 5 – Ensaio T passagem direta com redução