



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO
TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE UM
SISTEMA PILOTO DE ABASTECIMENTO
DE ÁGUA**

Luiz Fernando Resende dos Santos Anjo

Orientador: Prof. Dr. José Geraldo Pena de Andrade

Campinas, Agosto de 2003.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA PILOTO DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Luiz Fernando Resende dos Santos Anjo

Orientador: Prof. Dr. José Geraldo Pena de Andrade

Dissertação apresentada à Comissão de pós graduação da Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia civil, na área de Recursos Hídricos.

Campinas, Agosto de 2003.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TEÓRICO E
EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA PILOTO DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Luiz Fernando Resende dos Santos Anjo

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. José Geraldo Pena de Andrade
Presidente e Orientador – FEC - UNICAMP

Prof. Dr. Edevar Luivizotto Júnior
FEC - UNICAMP

Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza
EPUSP

Campinas, 29 Agosto de 2003

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, minhas avós e minhas irmãs pelo carinho, apoio e incentivo, que não me deixaram desanimar mesmo nas horas mais difíceis.

Com profunda saudade, mas com certeza plena de um alegre reencontro, dedico este trabalho aos meus avós Fernando Silva dos Santos Anjo e Manoel dos Santos Anjo, ambos exemplos de trabalho, honestidade e fé cristã.

AGRADECIMENTOS

A DEUS.

Ao Prof. Dr. José Geraldo Pena de Andrade, por sua orientação, pelos conhecimentos transmitidos, sugestões e apoio prestados. Meus sinceros agradecimentos por tudo o que me ensinou, pela confiança em mim depositada e principalmente por sua amizade.

Ao Prof. Dr. Edevar Luvizotto Júnior, um grande amigo e um grande exemplo de profissionalismo. Meus sinceros agradecimentos por suas orientações e conselhos, e, por estar sempre de portas abertas para me receber.

Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa por contribuir com sugestões preciosas para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Recursos Hídricos, fundamentais à minha formação.

Aos meus grandes amigos Fabrício Vieira Alves e Rogério Stacciarinni por todo o apoio que precisava inclusive nas horas mais difíceis. Eles são os meus irmãos que não tive.

Aos meus amigos Edwin (peruano) e César por me ajudarem nos ensaios do laboratório.

Aos meus amigos Aderson, Henry, Rogério (lobão), Marcos, Carlos, Fernando Coelho, Elias, Rodopiano, Ronaldo, Vivien, pelo apoio e pelo prazer de uma alegre convivência.

Aos técnicos do Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos e ao Cláudio da Sait, pela montagem dos equipamentos.

Às secretárias Paula e Miriam.

À CAPES, pelo auxílio financeiro com a concessão de bolsa de mestrado, que muito contribuiu para tornar possível este trabalho.

A todos aqueles que me ajudaram de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE SÍMBOLOS	vi
RESUMO	x
1 INTRODUÇÃO	01
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3 MODELO MATEMÁTICO	11
3.1 Regime permanente	11
3.2 Regime transitório	14
3.2.1 Malhas de cálculo	15
3.2.1.1 Malha regular	15
3.2.1.2 Malha escalonada cruzada	18
3.2.2 Celeridade	20
3.2.3 Modelo topológico	23
3.2.4 Equação do NÓ	25
3.2.5 Equação do ENO não-tubo	27
3.2.6 Condição de contorno	30
3.2.6.1 Válvula	31
3.2.6.2 Reservatório	32
4 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....	33
4.1 Descrição geral	33
4.2 Espaço físico	34
4.3 Sistema de alimentação	38

4.4 Tubulações – módulos em hélice	41
4.5 Painel de conexão ou “protoboard”	42
4.6 Ligações	44
4.7 Elementos do sistema	45
4.8 Central de controle	50
5 SIMULAÇÕES DOS ELEMENTOS DO SISTEMA	55
5.1 Cálculo do regime permanente	57
5.2 Simulação do regime transitório	57
6 MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS	62
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
7.1 Cálculo da celeridade	67
7.2 Análise do transitório	67
8 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ABSTRACT	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Sistema hidráulico: reservatório, tubo e válvula	12
Figura 3.2 - Malha regular	16
Figura 3.3 - Malha regular, Método das Características	16
Figura 3.4 - Malha escalonada cruzada	18
Figura 3.5 - Malha escalonada cruzada, Método das Características	19
Figura 3.6 - Representação esquemática de uma rede	24
Figura 3.7 - Esquema de um NÓ genérico	25
Figura 3.8 - Entroncamento de condutos	26
Figura 3.9 - ENO não-tubo entre NÓS	27
Figura 4.1 - Desenho geral do sistema hidráulico (térreo)	35
Figura 4.2 - Desenho geral do sistema hidráulico (pisos superior)	36
Figura 4.3 - Piso térreo	37
Figura 4.4 - Piso superior	37
Figura 4.5 - Filtro e reservatórios de 1000 (mil) litros cada	38
Figura 4.6 – Detalhe do filtro	39
Figura 4.7 - Conjunto moto-bomba e compressor de ar	39

Figura 4.8 - Reservatório hidropneumático	40
Figura 4.9 - Tubulação de cobre em formato em hélice	41
Figura 4.10 - Tubulação de PEAD em formato em hélice	42
Figura 4.11 - Pannel de conexão	43
Figura 4.12 - Ligações entre elementos do sistema	44
Figura 4.13 - Detalhamento da conexão e do transdutor de pressão	45
Figura 4.14 - Vista geral dos elementos do sistema	46
Figura 4.15 - Detalhe da válvula solenóide	46
Figura 4.16 - Válvulas de controle automáticas	47
Figura 4.17 - Válvulas de medição de vazão	48
Figura 4.18 - Bomba de rotação variável	49
Figura 4.19 - Reservatórios	49
Figura 4.20 - Detalhamento do medidor de nível	50
Figura 4.21 - Sala do microcomputador	51
Figura 4.22 - Estrutura para facilitar o comando dos equipamentos	52
Figura 4.23 - Medidas diretas	53
Figura 4.24 - Representação gráfica dos valores calculados	54
Figura 5.1 - Cálculo do K_s para os engates rápidos	56
Figura 5.2 - Fator de atrito constante com as malhas de integração	58
Figura 5.3 - Fator de atrito por Pereira e Almeida com as malhas de integração	59
Figura 5.4 - Dissipações diferentes da propagação da onda do transitório	60
Figura 5.5 - Modelo proposto por Brunone	60

Figura 5.6 - Comparação de todos os modelos matemáticos	61
Figura 6.1 - Desenho esquemático do painel de conexão	62
Figura 6.2 – Topologia do sistema no painel de conexão	63
Figura 6.3 – Pontos de pressão obtidos em laboratório durante o transitório	64
Figura 6.4 – Visualização da onda de pressão do modelo experimental	64
Figura 6.5 – Ensaio realizado entre os modelos matemáticos e o experimental	65
Figura 6.6 – Aproximação do modelo proposto por Brunone	66

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da seção transversal do tubo.
A_0	constante da equação para a determinação do fator de atrito.
A'	variável associada a equação do ENO não-tubo.
a	celeridade.
a_C	celeridade do cobre.
a_P	celeridade do PEAD.
a_R	celeridade resultante.
B	coeficiente do método das características.
B_E	coeficiente associado a equação do ENO.
B_N	coeficiente associado a equação do NÓ.
B_A, B_B, B_E, B_D	coeficientes associados a equação do NÓ.
B_I e B_{II}	representação genérica das constantes B_A, B_B, B_E e B_D .
B_0	constante da equação para a determinação do fator de atrito.
B'	variável associada a equação do ENO não-tubo.
C	código de identificação do ENO.
C_A, C_B, C_E, C_D	coeficientes associados a equação do NÓ.
C_I e C_{II}	representação genérica das constantes C_A, C_B, C_E e C_D .
C'	variável associada a equação do ENO não-tubo.
C_l e C_t	coeficientes da expressão para a obtenção do fator de atrito.
C^+ e C^-	retas características positiva e negativa.

D	diâmetro do tubo.
$D(t)$	demanda variável no tempo.
E	módulo de elasticidade do material do tubo.
E_E	coeficiente associado a equação do ENO.
E_N	coeficiente associado a equação do NÓ.
e	espessura da parede do tubo.
F	coeficiente associado a equação do ENO não-tubo.
f	fator de atrito da fórmula universal de perda de carga.
f_C	fator de atrito do cobre.
f_P	fator de atrito do PEAD
G	coeficiente associado a equação do ENO não-tubo.
g	aceleração da gravidade.
H	carga hidráulica.
H_i	carga hidráulica na seção i na iteração anterior.
H_{Pi}	carga hidráulica na seção i na iteração atual.
H_R	nível do reservatório.
I	número de ordem.
i	identificador da seção.
i	identificador do NÓ.
J	vetor
j	identificador do tubo.
J	fator de atrito proposto por Brunone
J_S	fator de atrito do regime permanente proposto por Brunone
K_V	módulo de elasticidade volumétrico.
K_D	coeficiente de perda de carga associado à válvula.
K_S	coeficiente de perda de carga localizada.
K	coeficiente experimental
k	identificador do tubo.

L	comprimento do tubo.
MC	número de tubos que converge ao NÓ.
MD	número de tubos que diverge ao NÓ.
$N1$	NÓ de montante.
$N2$	NÓ de jusante.
P	pressão.
Q	vazão.
Q_E, Q_D	vazão nos pontos E e D da malha de cálculo.
Q_i	vazão na seção i na iteração anterior.
Q_{Pi}	vazão na seção i na iteração atual.
Q_{PE}	vazão do ENO não-tubo.
R	constante de atrito.
R_e	número de Reynolds.
T	Período de tempo entre picos consecutivos
T_p	coeficiente de pressão para a obtenção do fator de atrito
t	tempo.
V	velocidade média da seção transversal de um conduto.
V_1	velocidade média da seção transversal de um conduto no ponto 1
V_2	velocidade média da seção transversal de um conduto no ponto 2
x	distância média ao longo do eixo do tubo.
Δx	intervalo de comprimento de tubo.
Δt	intervalo de tempo.
ΔH	perda de carga.
λ	deformação específica.
λ_1	deformação específica longitudinal.
λ_2	deformação específica transversal.
μ_p	coeficiente de Poisson.
ψ	coeficiente associado à geometria e aos vínculos do tubo.
ρ	massa específica.

ε	rugosidade relativa da parede do tubo.
σ	tensão.
δ	operador de Heaviside
γ	peso específico

RESUMO

A operação dos sistemas de distribuição de água foi se tornando cada vez mais complexa. Sendo assim, modelos matemáticos/computacionais foram desenvolvidos com o intuito de permitir simulações que ajudassem no controle operacional destes sistemas. A confiabilidade destes modelos é obtida através da comparação dos resultados obtidos com os dados experimentais. Devido à complexidade dos sistemas, a obtenção de dados experimentais em instalações reais é uma tarefa difícil, tanto na parte operacional como financeira. Procurando sanar esta dificuldade, este trabalho tem como objetivo construir uma instalação experimental piloto que permitirá a comparação teórica/experimental dos vários modelos desenvolvidos, resultando na sua adequação para aplicação em problemas de engenharia.

Palavras Chaves: modelo experimental, modelo matemático.

1 INTRODUÇÃO

Um sistema de abastecimento de água é caracterizado pelo conjunto de dispositivos (bombas, válvulas, reservatórios, equipamentos de controle, etc.) e condutos, destinados ao transporte de um fluido (no caso em estudo - água), com a finalidade de atender os diversos pontos de consumo da cidade, com vazões e pressões convenientes. Na sua operação podem aparecer vários problemas como: oscilação de pressão e de vazão, rompimento das tubulações, perdas por vazamento, falhas em mecanismos de válvulas de controle etc.

Outro fato a ser considerado vem da necessidade de se ter que atender demandas advindas do crescimento populacional, acima dos valores previamente projetados para a instalação, resultando em comportamentos e operações inadequados.

Isso tem levado os gerenciadores desses serviços a buscarem alternativas que contribuam para um melhor gerenciamento e acompanhamento das demandas do sistema, garantindo uma maior confiabilidade operacional. Com um controle operacional adequado, consegue-se atender as necessidades de consumo, fazendo com que os serviços prestados à comunidade sejam satisfatórios e eficazes, evitando assim, desperdícios, contaminações e problemas de oscilações de pressões.

Diversos modelos computacionais têm sido propostos para esses fins. Os programas de simulação computacional tornaram-se numa ferramenta importante, permitindo operar o sistema de forma virtual para o estabelecimento de ações reais de manobras. O modelo elástico, com solução através do Método da Característica (MOC), é uma boa ferramenta para a simulação de manobras em sistemas hidráulicos. Este se baseia no emprego das equações da conservação de

massa e da quantidade de movimento, caracterizando o escoamento em regime permanente ou em regime variável (transitório ou oscilatório), considerando o efeito da elasticidade da água e do tubo.

Um cuidado especial deve ser tomado no que se refere ao comportamento do sistema hidráulico quando submetido a um escoamento transitório como citado acima. Na operação real de qualquer sistema de abastecimento de água é inerente a variação com o tempo das variáveis hidráulicas, comportamento este conhecido como transiente hidráulico. Assim, na modelação, torna-se necessário conhecer o comportamento da instalação devido à variação temporal dessas variáveis, que ocorrem, quase sempre, devido a manobras operacionais (abrir/fechar válvula, ligar/desligar bomba, etc.) sobre o sistema. Deve-se deixar claro que essas manobras podem ser normais ou acidentais, mas para qualquer uma delas o sistema deve responder adequadamente.

A validação desses modelos matemáticos deve ser obtida através da comparação com dados experimentais dos fenômenos modelados. Diante disso mostrou-se oportuna a montagem de uma instalação experimental que permite a coleta de dados confiáveis, para assim, compará-los com os modelos matemáticos.

Este trabalho tem como objetivo montar uma instalação experimental piloto no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), para permitir a simulação de vários fenômenos hidráulicos em várias configurações da instalação. Para exemplificar a operação da instalação, medições envolvendo o regime permanente e transitório foram implementadas. Esses resultados são comparados com os obtidos através dos modelos matemáticos clássicos.

Discutiu-se a problemática das medições experimentais em sistemas hidráulicos, bem como, a definição e a precisão dos parâmetros que melhor representam a instalação e seu comportamento real, pois sabe-se que a precisão das simulações matemáticas/computacionais dependem desse fatores. A definição dos mesmos não é uma tarefa simples, quando se leva em consideração a complexidade de um sistema de abastecimento de água.

Para que se possa entender o comportamento das variáveis do regime permanente e do regime transitório e comprovar os resultados gerados pelo modelo proposto, foram necessárias investigações comparando os resultados das simulações das formulações propostas, com os resultados obtidos nos modelos físicos.

Nessa direção, foi realizado um estudo do comportamento de um sistema hidráulico em regime transitório e a influência das diversas concepções de malhas no MOC, tais como: malha regular, malha escalonada cruzada; e a influência nos resultados devidos às diferentes maneiras de se considerar o atrito: fator de atrito mantido constante durante o escoamento transitório, fator de atrito corrigido a cada intervalo de tempo e fator de atrito avaliado com a inércia do fluido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A hidráulica surgiu da necessidade que o homem teve de transportar água para a agricultura e para as primeiras aglomerações de pessoas, que futuramente viraram cidades. As primeiras obras hidráulicas que se tem notícia foram os canais de irrigação construídos em planícies situadas entre os rios Tigre e Eufrates na Mesopotâmia.

Com o surgimento das cidades, o homem passou a enfrentar problemas de como transportar água dos rios e lagos até suas casas, surgindo, então, a necessidade de sistemas mais complexos de abastecimento de água.

Azevedo Neto (1998) cita que o primeiro sistema público de abastecimento de água foi o aqueduto de Jerwan, que foi construído na Assíria em 691 a.C. Nessa época, ainda não se dispunha de tecnologias avançadas como as atuais. Em relação ao Brasil, o primeiro sistema de abastecimento de água foi construído em 1723 no Rio de Janeiro - RJ. Apenas no século XIX, com o desenvolvimento da produção de tubos de ferro fundido, capazes de resistir a pressões internas relativamente elevadas e o emprego de novas máquinas hidráulicas, é que se conseguiu um progresso rápido e acentuado nessa área.

Pode-se, em geral, dizer então que os elementos que compõem um sistema de abastecimento de água são: bombas, válvulas, reservatórios, condutos, dispositivos de controle, etc. Observa-se, conseqüentemente, que esse sistema é bastante complexo e deve-se ter um conhecimento a fundo de todo o seu comportamento estático e dinâmico. A realização de manobras em elementos específicos como, por exemplo, válvulas e bombas acarretam o surgimento de ondas de pressão, podendo ocasionar o colapso do sistema, fenômeno este

conhecido como transiente hidráulico.

De acordo com Andrade (1994), o estudo desse fenômeno é realizado por vários autores desde o século XIX. Um trabalho clássico sobre transitórios hidráulicos foi apresentado por Joukowski em 1897. Ele conduziu uma série de experimentos, em Moscou, em tubos de comprimentos e diâmetros diferentes. Com base nos resultados experimentais, propôs um tratamento analítico para o fenômeno. Dentre suas importantes contribuições pode-se citar: desenvolveu uma fórmula para a velocidade da onda (celeridade) levando em consideração a elasticidade da água e do tubo, desenvolveu a equação que relaciona a redução de velocidade e o aumento de pressão, discutiu a propagação e reflexão da onda de pressão, e estudou efeitos de alguns dispositivos atenuadores do aumento de pressão, chaminés, reservatórios hidropneumáticos e válvulas de segurança.

Koelle (2001), afirma que, baseados nos estudos realizados por Joukowski, outros autores como Schnyder, Bergeron, Allievi, desenvolveram várias pesquisas nas décadas de 30 e 40 representando o fenômeno transitório graficamente. Em 1960, Parmakian, lançou um livro de tudo aquilo que se tinha estudado anteriormente, sendo até então, o método gráfico a ferramenta utilizada para a solução dos problemas dos transientes hidráulicos.

Com o surgimento dos computadores a partir da década de 60, tornou-se possível a solução numérica das equações básicas que descrevem o transiente hidráulico (equações de conservação de massa e da quantidade de movimento).

Wylie & Streeter (1993), utilizaram o método das características (MOC) na análise do transiente hidráulico, onde transformaram as equações a derivadas parciais em equações a derivadas totais. A integração dessas equações se dá através de retas características (C^+ e C^-) no plano $x-t$, onde os valores de carga e vazão são calculados de maneira progressiva no tempo, partindo-se da condição inicial que normalmente é o regime permanente inicial.

Segundo Koelle (2002), embora o método gráfico seja atualmente superado pelos métodos numéricos, como “ferramenta” para a solução dos transientes, permanece valioso para a

análise e compreensão fenomenológica e deve ser apresentado como recurso didático para a introdução ao estudo dos transientes e ilustração do método das características.

Na solução numérica computacional das equações do transiente hidráulico o atrito merece especial atenção, pois não permanece constante durante o transiente.

Nas modelações iniciais o fator de atrito era considerado constante durante o transiente e sendo igual àquele do regime permanente inicial.

Assim, lembrando-se que no regime permanente a perda de carga (ΔH) num sistema hidráulico é calculada através da fórmula universal de perda de carga de Darcy – Weisbach, como mostra a equação 2.1 abaixo:

$$\Delta H = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.1)$$

O valor V refere-se à velocidade média do fluido, D e L respectivamente ao diâmetro e comprimento da tubulação, g a aceleração da gravidade e f ao fator de atrito. Esse último é função da rugosidade do tubo e do adimensional de Reynolds (viscosidade, massa específica, velocidade do escoamento e do diâmetro da tubulação). Existem equações teóricas/experimentais que permitem o cálculo do coeficiente de atrito nos vários regimes. Essas equações oferecem a dificuldade de apresentar, em alguns casos, o cálculo do fator de atrito implícito. Sendo assim, dentro de precisão adequada, foram desenvolvidas fórmulas explícitas para esse cálculo. A fórmula de Haaland (equação 2.2) é um exemplo disso, porém ela não é válida para o escoamento laminar.

$$\frac{1}{f^{0.5}} = -0.785 \ln \left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{R_e} \right] \quad (2.2)$$

sendo R_e o número de Reynolds e ε a rugosidade absoluta das paredes do tubo.

Outra alternativa é a fórmula proposta por Pereira e Almeida que considera todas as fases do escoamento (laminar e turbulento), como mostra a seguir.

$$f = \left\{ -2 \log \left[(1 - T_P) C_l + T_P C_t \right] \right\}^{-2} \quad (2.3)$$

sendo,

$$C_l = 10^{-\left(\frac{\sqrt{Re}}{16}\right)} \quad (2.4)$$

$$C_t = \left[\left(\frac{6.9}{Re} \right) + \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} \right)^{1.1} \right]^{0.9} \quad (2.5)$$

$$T_P = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{A_0 - Re}{B_0}\right)} \quad (2.6)$$

no qual $A_0 = 3060,6974$ e $B_0 = 250,9080$

Procurando melhorar a influência do atrito na modelação do transiente hidráulico, passou-se a corrigir o fator de atrito a cada intervalo de cálculo pelas fórmulas anteriormente apresentadas. Salienta-se que tal sistemática melhora a precisão dos resultados, mas ainda se comete o erro de não considerar o efeito da inércia da água.

Procurando sanar esse problema outras fórmulas que permitissem a inclusão do efeito da inércia no cálculo do atrito foram desenvolvidas, como é o caso do estudo proposto por Vardy (1993).

Segundo Rocha (1998), a dificuldade de estabelecer valores das constantes do modelo proposto por Vardy para cada tipo de instalação torna-se inviável o seu uso em situações práticas da engenharia.

Brunone et. al.(1991), citado por Viaro (2001), afirma que, no cálculo do fator de atrito em regime transitório, deve-se realizar a soma do termo de atrito, durante o regime permanente, mais uma parcela que é proporcional à aceleração local do fluido na representação da perda de carga. A expressão sugerida por Brunone está transcrita originalmente abaixo:

$$J = J_s + \frac{K}{g} \delta \frac{dV}{dt} \quad (2.7)$$

onde, J_s é o termo de atrito calculado durante o regime permanente, K um coeficiente experimental e δ um operador de Heaviside que vale “um” quando $dV/dt > 0$ ou “zero” caso isto não ocorra.

Segundo o mesmo autor, com o intuito de se corrigir erros computacionais devido à aproximação do termo de atrito e do termo local de inércia, pode apresentar uma nova modelação, segundo a equação 2.8 abaixo:

$$J = J_s + \frac{K}{g} \left(\frac{\partial V}{\partial t} - a \frac{\partial V}{\partial s} \right) \quad (2.8)$$

Na tentativa de se obter o valor de K algumas pesquisas já foram desenvolvidas e apresentadas em alguns trabalhos como o de Brunone (1999).

Além das perdas de carga distribuídas ao longo das tubulações, também deve tomar cuidado com as perdas de carga localizadas ocasionadas por acessórios de natureza diversa, como válvulas, curvas, derivações, registros etc.

De acordo com Porto (1999), para a maioria dos acessórios ou conexões utilizados nas instalações hidráulicas, não existe um tratamento analítico para o cálculo da perda de carga desenvolvida. Trata-se de um campo eminentemente experimental, pois a avaliação de tais perdas depende de fatores diversos e de difícil quantificação.

De modo geral as perdas de carga localizadas, para cada acessório, podem ser expressas por uma equação do tipo:

$$\Delta H = K_s \frac{V^2}{2g} \quad (2.9)$$

em que K_s é um coeficiente adimensional que depende da geometria da conexão, do número de Reynolds e da rugosidade da parede do tubo

Porto (1999) cita que os valores recomendados do coeficiente K_s devem ser entendidos como valores médios, uma vez que a sua determinação experimental é afetada por diversos fatores. Para uma determinada conexão de um certo diâmetro, a perda de carga depende do tipo de acabamento interno da conexão, existência de rebarbas ou cantos vivos e até das condições da instalação no ensaio, como fixação da peça flangeada ou roscada, aperto de rosca etc. Deste modo, a mesma conexão originada de fabricantes diferentes costuma apresentar nos ensaios valores diferentes do coeficiente K_s .

O estudo do comportamento de qualquer sistema de hidráulico, devido o grande número de variáveis envolvidas, torna-se necessária a utilização de programas computacionais que forneçam respostas rápidas e precisas para os mais diversos tipos de operação. Isto, graças à disponibilidade de computadores cada vez mais velozes, modelos matemáticos/computacionais foram desenvolvidos, oferecendo aos engenheiros ferramentas auxiliares para a tomada de decisão. Para isso, é necessária uma representação física/computacional adequada do sistema hidráulico.

Koelle (1982), desenvolveu um modelo topológico para a resolução de tal problema, utilizando uma formulação matemática bastante adequada do MOC para o cálculo do regime permanente e transiente. No seu estudo, a rede hidráulica é dividida em ENOS, que são os elementos que as compõe (válvulas, tubos, bombas, reservatórios etc.) e os mesmos são ligados por pontos denominados NÓS.

Luvizotto Jr. (1995), usou o método elástico e o modelo topológico na elaboração de rotinas de simulação para o controle operacional de redes hidráulicas, em tempo real.

Ribeiro (1985) cita que o aumento crescente da demanda de água faz com que apareçam complicações operacionais em sistemas de distribuição de água que estavam sendo operados com sucesso há anos, levando, em alguns casos, à falta de abastecimento de água à população .

Luvizotto Jr. (1995), afirma que há a necessidade de se criar regras de operação específica para cada rede em estudo. Definidas as regras operacionais, o sistema pode ser operado de várias formas através de um controle de forma isolada (controle local), ou de forma centralizada (controle central).

De acordo com Andrade & Luvizotto Jr. (2002), uma das grandes dificuldades na avaliação de modelos computacionais, para a análise de sistemas complexos de transporte fluido em condutos forçados, como o caso das redes de distribuição dos sistemas de abastecimento de água, é a comprovação física de tais modelos, dada a dificuldade de se obter em uma rede real as informações, com precisão adequada, das variáveis envolvidas. O que se observa na prática é ainda uma certa distância entre o que seria ideal e a realidade.

3 MODELO MATEMÁTICO

A análise do comportamento de um sistema hidráulico requer uma modelação física/matemática adequada para todos os componentes do sistema. Essa modelação deve ser capaz de dar respostas adequadas para os regimes permanente e transiente.

3.1 Regime permanente

A avaliação do regime permanente inicial de um sistema hidráulico deve ser a mais precisa possível pois ela serve de base para qualquer análise futura como, por exemplo, análises de regimes transientes. Estes, só poderão ser coerentes se os seus pontos de partida (regime permanente) também o forem.

Aplicando-se a equação da energia entre dois pontos quaisquer, figura 3.1, por exemplo, entre um ponto localizado na superfície d' água de um reservatório (1) e outro a montante de uma válvula (2), e, considerando que também existam perdas de carga localizadas entre eles, tem-se:

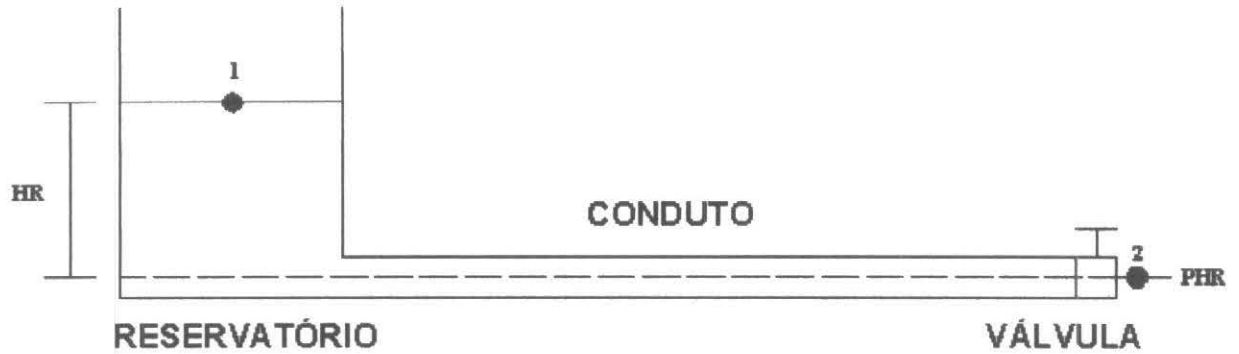


Figura 3.1 – Sistema hidráulico: reservatório, tubo e válvula.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} + \sum K_s \frac{V^2}{2g} + K_D \frac{V^2}{2g} \quad (3.1)$$

Sabe-se que a pressão atuante na superfície da água é a pressão atmosférica e que seu valor, em termos efetivos, vale zero. Considerando-se desprezível a velocidade V_1 , quando comparada com a velocidade interna no tubo (V_2) e adotando-se um Plano Horizontal de Referência (PHR) sobre o eixo do tubo, obtém-se os valores de Z_1 e Z_2 que valem, respectivamente, H_R (altura do reservatório) e zero. O valor da vazão resulta em:

$$Q = \left(\frac{2gH_R}{1 + \sum K_s + K_D + \frac{f_i L_i}{D_i}} \right)^{\frac{1}{2}} A \quad (3.2)$$

onde Q é a vazão, A a área da seção transversal, K_D o coeficiente de perda de carga associado à válvula e i é o índice referente aos tubos de geometrias e materiais diferentes.

Para se calcular a vazão deste sistema hidráulico e conseqüentemente obter a pressão num ponto qualquer, deve-se conhecer com bastante precisão o atrito nas paredes dos tubos (fator de atrito - f) e os coeficientes de perdas de carga localizada dos acessórios (K_s) e da válvula (K_D).

Para o cálculo do fator de atrito, adota-se inicialmente um valor para o mesmo e calcula-se, conseqüentemente, o valor da vazão. Com essa vazão, encontra-se o novo valor do fator de atrito pela equação (2.3) de Pereira e Almeida. Comparando-se esse valor com o que foi adotado inicialmente, caso a diferença seja maior que um determinado erro admissível, refaz-se esse processo iterativo até que haja uma convergência.

Quanto aos coeficientes de perda de carga, estes encontram-se tabelados conforme o quadro a seguir, citado por Porto (1999):

Quadro 3.1 – Valores do coeficiente de K_s para diversos acessórios

Acessório	K_s	Acessório	K_s
Cotovelo de 90° raio curto	0,9	Válvula de gaveta aberta	0,2
Cotovelo de 90° raio longo	0,6	Válvula de ângulo aberta	5,0
Cotovelo de 45°	0,4	Válvula de globo aberta	10,0
Curva de 90°, $r/D = 1$	0,4	Válvula de pé com crivo	10,0
Curva de 45°	0,2	Válvula de retenção	3,0
Tê, passagem direta	0,9	Curva de retorno, $\alpha = 180^\circ$	2,2
Tê, saída lateral	2,0	Válvula de bóia	6,0

Cabe aqui lembrar que esses valores acima são valores médios e que mudam dependendo da bibliografia adotada.

Uma vez tendo-se confiabilidade nos resultados obtidos no regime permanente, pode-se passar para uma próxima etapa que é a simulação do regime transiente.

3.2 Regime transitório

Para a simulação de manobras em sistemas hidráulicos é utilizado o modelo elástico, cujas leis que regem esse fenômeno são representadas pelas seguintes fórmulas:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{equação da continuidade}) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (\text{equação da quantidade de movimento}) \quad (3.4)$$

sendo que H e Q referem-se respectivamente à carga hidráulica e vazão, numa distância x ao longo do tubo, num instante de tempo t qualquer. Onde “ f ” é o fator de atrito, “ A ” a área da seção transversal do tubo, “ g ” a aceleração da gravidade e “ a ” a celeridade (velocidade de propagação da onda de pressão).

Estas equações permitem descrever as variações de carga e de vazão no tempo ao longo da tubulação, válidas em qualquer ponto do plano (x,t) .

O par de equações 3.3 e 3.4 forma um sistema de equações de derivadas parciais do tipo hiperbólico, sem solução analítica. Uma das técnicas numéricas mais utilizadas na solução dessas equações é o método das características (MOC), que permite transformar estas equações em dois pares de equações a derivadas totais, válidas, respectivamente, ao longo das retas C^+ e C^- como indicado:

$$\begin{aligned} \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dQ}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2DA} &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= +a \end{aligned} \quad (3.5a,b)$$

$$\begin{aligned} \frac{-gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dQ}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2DA} &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= -a \end{aligned} \quad (3.6a,b)$$

Torna-se fácil a integração das equações (3.5a) e (3.6a), ao longo das retas características (3.5b) e (3.6b), através da discretização de uma malha no plano (x, t) para uma aproximação de ordem mista do termo de vazão $(Q_p|Q|)$.

Conhecendo-se as condições iniciais de carga e vazão (regime permanente inicial), a cada novo acréscimo de tempo (Δt), encontra-se um novo par de valores de carga e vazão.

3.2.1 Malhas de cálculo

Para a integração das equações foram testados dois tipos de malhas. Vai-se apresentar a malha regular (primeira desenvolvida) e a malha escalonada cruzada (a mais aceita hoje em dia).

3.2.1.1 Malha regular

Para o cálculo de vazão e pressão, ao longo de uma tubulação, em vários instantes de tempo diferentes, há a necessidade de uma malha com pontos no plano (x, t), como mostra a figura 3.2:

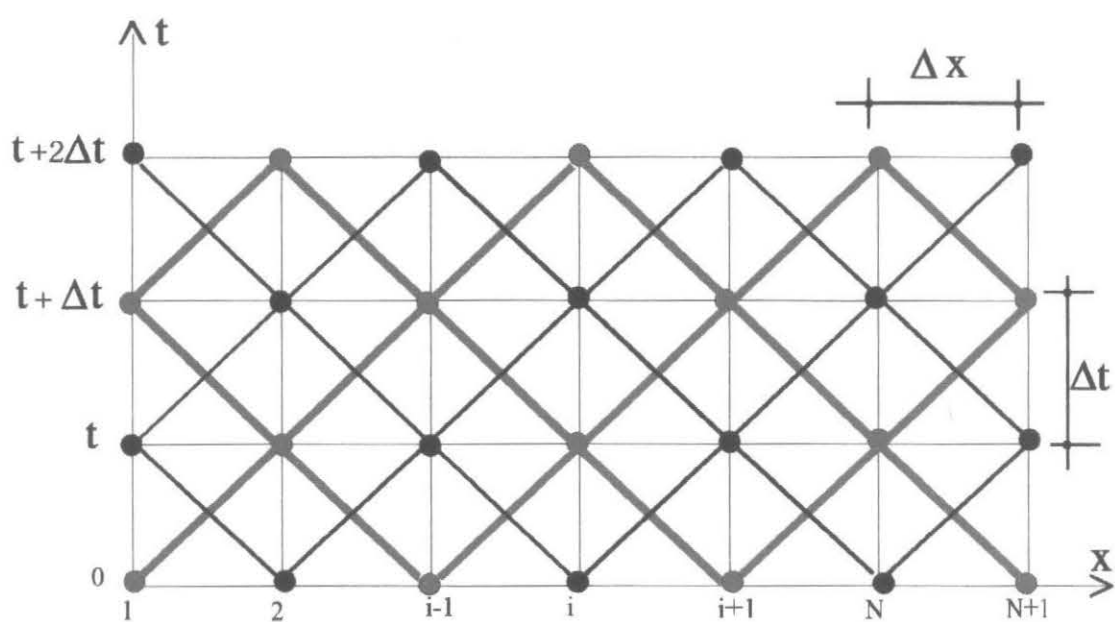


Figura 3.2 – Malha regular.

A figura 3.3 ilustra com nitidez a malha regular para a integração da equação (3.5a e 3.6a), obtendo-se o valor de carga e vazão num ponto P, no instante $(t+\Delta t)$, a partir dos valores conhecidos nos pontos A e B no instante anterior (t) ao longo das retas características C^+ e C^- .

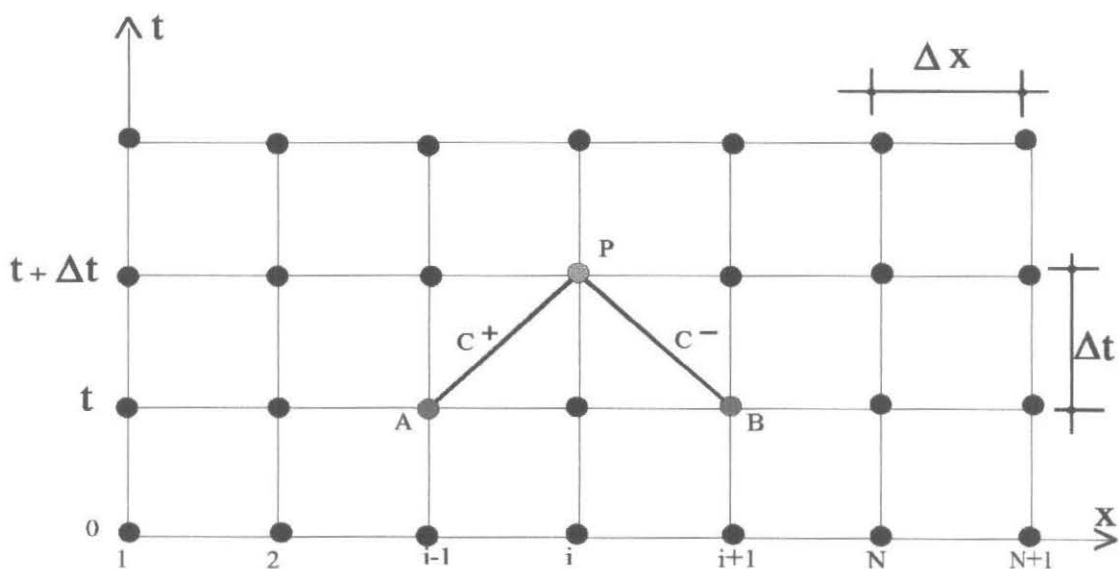


Figura 3.3 – Malha regular, Método das Características.

A integração dessas equações permite obter os valores de pressão e vazão que estão apresentados a seguir:

$$C^+: H_{Pi} = C_A - B_A Q_{Pi} \quad (3.7)$$

$$C^-: H_{Pi} = C_B + B_B Q_{Pi} \quad (3.8)$$

sendo que os valores das vazões Q_{Pi} são encontrados igualando-se as equações 3.7 e 3.8, obtendo-se a equação:

$$Q_{Pi} = \frac{C_A - C_B}{B_A + B_B} \quad (3.9)$$

Os valores de C_A , C_B e B_A, B_B , são constantes referentes aos pontos anteriores conhecidos, são elas:

$$C_A = (H_{i-1} + B Q_{i-1}) \quad (3.10)$$

$$C_B = (H_{i+1} - B Q_{i+1}) \quad (3.11)$$

$$B_A = (B + R |Q_{i-1}|) \quad (3.12)$$

$$B_B = (B + R |Q_{i+1}|) \quad (3.13)$$

sendo R a perda de carga no trecho Δx e B a impedância que são representados, respectivamente, pelas fórmulas:

$$R = \frac{f \Delta x}{2gDA^2} \quad (3.14)$$

$$B = \frac{a}{gA} \quad (3.15)$$

Percebe-se que essa discretização resulta em duas malhas distintas como mostra a figura 3.2. As variáveis de estado, carga (H) e vazão (Q), são obtidas a cada $2\Delta t$, resultando num dobro de esforço computacional para se obter uma informação num determinado intervalo de tempo, além do fato de que a informação no contorno é calculada a dois intervalos de tempo.

Para evitar os inconvenientes da malha anterior e como os recursos computacionais tanto de “hardware” como de “software” estão muito mais rápidos e precisos, desenvolveu-se um outro tipo de malha denominada malha escalonada cruzada.

3.2.1.2 Malha escalonada cruzada

Lembrando-se que a malha regular obtinha resultados a cada intervalo de $2\Delta t$, no caso da malha escalonada cruzada, as informações são obtidas a cada intervalo de tempo Δt , diminuindo assim, o tempo de cálculo do modelo e, conseqüentemente, o esforço computacional. Outro fato importante é que os resultados obtidos a cada intervalo de tempo, traz a influência de todos os pontos calculados no intervalo do tempo anterior, o que não ocorre na malha regular, como mostra a figura 3.4:

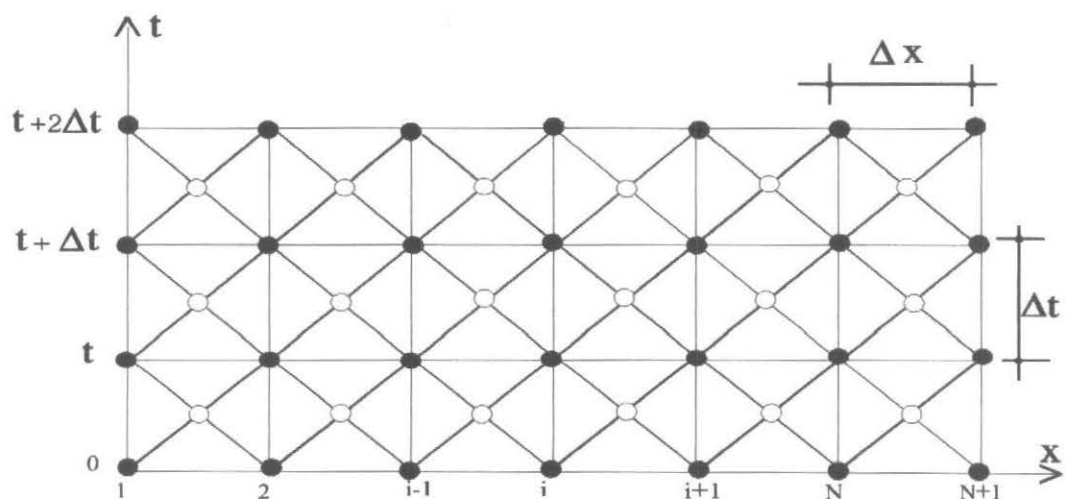


Figura 3.4 – Malha escalonada cruzada.

A malha escalonada cruzada é uma estrutura que permite a integração das equações do transitório de forma mais precisa e sem que o esforço computacional seja muito grande, aumentando a precisão do procedimento numérico, principalmente no tratamento do termo de atrito. Ela faz com que as retas características se cruzem em pontos intermediários (pontos E e D) como mostra a figura 3.5:

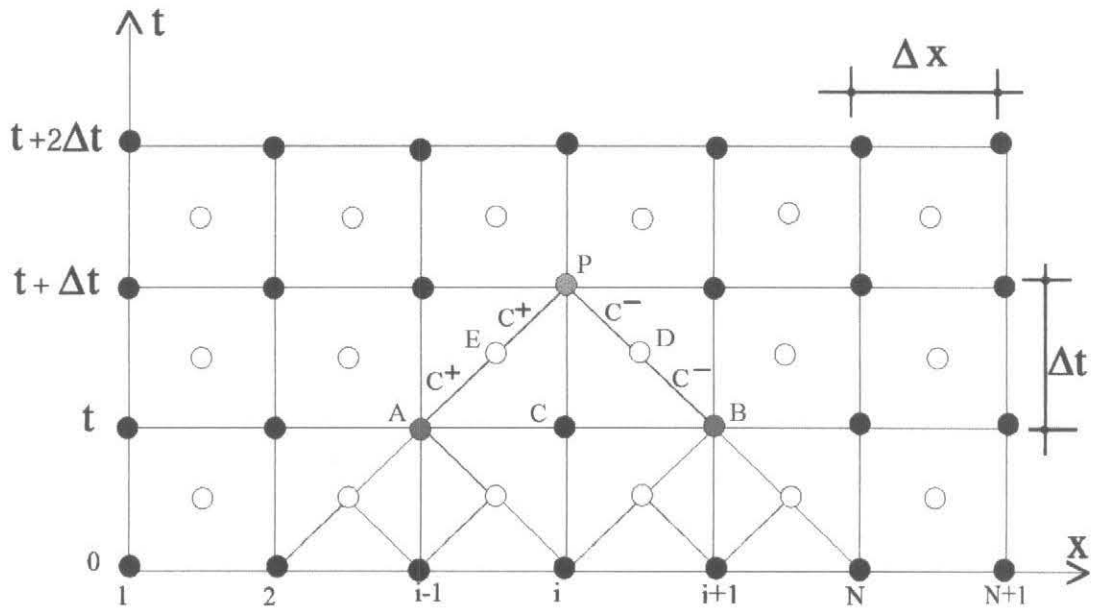


Figura 3.5 - Malha escalonada cruzada, Método das Características.

Integrando-se a equação (3.5a e 3.6a) ao longo das retas características C^+ e C^- obtém-se, primeiramente, os pontos intermediários (E e D) e, em seguida, os pontos posteriores P. Adota-se uma aproximação mista para o termo Q^2 e, para se conservar o sinal da vazão adota-se $Q^2 = Q|Q|$. Assim, obtém-se as seguintes equações:

$$Q_{Pi} = \frac{C_E - C_D}{B_E + B_D} \quad (3.16)$$

$$C^+: H_{Pi} = C_E - B_E Q_{Pi} \quad (3.17)$$

$$C^-: H_{Pi} = C_D + B_D Q_{Pi} \quad (3.18)$$

$$C_E = H_{i-1} + BQ_{i-1} - \frac{R}{2}Q_{i-1}|Q_E| \quad (3.19)$$

$$C_D = H_{i+1} - BQ_{i+1} + \frac{R}{2}Q_{i+1}|Q_D| \quad (3.20)$$

$$B_E = B + \frac{R}{2}|Q_E| \quad (3.21)$$

$$B_D = B + \frac{R}{2}|Q_D| \quad (3.22)$$

$$Q_E = \frac{(H_{i-1} - H_i) + B(Q_{i-1} + Q_i)}{2B + \frac{R}{2}(|Q_{i-1}| + |Q_i|)} \quad (3.23)$$

$$Q_D = \frac{(H_i - H_{i+1}) + B(Q_i + Q_{i+1})}{2B + \frac{R}{2}(|Q_{i+1}| + |Q_i|)} \quad (3.24)$$

3.2.2 Celeridade

A celeridade (a) é a velocidade de propagação de uma onda de pressão (sobrepresão ou depressão) na tubulação, surgida devida a manobras numa instalação hidráulica.

Ela depende das características do fluido (K_v, ρ), das características do material da tubulação (E), da geometria e dos vínculos da tubulação (ψ). Ela é obtida matematicamente pela equação a seguir:

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K_v}{\rho}}{1 + \frac{K_v}{E} \psi}} \quad (3.25)$$

sendo K_v o módulo de elasticidade volumétrico.

A determinação do adimensional (ψ) é dada pela expressão:

$$\psi = \frac{\Delta A}{A} \frac{E}{\Delta P} \quad (3.26)$$

A deformação transversal relativa ($\Delta A / A$) da tubulação é provocada pela variação da pressão (ΔP). O tipo de estrutura e as condições de assentamento (vínculos) definem as condições de sua deformação.

No caso de uma tubulação rígida, por exemplo, não ocorre variação na seção transversal ($\Delta A = 0$) e portanto $\psi = 0$, resultando numa celeridade máxima. De acordo com Koelle (1982), essa celeridade assume valores da ordem de 1430 m/s, para água doce.

Para uma tubulação elástica de parede fina (tubulações as quais a relação entre o diâmetro (D) e a espessura (e) é superior a 40, $D/e > 40$), quando submetida a um aumento de pressão interna (ΔP) surge acréscimo de tensões longitudinais ($\Delta \sigma_1$) e transversais ($\Delta \sigma_2$) resultando, respectivamente, a deformações longitudinais e transversais.

A relação entre as deformações específicas (λ) é considerada constante dentro dos limites elásticos para um determinado material. Essa constante é chamada de Coeficiente de Poisson (μ_p):

$$\mu_p = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (3.27)$$

sendo λ_1 e λ_2 respectivamente os valores de deformação específica longitudinal e transversal.

A relação entre tensão (σ) e deformação específica (λ) é proporcional quando esta deformação fica compreendida na fase elástica, não atingindo a fase plástica. Esta relação é definida pela Lei de Hooke:

$$\sigma = \lambda E \quad (3.28)$$

Referindo-se ainda a uma tubulação elástica de parede fina, a constante adimensional (ψ) vale:

$$\psi = \frac{D}{e} - 2\mu_p \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta P} \quad (3.29)$$

Se o movimento longitudinal é restrito pela pressão interna exercida no extremo do tubo (válvula fechada), o valor de ψ resulta:

$$\psi = \left(1 - \frac{\mu_p}{2}\right) \frac{D}{e} \quad (3.30)$$

Se a tubulação for de parede espessa e estiver na mesma situação descrita anteriormente, tem-se:

$$\psi = 2(1 + \mu_p) + \frac{D}{e(1 + \frac{e}{D})} \left(1 - \frac{\mu_p}{2}\right) \quad (3.31)$$

Uma vez calculado o valor de ψ , calcula-se, de forma analítica, o valor da celeridade. A celeridade resultante (a_r), no caso de se ter tubos com materiais diferentes, é obtida pela equação 3.32. A diferença dos diâmetros dos tubos não mostrou-se significativa neste cálculo, sendo assim, desprezada.

$$a_r = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{a_i}} \quad (3.32)$$

onde a_i e L_i correspondem, respectivamente, a celeridade e o comprimento de cada trecho de tubo i .

A determinação da celeridade em modelos experimentais é obtida pela equação:

$$a = \frac{4L}{T} \quad (3.33)$$

onde L é o comprimento da tubulação e T o intervalo de tempo (período) entre dois picos de pressão consecutivos.

Nesse trabalho é feito o cálculo da celeridade para tubos de parede espessa e sua verificação com o valor encontrado no modelo experimental instalado no Laboratório de Hidráulica da FEC.

3.2.3 Modelo topológico

Com relação à codificação dos elementos que compõe a rede, tem-se um modelo topológico bastante adequado representado por Koelle (1982), que facilita a identificação desses componentes e simplifica o tratamento das condições de contorno necessários ao equacionamento do modelo elástico.

Nesse modelo, os elementos que compõe a rede (tubos, válvulas, reservatórios, bombas, etc.) são chamados de ENOs. Qualquer elemento que não seja tubo é denominado ENO não-tubo.

Cada ENO é interligado entre si por pontos denominados de NÓS, formando-se assim um sistema representado por ENOs e NÓS. O autor sugere que em cada NÓ esteja vinculado no máximo a um ENO não-tubo, para facilitar o equacionamento matemático.

A identificação do ENO é feita por um código de tipo (C), que representa o tipo do elemento; o seu posicionamento na rede, isto é, a sua ordem, é representada pelo código (I), um NÓ de montante (N1) e um de jusante (N2), sendo que se atribuí um sentido arbitrário para o escoamento. Desta forma, a identificação completa do ENOS é feita através de um conjunto de vetores do tipo (C, I, N1, N2). A figura 3.6 apresenta um exemplo de uma rede hidráulica da maneira que foi descrita anteriormente.

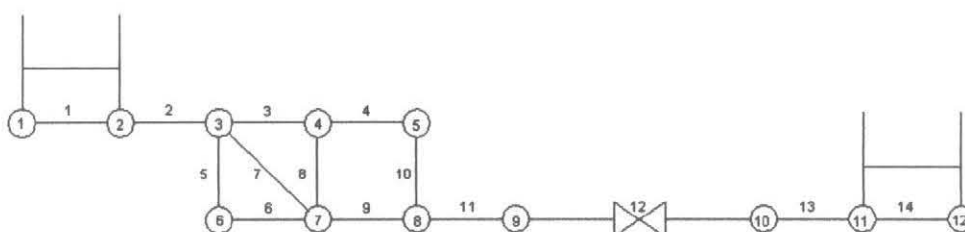


Figura 3.6 – Representação esquemática de uma rede.

Considerando a codificação dos seus elementos, pelo quadro 3.2, tem-se como representação da rede o vetor (J):

$J = (2, 1, 1, 2; 1, 2, 2, 3; 1, 3, 3, 4; 1, 4, 4, 5; 1, 5, 3, 6; 1, 6, 6, 7; 1, 7, 3, 7; 1, 8, 4, 7; 1, 9, 7, 8; 1, 10, 5, 8; 1, 11, 8, 9; 3, 12, 9, 10; 1, 13, 10, 11; 2, 14, 11, 12)$
 ENO1 ENO2 ENO3 ENO4 ENO5 ENO6 ENO7 ENO8 ENO9 ENO10 ENO11 ENO12 ENO13 ENO13

Quadro 3.2 – Codificação dos elementos.

Tipo	Código
Tubos	(1)
Reservatórios	(2)
Válvula	(3)

3.2.4 Equação do NÓ

Numa rede de distribuição de água, em um NÓ qualquer, existe uma quantidade de condutos que podem convergir (MC) ou divergir (MD) suas vazões, dependendo como estas foram arbitradas inicialmente, como mostra a figura 3.7:

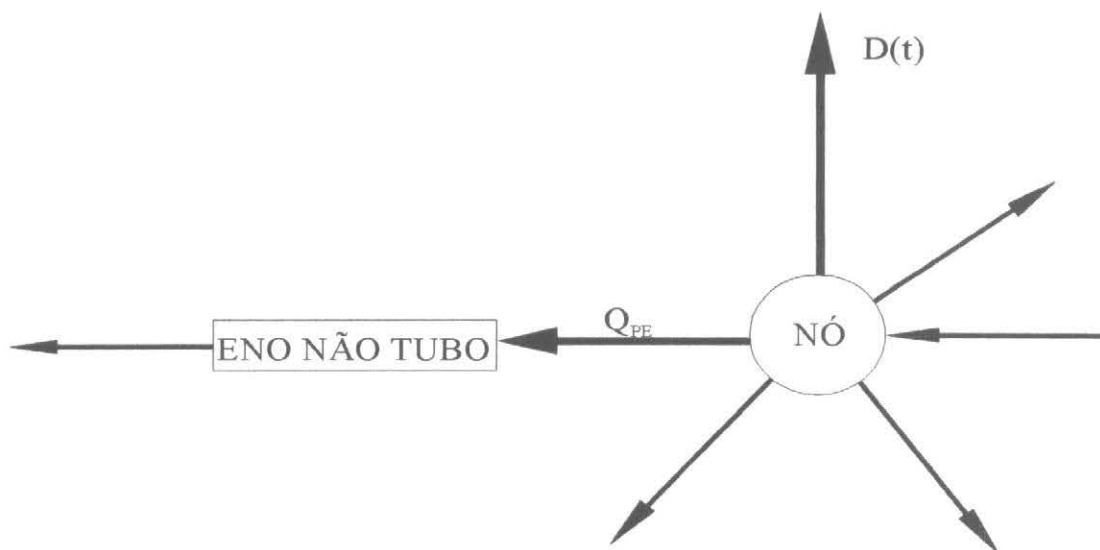


Figura 3.7 - Esquema de um NÓ genérico.

A aplicação da equação da continuidade no NÓ fornece:

$$\sum_{j=1}^{MC} Q_P(j) - \sum_{K=1}^{MD} Q_P(k) - Q_{PE} - D(t) = 0 \quad (3.34)$$

A figura 3.7 ilustra também um ENO não tubo vinculado ao NÓ, que possui uma vazão Q_{PE} e será positiva quando sair do NÓ e negativa quando ocorrer o inverso. Substituindo-se as equações 3.9 ou 3.16 obtém-se a equação do NÓ, como representada a seguir:

$$Q_{PE} = E_{Ni} - B_{Ni} H_{Pi} \quad (3.35)$$

sendo que o índice i refere-se ao NÓ em estudo e E_N e B_N corresponde ao conjunto de “informações” trazidas pelas retas características das extremidades dos tubos que convergem e divergem ao NÓ. São obtidas pelas fórmulas:

$$E_{Ni} = \sum_{j=1}^{MC} \frac{C_I(j)}{B_I(j)} + \sum_{k=1}^{MD} \frac{C_{II}(k)}{B_{II}(k)} - D_i(t) \quad (3.36)$$

$$B_{Ni} = \sum_{j=1}^{MC} \frac{1}{B_I(j)} + \sum_{k=1}^{MD} \frac{1}{B_{II}(k)} \quad (3.37)$$

sendo que os índices j e k referem-se aos condutos vinculados ao NÓ, respectivamente aos que convergem (MC) e aos que divergem (MD), as constantes C_I, C_{II} e B_I, B_{II} são respectivamente as constantes das equações 3.10 a 3.13, no caso da malha regular e 3.19 a 3.22 no caso da malha escalonada cruzada e $D_i(t)$ refere-se à variação da demanda com o tempo.

Se não houver um ENO não-tubo vinculado ao NÓ, tem-se um caso particular onde $Q_{PE} = 0$ e o NÓ é apenas um entroncamento de tubos, como mostra a figura 3.8.

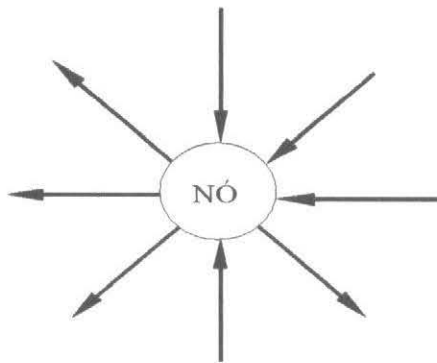


Figura 3.8 - Entroncamento de condutos.

Logo, tem-se que a equação do NÓ tipo entroncamento fornece diretamente a carga no NÓ:

$$H_{Pi} = \frac{E_{Ni}}{B_{Ni}} \quad (3.38)$$

Uma vez determinada a carga no NÓ, encontram-se as vazões $Q_P(j)$ e $Q_P(k)$ referentes, respectivamente, aos tubos que convergem e divergem a esse NÓ. São elas:

$$Q_P(j) = \frac{C_I(j) - H_{Pi}}{B_I(j)} \quad (3.39)$$

$$Q_P(k) = \frac{H_{Pi} - C_{II}(k)}{B_{II}(k)} \quad (3.40)$$

3.2.5 Equação do ENO não-tubo

Para o equacionamento do ENO não-tubo, ele deve estar compreendido entre dois NÓS, como mostra a figura 3.9 abaixo:

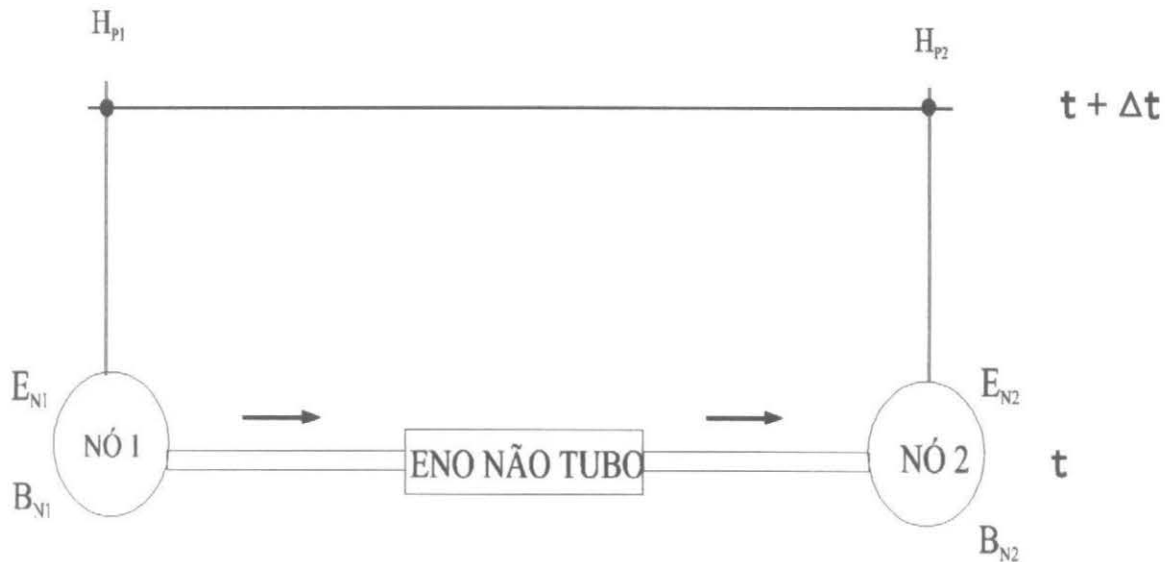


Figura 3.9 – ENO não-tubo entre NÓS.

Para cada NÓ, usa-se a equação 3.35. Pela figura 3.9 observa-se que o NÓ de montante a vazão sai do mesmo e para o NÓ de jusante, ocorre o inverso, logo, o valor de Q_{PE} será positiva para o primeiro e negativa para o segundo, representada, respectivamente, pelas seguintes fórmulas:

$$Q_{PE} = E_{N1} - B_{N1} H_{P1} \quad (3.41)$$

$$-Q_{PE} = E_{N2} - B_{N2} H_{P2} \quad (3.42)$$

Isolando H_{P1} e H_{P2} das equações acima, obtém-se:

$$H_{P1} = \frac{E_{N1} - Q_{PE}}{B_{N1}} \quad (3.43)$$

$$H_{P2} = \frac{E_{N2} + Q_{PE}}{B_{N2}} \quad (3.44)$$

Fazendo-se $H_{P1} - H_{P2}$, encontra-se

$$H_{P1} - H_{P2} = \left(\frac{E_{N1}}{B_{N1}} - \frac{E_{N2}}{B_{N2}} \right) - \left(\frac{1}{B_{N1}} + \frac{1}{B_{N2}} \right) Q_{PE} \quad (3.45)$$

Considerando-se:

$$E_E = \left(\frac{E_{N1}}{B_{N1}} - \frac{E_{N2}}{B_{N2}} \right) \quad (3.46)$$

$$B_E = \left(\frac{1}{B_{N1}} + \frac{1}{B_{N2}} \right) \quad (3.47)$$

encontra-se a equação geral do ENO não-tubo apresentada a seguir:

$$H_{P1} - H_{P2} = E_E - B_E Q_{PE} \quad (3.48)$$

As equações acima, juntamente com as características específicas do ENO não-tubo, permitem a determinação das incógnitas H_{P1} , H_{P2} , Q_{PE} e das grandezas que representam o estado do ENO no instante t do transiente.

Luvizotto (1995) afirma que, de forma genérica, as equações particulares dos elementos não-tubo podem se representadas da seguinte forma:

$$H_{P1} - H_{P2} = A' + B' Q_{PE} + C' Q_{PE} |Q_{PE}| \quad (3.49)$$

denominada equação particular do ENO, sendo que A' , B' e C' são constantes características do elemento não tubo. Combinando-se a equação 3.48 com a 3.49, obtém-se:

$$Q_{PE} |Q_{PE}| + F Q_{PE} + G = 0 \quad (3.50)$$

sendo:

$$F = \frac{1}{C'} (B' + B_E) \quad (3.51)$$

$$G = \frac{1}{C'} (A' - E_E) \quad (3.52)$$

Segundo Koelle (1982), utilizando uma proposta sugerida por Betânio de Almeida, as duas equações acima podem ser escritas de forma única pela seguinte equação:

$$Q_{PE} = - \frac{2G}{F + \sqrt{F^2 + 4|G|}} \quad (3.53)$$

Dessa maneira, conhecendo as condições de contorno dos elementos não-tubos, consegue-se calcular todas as incógnitas (Q_{PE} , H_{P1} , H_{P2} , $Q_P(j)$, $Q_P(k)$) que envolve o ENO não-tubo, os NÓS e os tubos.

3.2.6 Condição de contorno

As condições de fronteira ou de contorno são expressões matemáticas capazes de representar o comportamento físico do escoamento em ENOS não-tubos, interpretando os resultados das manobras executadas nesses elementos durante a ocorrência do transiente hidráulico.

De acordo com Evangelista (1969), citado por Koelle (1982), tais expressões podem ser classificadas em dois grupos:

- Não-dinâmico $\Rightarrow$ a relação entre H e Q é definida a priori na concepção da instalação. Ex: reservatórios de nível constante, entroncamento de vários condutos, orifícios aberto para a atmosfera, etc.
- Dinâmico $\Rightarrow$ quando a relação H e Q está vinculada à evolução do transiente, não podendo ser previamente vinculada. Ex: bombas, reservatórios hidropneumáticos, chaminés de equilíbrio, etc.

Para o cálculo do Q_{PE} , utilizando a equação 3.53, há a necessidade de se encontrar os valores de F e G obtidos pelas equações 3.51 e 3.52, onde os valores de A' , B' e C' são característicos do ENO, apresentados de forma genérica pela equação 3.49.

Para cada tipo de elemento não-tubo, faz-se um estudo de sua condição de contorno, chegando-se a uma determinada equação. Em seguida, compara-se com a equação 3.49, encontrando-se, assim, os valores de A' , B' e C' , podendo-se, então, dar continuidade ao processo.

A representação das fórmulas referentes às condições de contorno dos elementos que compõe uma rede hidráulica, segue a estrutura proposta por Luvizotto (1995). Nesse trabalho os elementos em estudo são: válvulas e reservatórios.

3.2.6.1 Válvula

Considerando-se que o ENO não-tubo da figura 3.9 seja uma válvula, a perda de carga que ocorre entre NÓS corresponde à válvula, vale:

$$\Delta H = K_D \frac{V^2}{2g} \quad (3.54)$$

sendo K_D o coeficiente de perda de carga associado à válvula.

Sabe-se que ΔH é a diferença de carga entre os NÓS 1 e 2. Assim, obtém-se:

$$H_{P1} - H_{P2} = K_D \frac{V^2}{2g} = \frac{K_D}{2gA^2} Q_{PE} |Q_{PE}| \quad (3.55)$$

Comparando-se a equação acima com a equação (3.49), encontram-se os valores das constantes A' , B' e C' da válvula, que valem:

$$A' = B' = 0 \quad (3.56)$$

$$C' = \frac{K_D}{2gA^2} \quad (3.57)$$

Com essas constantes, determinam-se F e G , que valem:

$$F = -\frac{B_E}{C'} = \frac{2gA^2}{K_D} B_E \quad (3.58)$$

$$G = -\frac{E_E}{C'} = -\frac{2gA^2}{K_D} E_E \quad (3.59)$$

Assim, consegue-se obter o valor de Q_{PE} através da equação (3.53) e as cargas nos NÓS de montante e jusante através das equações (3.43) e (3.44), respectivamente.

3.2.6.2 Reservatório

Observando novamente a figura 3.9, considera-se agora, que o ENO não-tubo é um reservatório de nível constante (caso particular da condição de contorno). Conhecendo-se o seu nível (H_R), encontram-se as cargas no NÓS:

$$H_{P1} = H_{P2} = H_R \quad (3.60)$$

Como não existe variação de carga entre NÓS, considera-se que a vazão (Q_{PE}) é nula:

$$Q_{PE} = 0 \quad (3.61)$$

4 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

A instalação experimental piloto foi construída no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Campinas.

4.1 Descrição geral

O modelo consiste num sistema de bombeamento de água filtrada a partir de dois reservatórios de 1000 litros d'água cada, com duas bombas, podendo ser associadas em série ou em paralelo, que alimentam um reservatório hidropneumático (pressões de até 50 m.c.a.) a montante do sistema hidráulico. Nesse trabalho são utilizadas bombas em série.

Com o intuito de simular diversas estruturas hidráulicas, como por exemplo, uma rede de distribuição de água, a jusante deste reservatório hidropneumático foram construídos cinco blocos de testes independentes, sendo que quatro são constituídos de tubulação de PEAD e o quinto de tubulação de cobre. Cada bloco possui aproximadamente 270 metros de tubo instalados na forma circular (hélice cilíndrica), com 1,2 metros de diâmetro. Cada 90 metros de tubo aproximadamente, dos 270 metros de cada bloco, possui uma entrada e uma saída (totalizando-se quinze entradas e quinze saídas) que são conectadas a um painel de conexão podendo-se criar as mais diversas topologias de sistemas hidráulicos.

Nesse painel de conexão ainda encontram-se três válvulas de controle automáticas, duas válvulas de medição de vazão, uma válvula solenóide, uma bomba de rotação variável e as entradas e saídas de três reservatórios cúbicos (aresta de 50cm) em acrílico (totalizando três entradas e três saídas). Cada um dos três reservatórios cúbicos possui um medidor de nível que conhece os níveis d'água nos mesmos.

Nesse painel consegue-se adicionar, em diversos pontos diferentes, todos estes elementos em um sistema hidráulico que se deseja simular. A conexão entre eles é feita por mangueiras de diversos comprimentos com 15 milímetros de diâmetro. Nas suas extremidades encontram-se engates rápidos para se ter uma maior agilidade nesse processo de conexão.

Toda a estrutura foi projetada para que fosse possível se conseguir dados de pressão em dez pontos específicos, ao mesmo tempo, com o uso de transdutores de pressão.

Com todos estes elementos (válvulas, bombas, reservatório, medidores de pressão, etc.) consegue-se executar os mais diversos ensaios de um sistema de abastecimento de água podendo-se realizar várias simulações. Os valores de pressão e vazão obtidos são transmitidos a um microcomputador capaz de gerar diversos gráficos de pressão x tempo, vazão x tempo, etc.

4.2 Espaço físico

Para se ter uma idéia geral de todos os componentes integrantes do modelo físico a figura 4.1 e 4.2, ilustram, respectivamente, o desenho geral do sistema hidráulico do piso térreo e do piso superior.

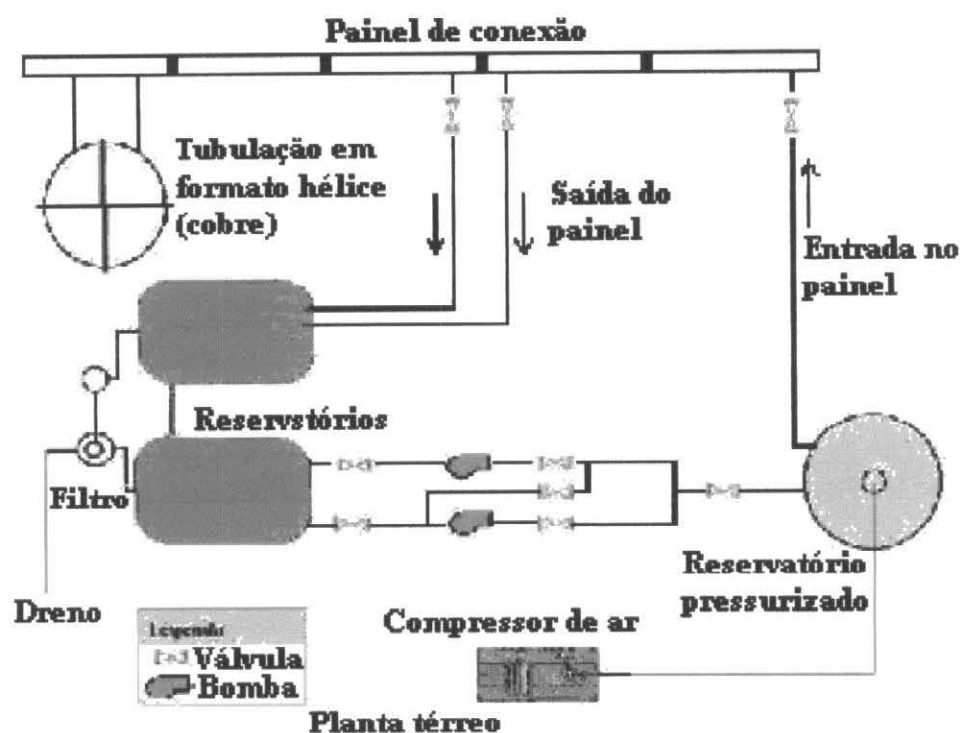


Figura 4.1 - Desenho geral do sistema hidráulico (térreo).

Pela figura 4.1, pode-se observar que o sistema de alimentação inicia-se pelos dois reservatórios, onde a água é recalcada pelo conjunto moto-bomba para o reservatório pressurizado. Em seguida, a partir de uma pressão satisfatória, o reservatório pressurizado alimenta o painel de conexão onde se realiza toda a operação desejada, que, por sua vez, alimenta o módulo de cobre e os quatro módulos de PEAD, figura 4.2, retornando toda a água novamente para os dois reservatórios iniciais, configurando assim, um circuito fechado para a água utilizada na experimentação.

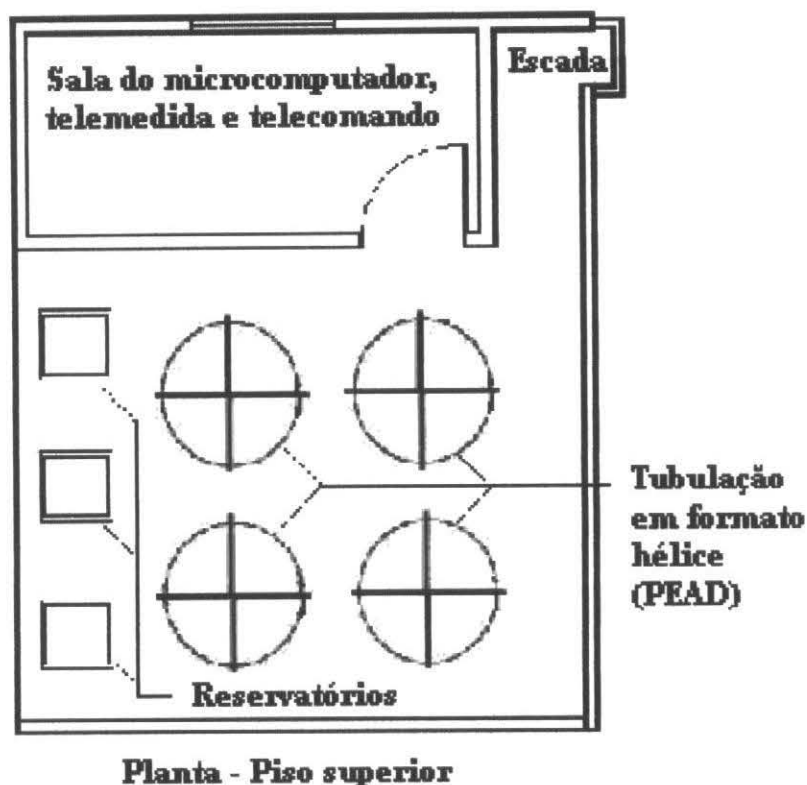


Figura 4.2 - Desenho geral do sistema hidráulico (piso superior).

Conforme está retratada na figura 4.2, observam-se, ainda, três reservatórios, em acrílico, que também estão ligados ao painel de conexão. Todos os resultados obtidos das simulações são armazenados no microcomputador que se encontra situado no piso superior.

A falta de espaço físico dentro da área construída do laboratório de hidráulica da FEC-UNICAMP foi uma das dificuldades encontradas para a construção do modelo físico. Para sanar este problema adotou-se uma ocupação vertical com a criação de um mezanino, em estrutura metálica, surgindo assim um piso térreo e um piso superior.

A figura 4.3 mostra uma visualização real do piso inferior que ficou destinado a receber o painel de conexão com os elementos principais do sistema, todo o sistema de alimentação e as tubulações de cobre.

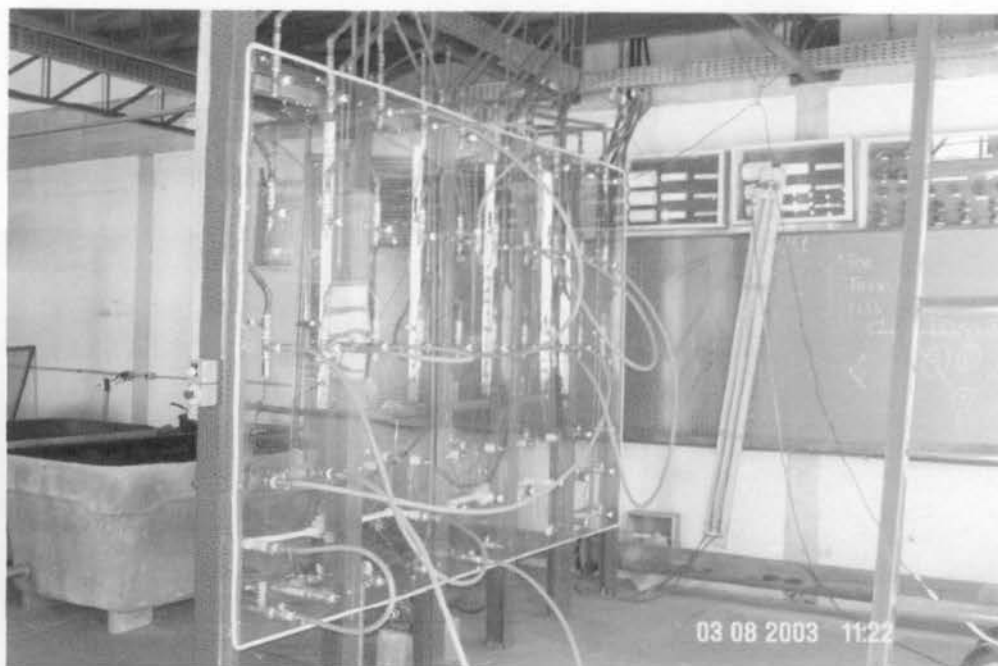


Figura 4.3 - Piso térreo.

A figura 4.4 ilustra a parte superior que ficou destinada a receber as tubulações de PEAD, os reservatórios e a sala de controle.



Figura 4.4 - Piso superior.

O piso do mezanino foi construído de pranchas de madeira revestidas por chapas de borracha, permitindo uma estrutura leve e de fácil furação para a passagem das tubulações e eletrodutos.

Dividindo-se o pé-direito total em dois níveis, obteve-se uma altura total de 3 metros para cada nível. A área total do nível superior é de 21 metros quadrados (3,0m x 7,0m) e a área do piso inferior é mais extensa.

4.3 Sistema de alimentação

O sistema de alimentação do painel de conexão é composto por dois reservatórios, em fibrocimento, assentados ao nível do piso do laboratório, interligados entre si e a um filtro (tipo utilizado em piscina) para a manutenção da qualidade da água, evitando que as partículas danifiquem a instrumentação, como mostra a figura 4.5 abaixo.

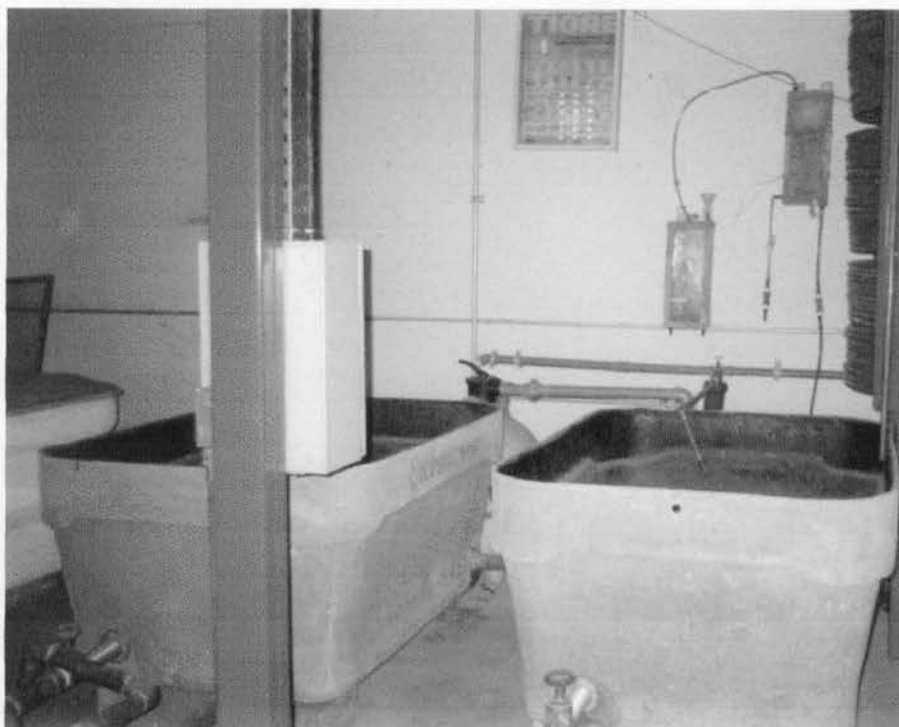


Figura 4.5 – Filtro e reservatórios de 1000 litros cada.

Uma visualização melhor do filtro é ilustrada pela figura 4.6 abaixo:



Figura 4.6 - Detalhe do filtro.

A água contida nos dois reservatórios é recalçada por intermédio de duas bombas, que podem ser ligadas em série ou em paralelo para um vaso de pressão. Para manter a pressão no interior deste vaso é utilizado um compressor de ar que é acionado automaticamente.

A figura 4.7 ilustra o conjunto moto-bomba e o compressor de ar.



Figura 4.7 - Conjunto moto-bomba e compressor de ar.

O vaso de pressão (reservatório hidropneumático) é de grande dimensão, com 2 metros cúbicos de capacidade, garantindo que não ocorram flutuações na carga fornecida por ele que está ligado à parte detrás do painel de conexão. O nível de água no interior do vaso é controlado por sensores de nível, colocados no seu interior.

A composição em série ou em paralelo das bombas, mais a possibilidade de variação de volume de ar comprimido no vaso de pressão, torna bastante versátil o sistema de alimentação, no que se refere às possibilidades de carga e vazão.

O reservatório hidropneumático encontra-se demonstrado na figura 4.8, a seguir:



Figura 4.8 - Reservatório hidropneumático.

4.4 Tubulações – módulos em hélice

Optou-se por tubulações de pequeno diâmetro, ao invés de grandes diâmetros, pois seria inviável no espaço físico disponível. Entretanto, para minimizar os efeitos das perdas localizadas e para que pudessem ser estudados os escoamentos transitórios, cuja velocidade da onda de propagação de pressão é extremamente rápida, adotaram-se longos trechos de tubulações. Para que isto fosse possível, estes tubos foram instalados em módulos em hélice, cada módulo é dividido em três trechos de aproximadamente 90 metros de comprimento, resultando num total de 270 metros de comprimento.

A figura 4.9 ilustra um módulo em hélice de cobre instalado no piso térreo, ao lado do painel de conexão.



Figura 4.9 – Tubulação de cobre em formato em hélice.

Para que possam ser analisadas redes mistas, foram instalados no piso superior mais quatro módulos em hélice de PEAD, como mostra a figura 4.10:



Figura 4.10 – Tubulação de PEAD em formato em hélice.

A estrutura de todos os módulos em hélice foi contraventada nos planos vertical e horizontal, para permitir o posicionamento fixo do módulo, uma vez que o mesmo está sujeito a sofrer deslocamentos devido às flutuações de pressões transitórias.

4.5 Painel de conexão ou “protoboard”

Para se conseguir realizar as mais diversas configurações topológicas possíveis e serem ligados os diversos elementos do sistema, foi necessário tornar a concepção do laboratório a mais versátil possível. Neste ponto, partiu-se para a busca de uma solução em analogia com as placas padrão para a criação de circuitos eletrônicos, as chamadas “protoboards”, resultando num painel de controle, como mostra a figura 4.11 a seguir.

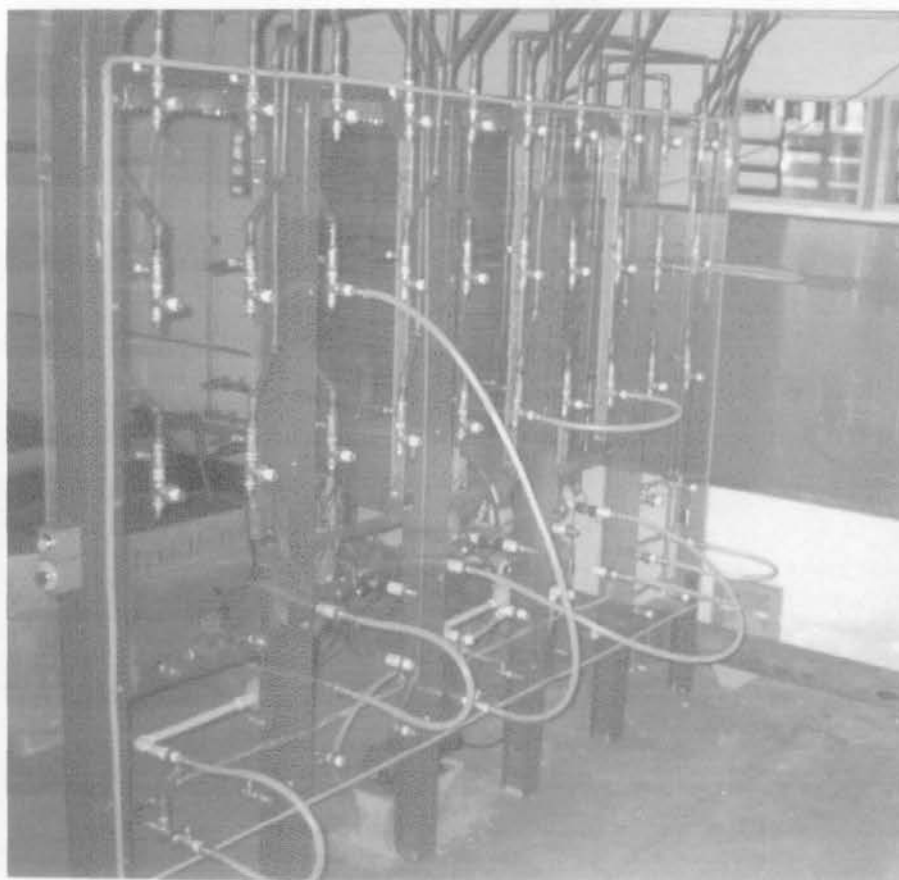


Figura 4.11 - Painel de conexão.

O painel de conexão encontra-se na parte inferior do mezanino (piso térreo). Foi projetado na vertical com terminações para engates rápidos na parte frontal, onde nestas terminações ficam conectados, atrás, todos os elementos hidráulicos e de medições do painel.

Para visualizar mais facilmente qual elemento está se conectando, o painel foi feito de material acrílico. Ele ficou estruturado através de seis colunas metálicas, igualmente espaçadas ao longo de sua extensão de três metros. Na vertical, distancia-se 0,5 m do solo, subindo 2 m de largura da chapa de acrílico de 8 milímetros de espessura.

Todos os furos são igualmente espaçados, resultando num total de 60 pontos de conexão (borners), distribuídos em 6 linhas horizontais e 10 colunas verticais. Nas primeiras 3 linhas (de cima para baixo) do painel, estão conectados os módulos em hélice e as demais linhas aos elementos do sistema.

Para facilitar o entendimento de qual módulo em hélice se está trabalhando, como o painel possui seis colunas metálicas, tem-se, então, 5 faces (espaço entre duas colunas). Cada face está conectada a um módulo em hélice onde, entre cada dois furos, numa mesma linha desta face, significa que existem 90 m de comprimento de tubo desse módulo em hélice.

As quatro primeiras faces estão conectadas aos quatro módulos em hélice de PEAD e a última face, está conectada ao módulo em hélice de cobre.

4.6 Ligações

Para conseguir ligar aos diversos elementos que compõem o sistema, de forma simples e rápida, utilizam-se engates rápidos. As “fêmeas” dos engates rápidos estão rosqueadas em “Tês” ou simples “nipples” que estão instalados na parte frontal do painel. As extremidades “macho” dos engates rápidos estão fixadas às extremidades de mangueiras plásticas de alta resistência e de alguma flexibilidade, como mostra a figura 4.12.

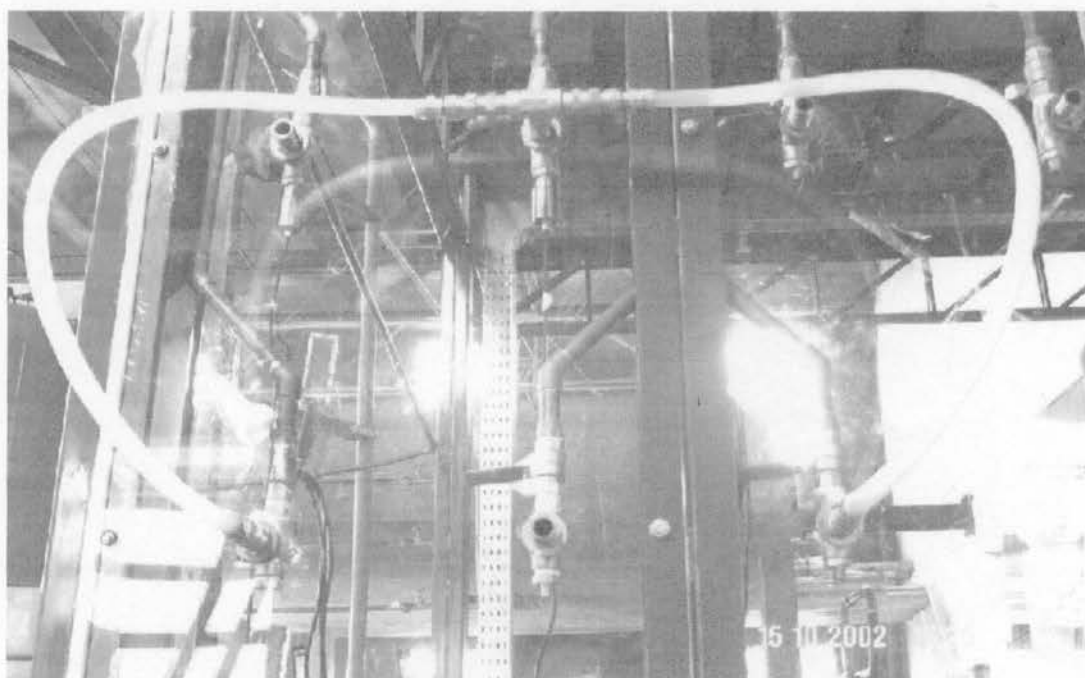


Figura 4.12 - Ligações entre elementos do sistema.

Uma forma mais detalhada de uma conexão pode ser observada na figura 4.13. Ainda na mesma figura, consegue-se visualizar, ao fundo, (por trás do painel), um transdutor de pressão.

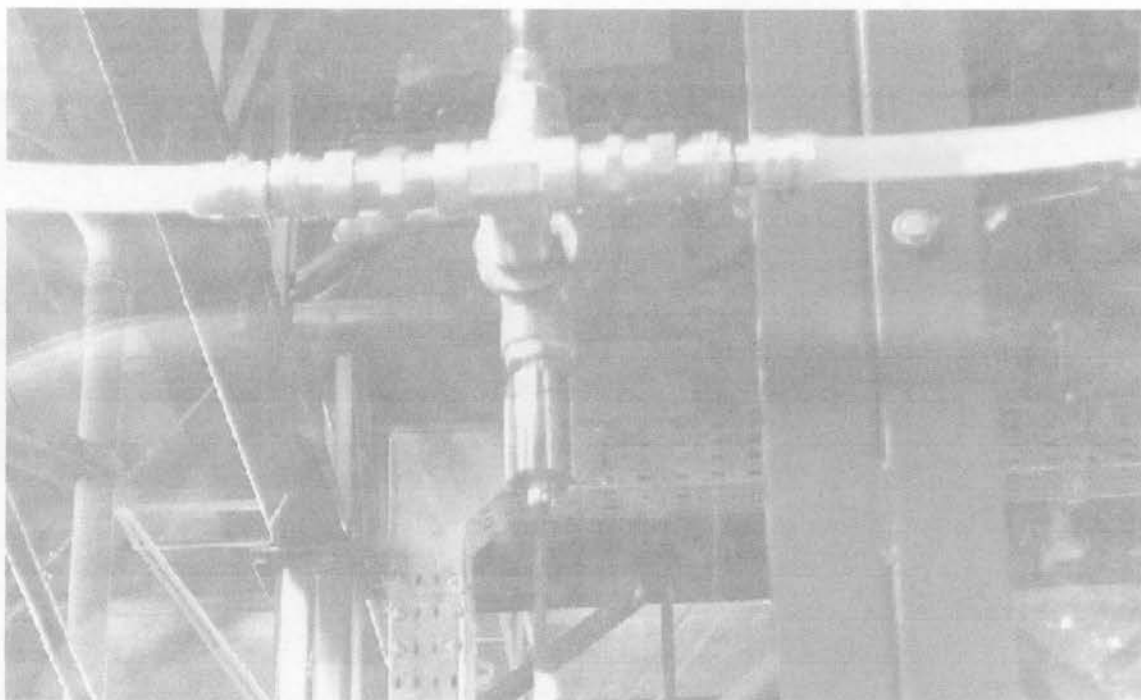


Figura 4.13— Detalhamento da conexão e do transdutor de pressão.

Conexões adicionais ao nó podem ser conseguidas adicionando-se novos elementos, tais como: “Tês” ou “nipples” a um ponto de conexão. A facilidade das conexões simplifica a alteração das topologias, assim, em poucos minutos os ensaios podem ser modificados de uma topologia para a outra.

4.7 Elementos do sistema

Os elementos que compõe o sistema hidráulico, tais como válvulas, bombas, medidores, etc., são fixados na parte de trás do painel, em ligações fixas, como mostra a figura 4.14 a seguir. Todas as mudanças de topologia são feitas na parte frontal do mesmo, facilitando os arranjos a serem ensaiados.

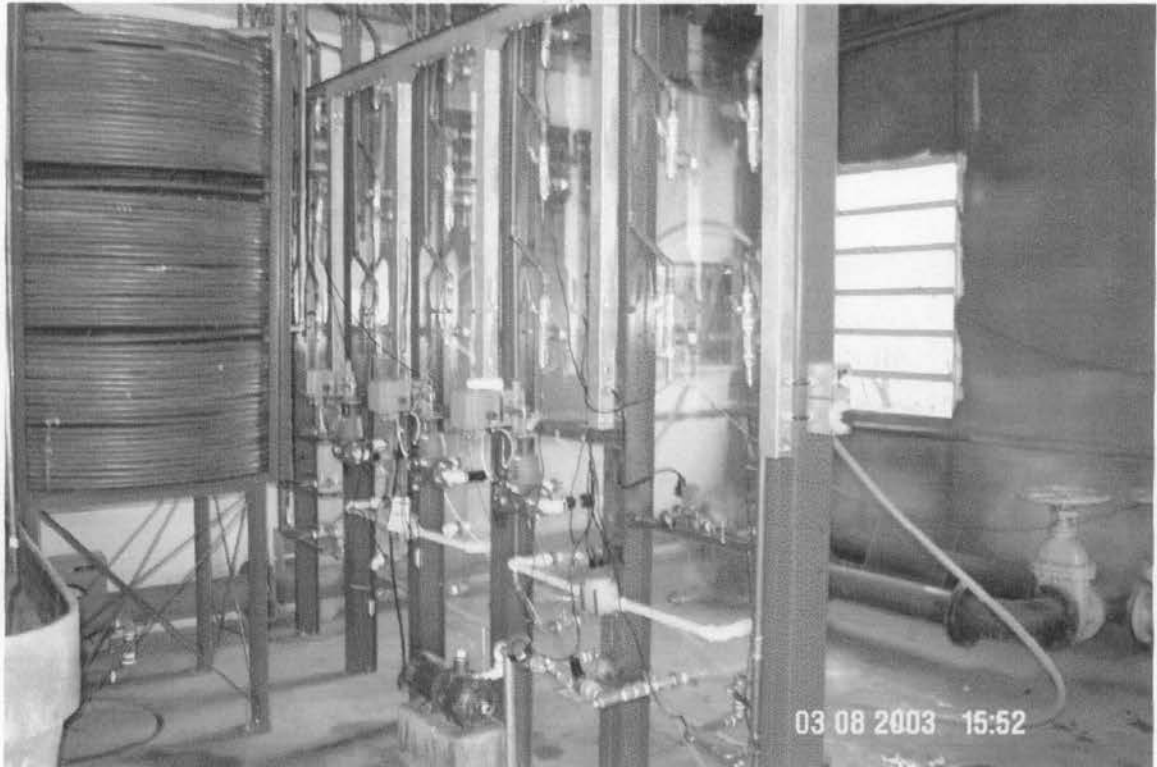


Figura 4.14 – Vista geral dos elementos de sistema.

Um primeiro elemento que pode ser destacado, figura 4.15, é o detalhe de uma válvula solenóide.



Figura 4.15 - Detalhe da válvula solenóide.

Com essa válvula consegue-se criar um transitório num sistema hidráulico pela manobra rápida de fechamento (ou abertura). Observa-se que a mesma encontra-se bem fixada em uma chapa de ferro para evitar o seu deslocamento devido ao transitório, podendo comprometer o painel que é de acrílico.

Para se conseguir o controle da vazão utilizam-se válvulas de controle automáticas, como mostra a figura 4.16. Essas válvulas funcionam a ar comprimido. Com elas, consegue-se realizar manobras de fechamento (ou abertura) que podem amenizar o transitório criado, o que não ocorre na válvula solenóide citada anteriormente.



Figura 4.16 - Válvulas de controle automáticas.

Para se obter valores de vazão utilizam-se os medidores de vazão. Um detalhe de um pode ser visualizado na figura 4.17.

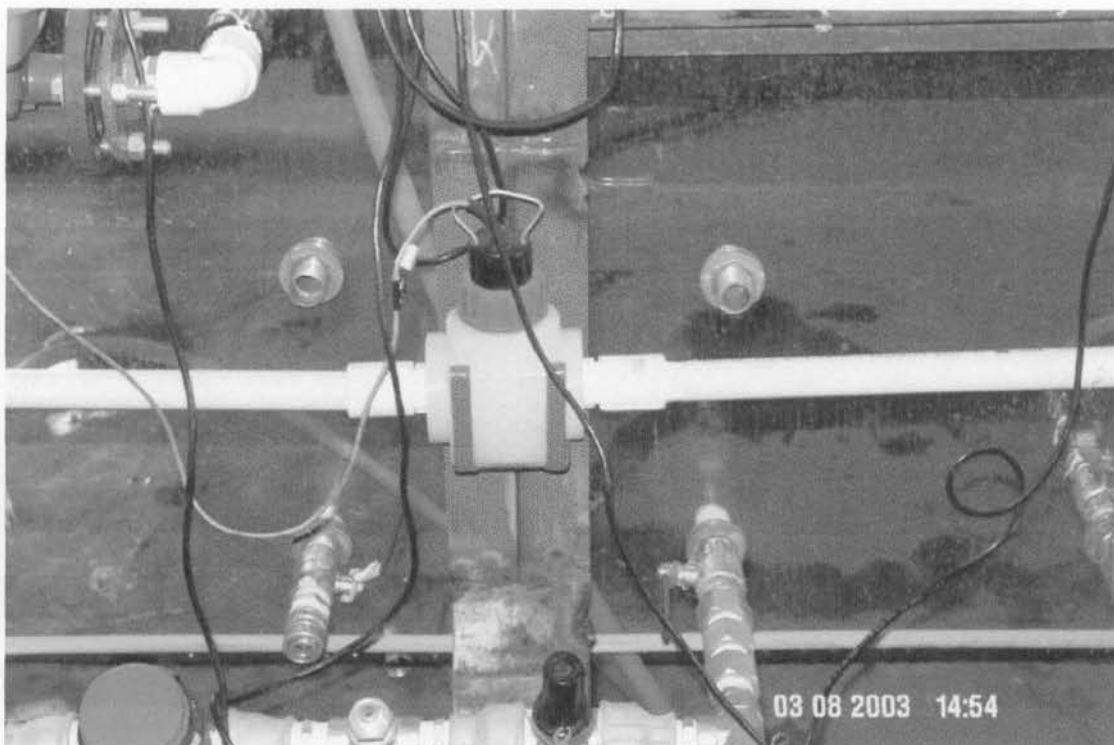


Figura 4.17 - Válvula de medição de vazão.

Com esses medidores de vazão e com os transdutores de pressão, figura 4.13, obtém-se, respectivamente, as variáveis de estado vazão e pressão. Todos os valores obtidos são transferidos para o microcomputador e com eles se gera os mais diversos gráficos (vazão x tempo; pressão x tempo.etc).

Um outro transitório também pode ser criado por uma bomba de rotação variável, figura 4.18, criando-se pulsos no sistema através do seu ligamento ou desligamento. Pelo fato dela possuir uma rotação variável, pode-se, por exemplo, ligá-la com sua rotação e que, em se aumentando gradativamente, ameniza-se o transitório gerado.



Figura 4.18 – Bomba de rotação variável.

Estudos da operação de um sistema hidráulico, mais precisamente de uma rede hidráulica, em período extensivo, também podem ser obtidos nesse modelo físico. Uma análise, por exemplo, seria a influência de um reservatório numa rede hidráulica. Essa análise seria importante para estudos futuros de otimização. Para que isto fosse possível foram construídos reservatórios, em acrílico, situados no piso superior do mezanino, sustentados por colunas metálicas conforme se observa na figura 4.19.

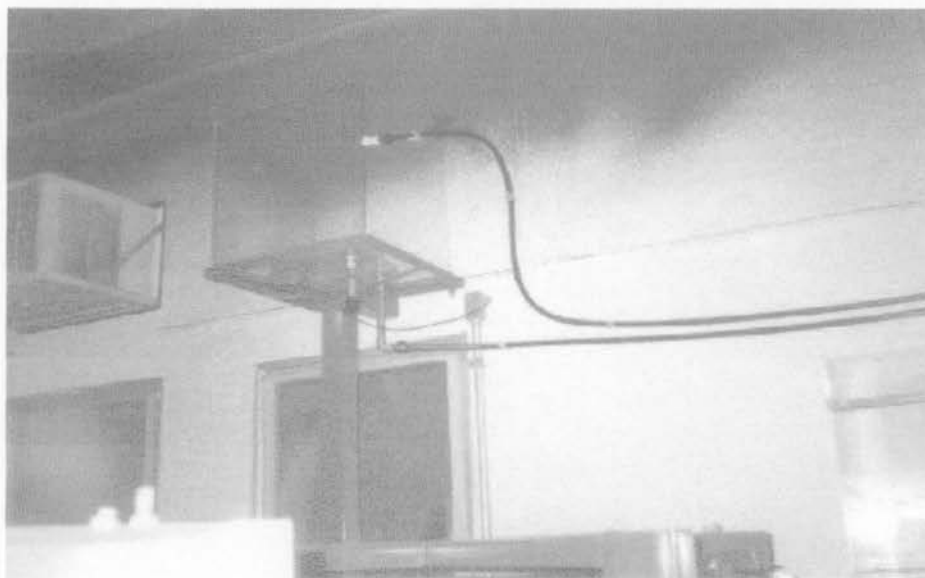


Figura 4.19 - Reservatórios.

Os níveis d'água dentro dos reservatórios, ao longo do tempo, são obtidos por medidores de nível, situados sob os fundos dos mesmos. A figura 4.20 destaca um medidor de nível.



Figura 4.20 - Detalhe do medidor de nível.

4.8 Central de controle

Na parte superior do mezanino foi construído, com divisórias de madeira, um espaço fechado destinado à sala de telemedida e telecomando, armazenando em seu interior, o painel de controle e um microcomputador com o aplicativo SCADA, além de instrumentos de calibração utilizados para calibrar os transdutores, medidores de vazão e demais dispositivos.

A figura 4.21 mostra o painel da central de controle com CLP's, o inversor de frequência do booster e os demais elementos eletroeletrônicos de controle, e, o microcomputador, onde se consegue realizar as operações desejadas e se obter a coleta de dados.



Figura 4.21 - Sala do microcomputador.

A instalação experimental, para permitir o estudo de fenômenos que têm o tempo como variável, deve conter um sistema de aquisição eletrônica de dados. Esse sistema deve ser composto por transdutores, conversor analógico digital e um software que gerencia todo o sistema de aquisição. Como essas medidas são geradas por impulsos elétricos, as conversões são feitas para valores hidráulicos (normalmente pressões), e deve-se ter certeza de que estas conversões estão sendo adequadas e precisas.

Para se conseguir ter acesso aos equipamentos que compõe o modelo experimental e realizar as diversas operações desejadas como: ligar ou desligar as bombas, abrir ou fechar as válvulas etc, o software possui os desenhos esquemáticos de todos esses equipamentos, bastando clicar sobre os mesmos para a operação desejada seja informada. Esta é uma maneira fácil e simplificada de operar estes elementos, como mostra a figura 4.22 abaixo:

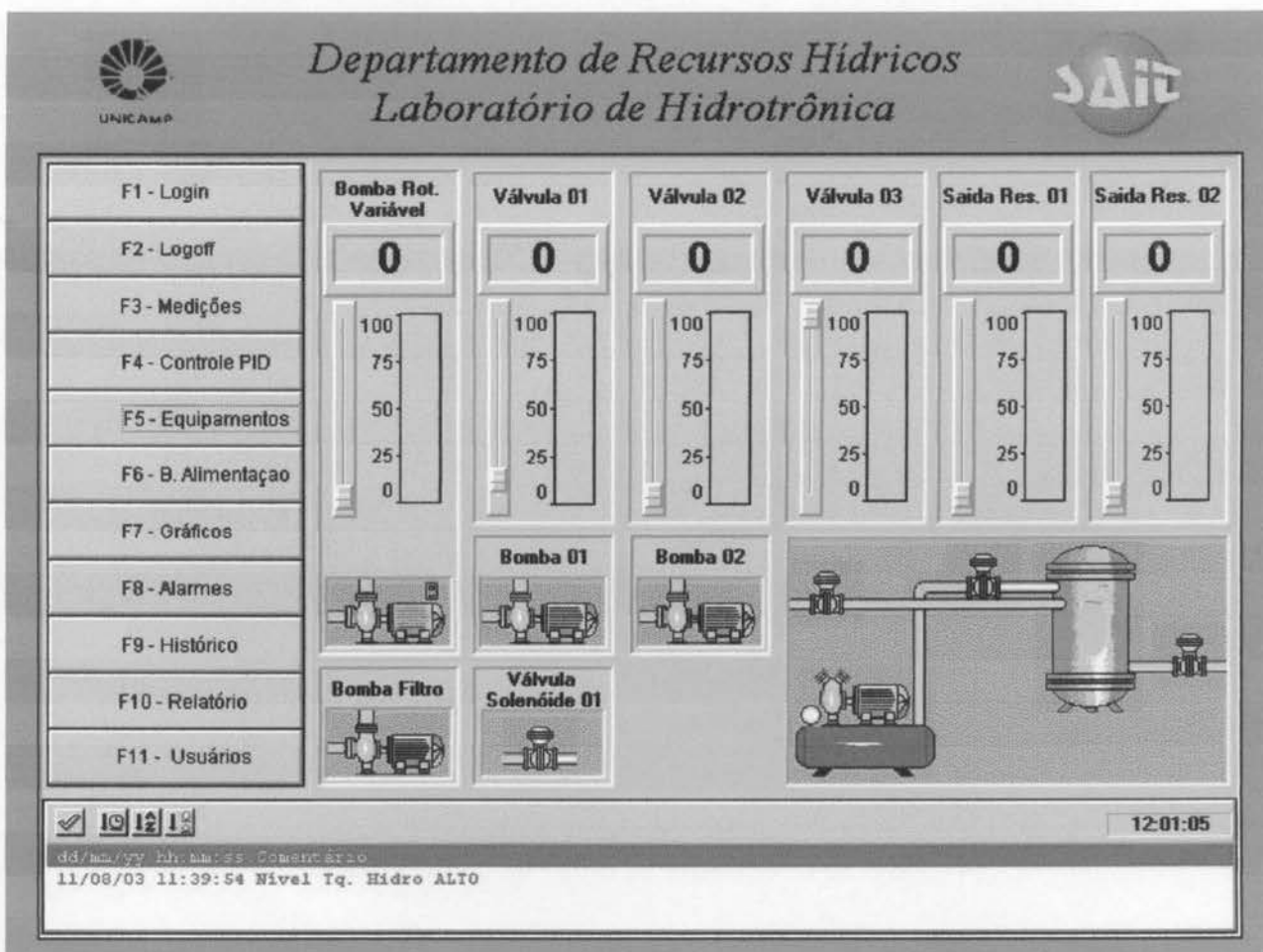


Figura 4.22 – Estrutura para facilitar o comando dos equipamentos.

A figura 4.23 apresenta uma aquisição direta, em tempo real, das medições obtidas no modelo físico. Observa-se que são informados os valores dos transdutores de pressão, dos medidores de vazão, das aberturas das válvulas de controle, da rotação da bomba e dos medidores de nível. Com essa ferramenta consegue-se observar mais facilmente, por exemplo, quando o regime permanente do sistema foi atingido.

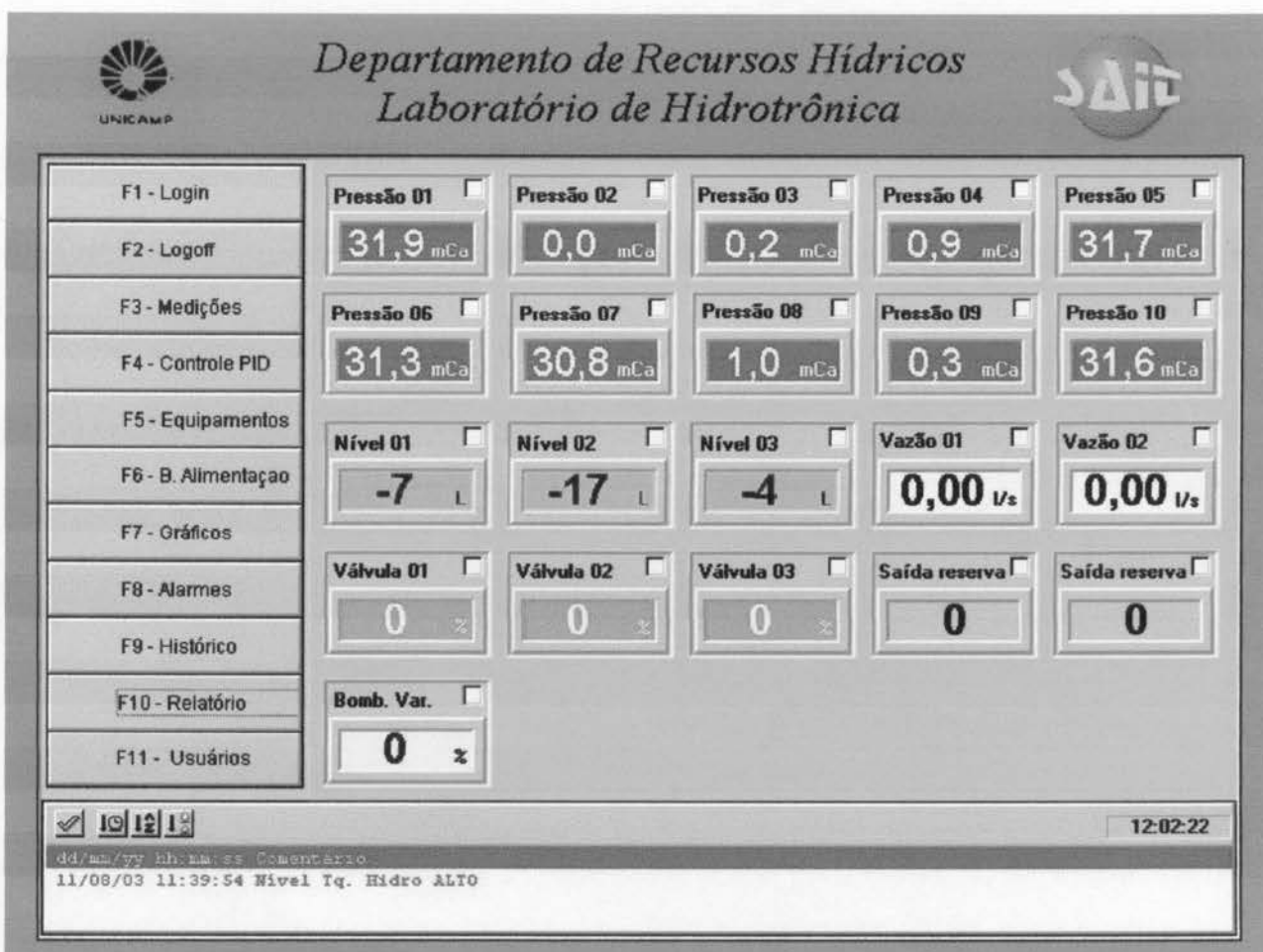


Figura 4.23 – Medidas diretas.

Uma outra opção, figura 4.24, seria a visualização gráfica desses valores medidos. Ela é apenas momentânea. Caso se queira armazenar esses dados, basta clicar em “salvar” que os valores são exportados para uma planilha de cálculo (ex: Excel).

Nessa figura 4.24 pode-se observar ainda a opção ligar e desligar a válvula solenóide, que causaria um transitório no sistema hidráulico. Essa representação gráfica desse fenômeno, em tempo real, torna-se bastante didático, facilitando sua compreensão.

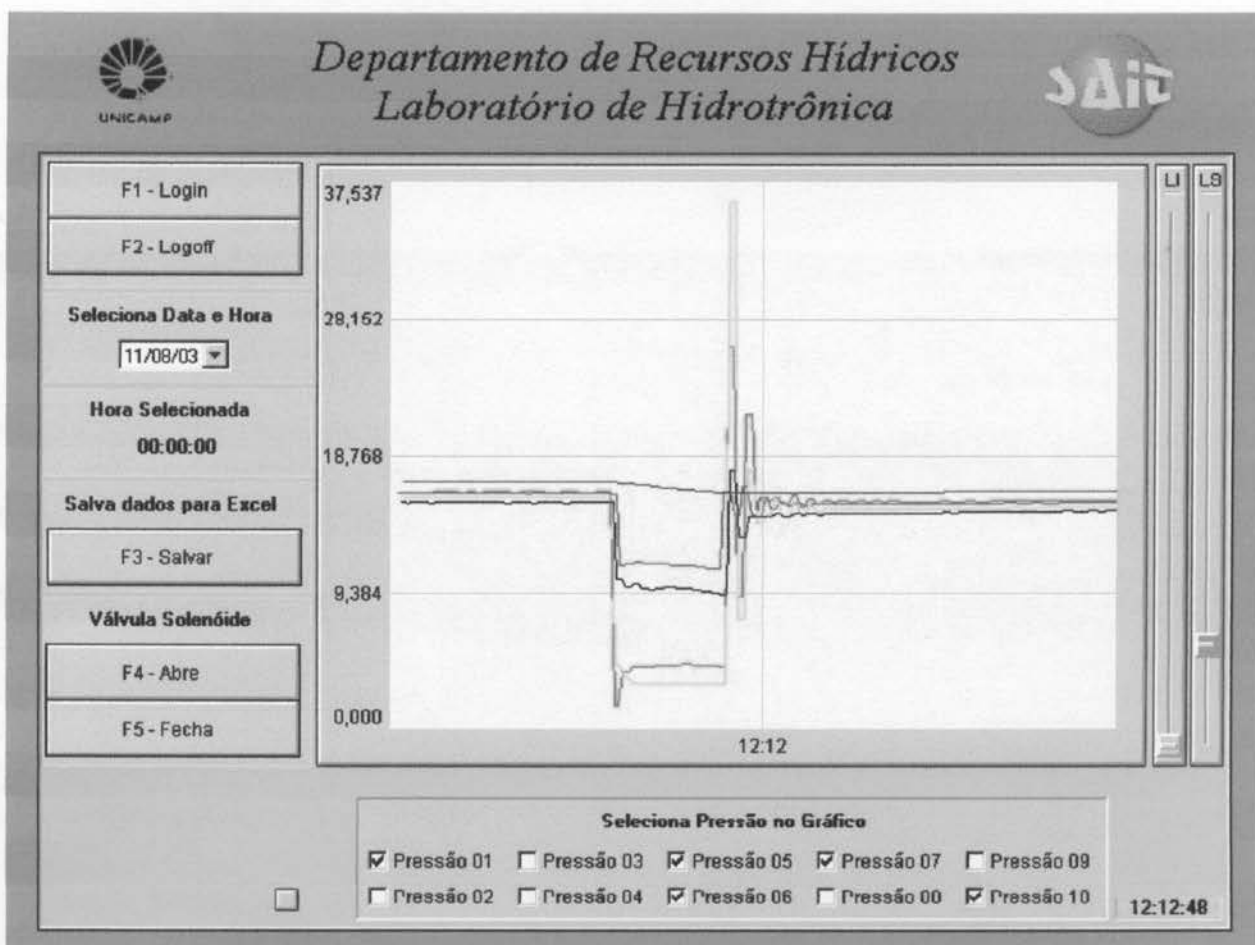


Figura 4.24 – Representação gráfica dos valores calculados.

Para a representação gráfica da pressão que se deseja, basta clicar na opção “seleciona pressão no gráfico”. Observa-se que pela figura acima foi apresentado o gráfico dos transdutores de pressão 01, 05, 06, 07 e 10.

5 SIMULAÇÕES DOS MODELOS MATEMÁTICOS/COMPUTACIONAIS

O sistema hidráulico simulado consiste de um reservatório num extremo de um tubo e uma válvula no outro extremo, como mostra a figura 3.1. Para a simulação deve-se conhecer os parâmetros representativos deste sistema que são: comprimentos, diâmetros, coeficientes de perdas de carga distribuída e localizada etc. Foram levantados os seguintes valores:

Comprimento de tubo de cobre: 44,27 m

Comprimento de tubo de PEAD: 507,73 m

Diâmetro do tubo de cobre: 17mm

Diâmetro do tubo de PEAD: 15 mm

Espessura da parede do tubo de cobre: 1mm

Espessura da parede do tubo de PEAD: 2,5 mm

Módulo de elasticidade do cobre: 131 GPa.

Módulo de elasticidade do PEAD: 0,8 GPa.

A rugosidade absoluta (ε) da parede do tubo de cobre e a de PEAD estão num intervalo de 0,01 a 0,0015 mm de acordo com Porto(2001). Adotou a rugosidade de 0,01 mm para o cobre e 0,0015 mm para o PEAD.

A somatória de todos os coeficientes K_s dos acessórios , com base no quadro 3.1, vale:

$$\sum K_s = 435,1$$

Uma das dificuldades encontradas foi o levantamento do coeficiente K_s para os engates rápidos e as mangueiras plásticas. O seu valor foi estimado calculando as perdas de carga localizadas entre os extremos da mangueira plástica onde estão conectados os engates rápidos. Esse levantamento foi feito para vários regimes permanente onde plotaram-se esses dados encontrados no gráfico da figura 5.1 abaixo:

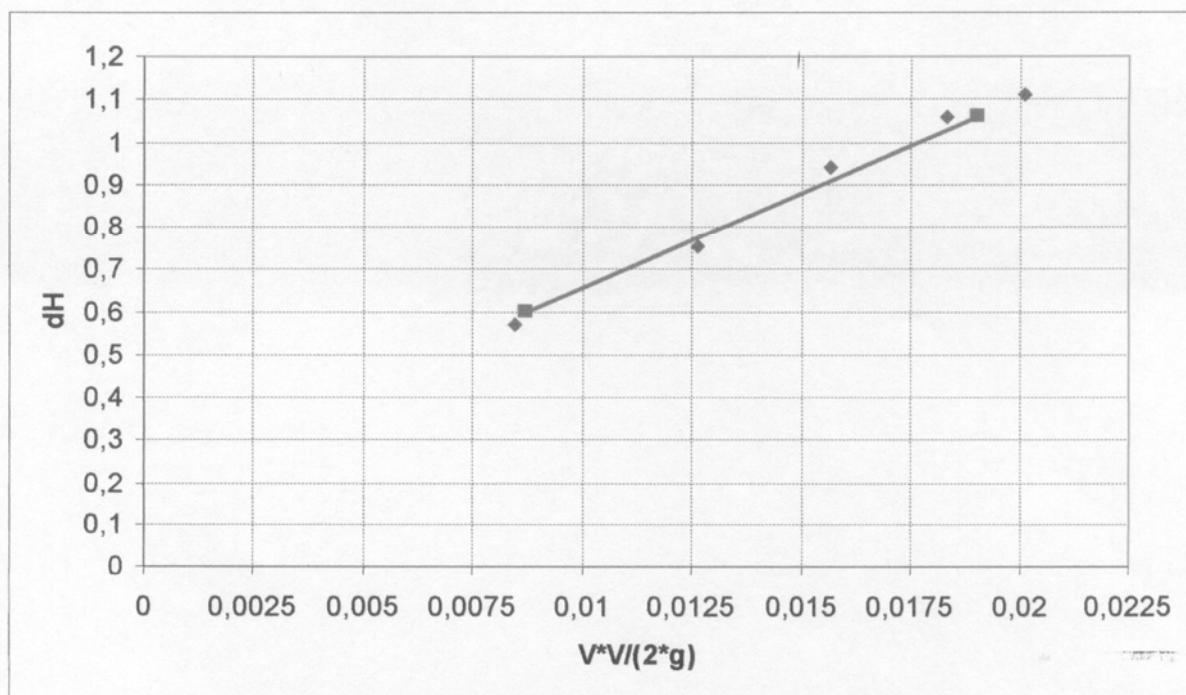


Figura 5.1 – Cálculo do K_s para os engates rápidos.

Depois de plotados os dados, traçou-se uma reta que melhor representa esse pontos e a declividade da mesma corresponde ao valor de K_e , que é o coeficiente K_s dos engates juntamente com a mangueira plástica. O valor da K_e encontrado foi aproximadamente igual a 40.

Com esses dados e as rotinas de simulação pode-se calcular o regime permanente e o regime transitório para uma determinada operação.

5.1 Cálculo do regime permanente

Realizando-se o procedimento descrito no item 3.1, adotou-se inicialmente o mesmo fator de atrito de 0,018 para o cobre (f_c) e para o PEAD (f_p). Como essa instalação possui dois tubos de materiais e geometrias diferentes, a equação 3.2 resulta:

$$Q = \left(\frac{2gH_R}{1 + \sum K_s + K_v + \frac{f_c L_{Cl}}{D_c} + \frac{f_p L_p}{D_p}} \right)^{\frac{1}{2}} A \quad (5.1)$$

Depois de algumas iterações os valores de f resultante para os tubos foram: $f_c \cong 0,037$ e $f_p \cong 0,036$ resultando numa vazão de $Q \cong 0,0971 \text{ l/s}$.

5.2 Simulação do regime transitório

Nas simulações realizadas foi considerado que toda a tubulação fosse de PEAD com um comprimento total de 552 metros. Realizou-se esta consideração, pois o comprimento da tubulação de cobre (44,27 metros) corresponde apenas a 8,02% do total. Para adotar esta hipótese, fez-se a correção da celeridade, encontrando uma celeridade resultante (a_R).

O valor da celeridade pode ser calculado analiticamente para qualquer escamento pela equação 3.25. No cálculo da celeridade para o cobre (a_c) e para o PEAD (a_p) considerou que o movimento longitudinal é restrito pela pressão interna exercida no extremo do tubo e que ambos se encaixam na categoria de tubos de paredes espessa, pois possuem uma relação D/e menor que 40, conforme apresentado no item 3.2.2. Os valores das suas celeridades, considerando-se

que o módulo de elasticidade volumétrico (K_v) vale 2,1 GPa e a massa específica da água (ρ) vale 998 kg/m^3 foram:

$$a_c \cong 1308 \text{ m/s}$$

$$a_p \cong 331 \text{ m/s}$$

O valor da celeridade resultante (a_R), de acordo com a equação 3.32 foi:

$$a_R \cong 354 \text{ m/s}$$

Uma primeira simulação do regime transitório foi considerar o fator de atrito constante e comparar a concepção da malha regular com a malha escalonada cruzada, conforme a figura 5.2 abaixo:

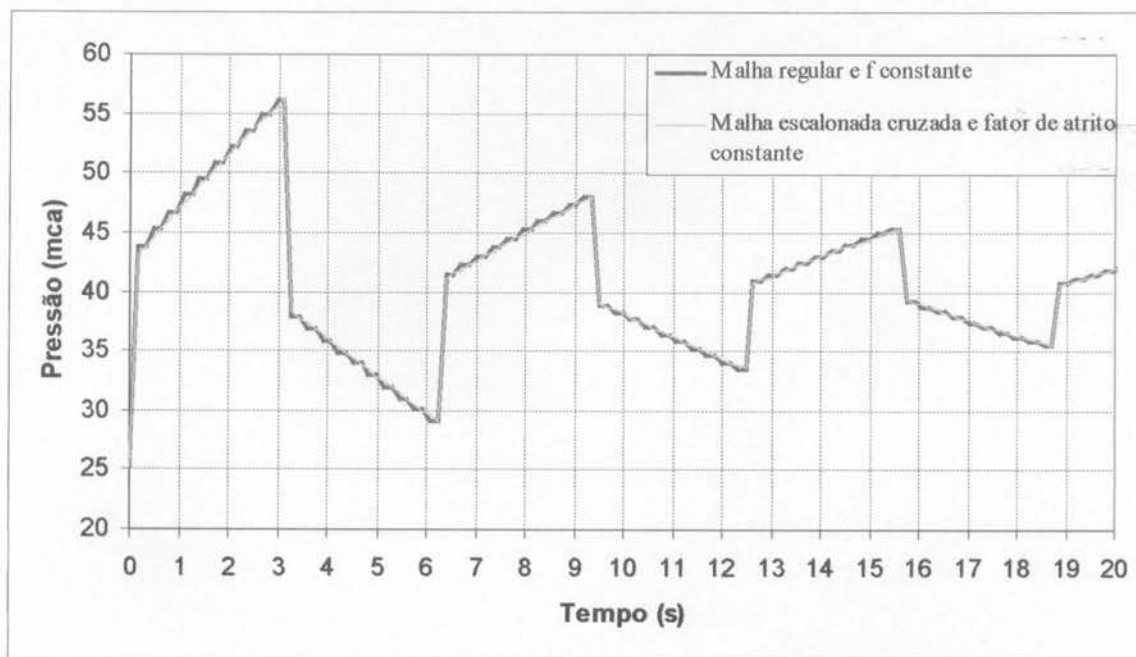


Figura 5.2 - Fator de atrito constante com as malhas de integração.

Observa-se que variando o tipo de malha de cálculo não houve diferenças significativas.

Fazendo novamente uma comparação entre as duas concepções de malhas, porém, para o fator de atrito corrigido a cada intervalo de tempo, figura 5.3, obteve-se:

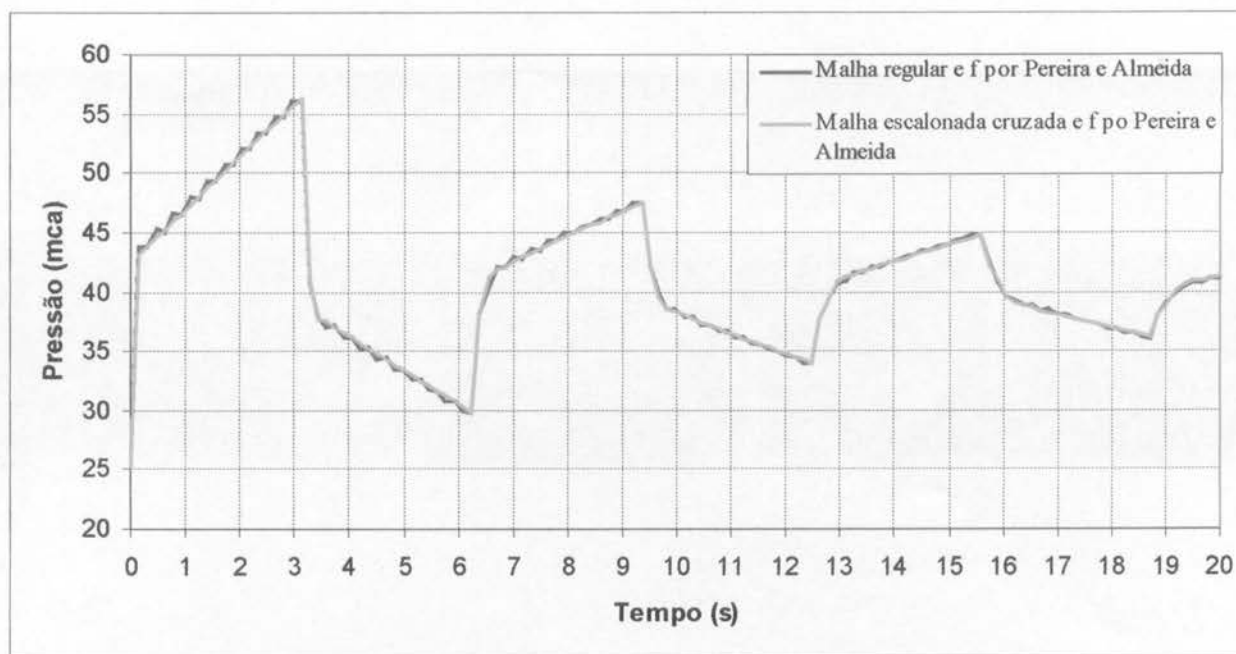


Figura 5.3 - Fator de atrito por Pereira e Almeida com as malhas de integração.

Novamente não houve diferenças significativas entre os tipos de malhas de cálculo.

Na modelação matemática, a dissipação de uma onda no regime transitório pode assumir comportamentos diferentes dependendo do tipo de consideração que se faz no fator de atrito. A figura 5.4 ilustra diferentes dissipações desta onda quando se adota um fator de atrito constante ao longo do tempo ou quando o corrige a cada novo instante de tempo. Para se perceber estas diferenças, aumentou-se de 20 segundos para 50 segundos o tempo de cálculo. Utilizou-se a concepção da malha escalonada cruzada.

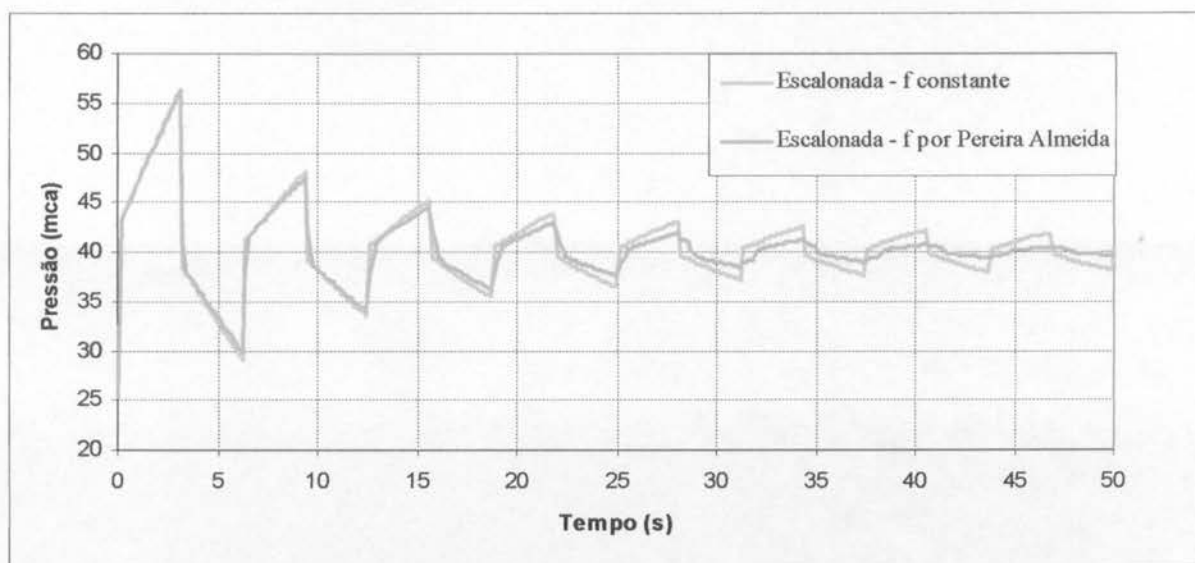


Figura 5.4 – Dissipações diferentes da propagação da onda do transitório.

Observa-se que a correção do fator de atrito a cada novo instante de tempo resulta numa dissipação mais rápida.

Uma outra análise foi simular o regime transitório considerando a inércia do fluido no cálculo do fator de atrito, utilizando-se o modelo proposto por Brunone (1999), como mostra a figura 5.5:

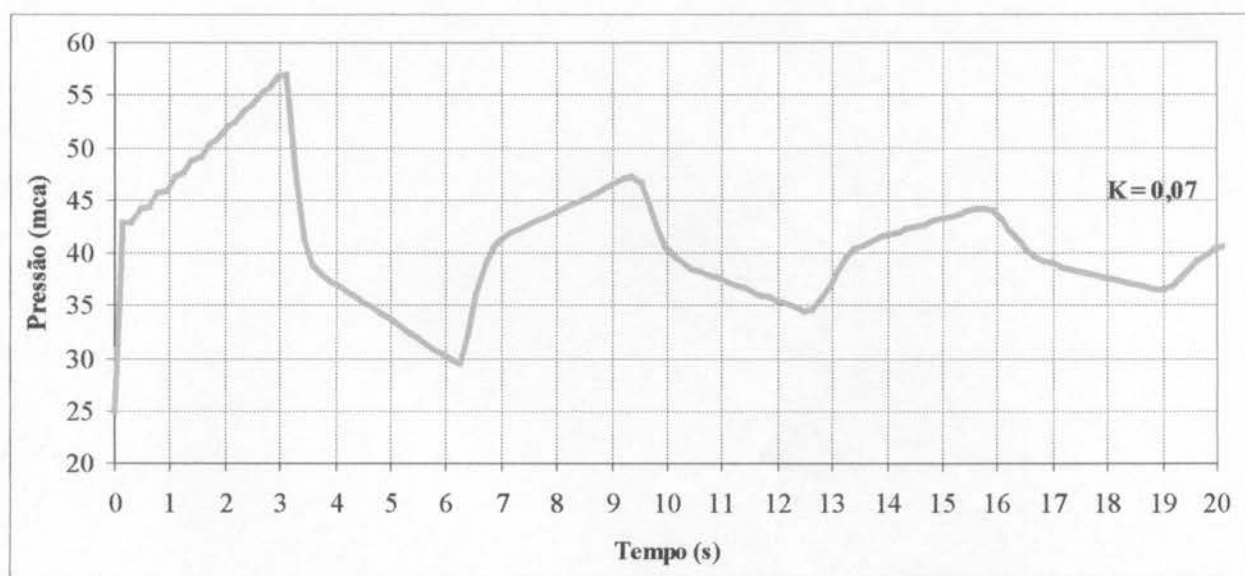


Figura 5.5 – Modelo proposto por Brunone.

A consideração do valor da constante K foi de 0,07, sugerida pelo próprio autor.

Uma análise final, figura 5.6 é a comparação de todos os modelos de cálculo citados anteriormente na análise do transitório.

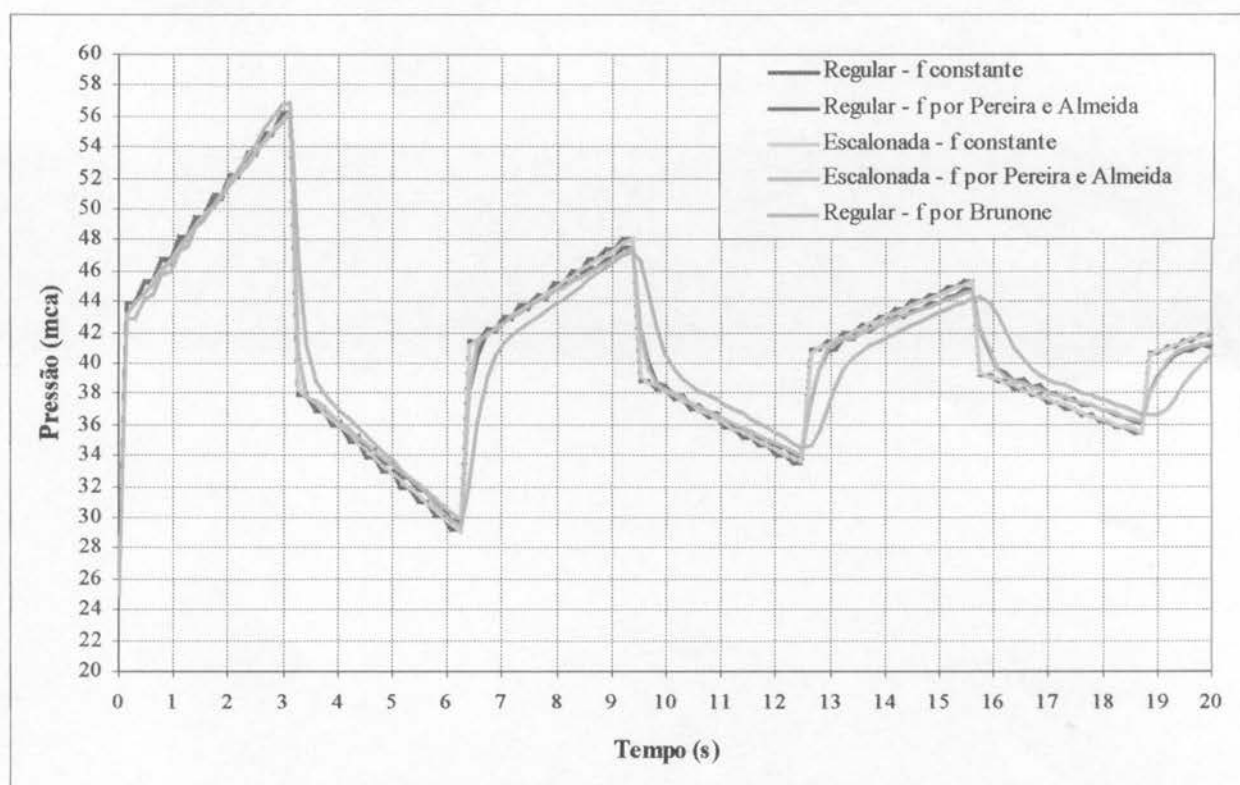


Figura 5.6 – Comparação de todos os modelos matemáticos.

A consideração da inércia do fluido na correção do fator de atrito fez com que a dissipação da onda do transitório fosse ainda mais rápida.

6 MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

No painel de conexão pode-se configurar a topologia de uma instalação a ser analisada. A figura 6.1 apresenta a representação esquemática deste painel.

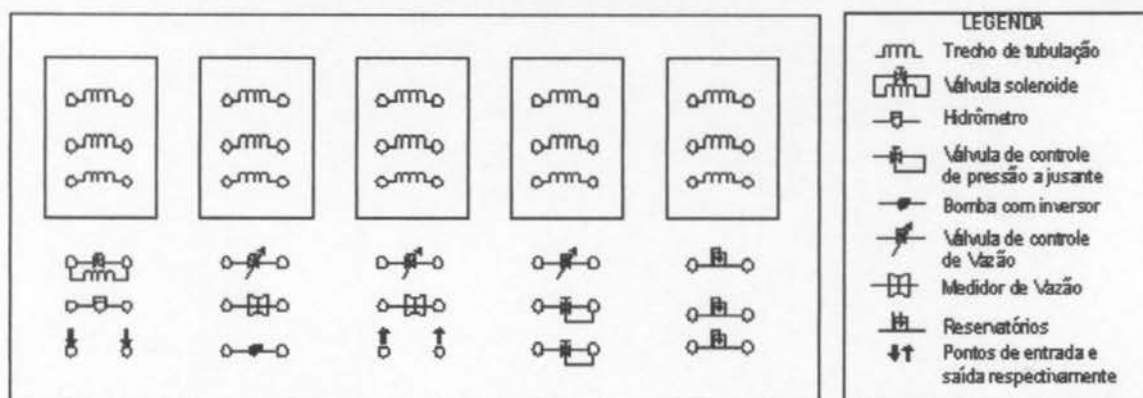


Figura 6.1 – Desenho esquemático do painel de conexão.

Para conseguir retratar no modelo físico a mesma situação que foi simulada no modelo matemático, isto é, reservatório, tubo e válvula, primeiramente teve que se estabilizar o regime permanente para depois criar o transitório nesse sistema.

A figura 6.2 a seguir ilustra como foram realizadas as ligações dos elementos do sistema para se conseguir a topologia em estudo.

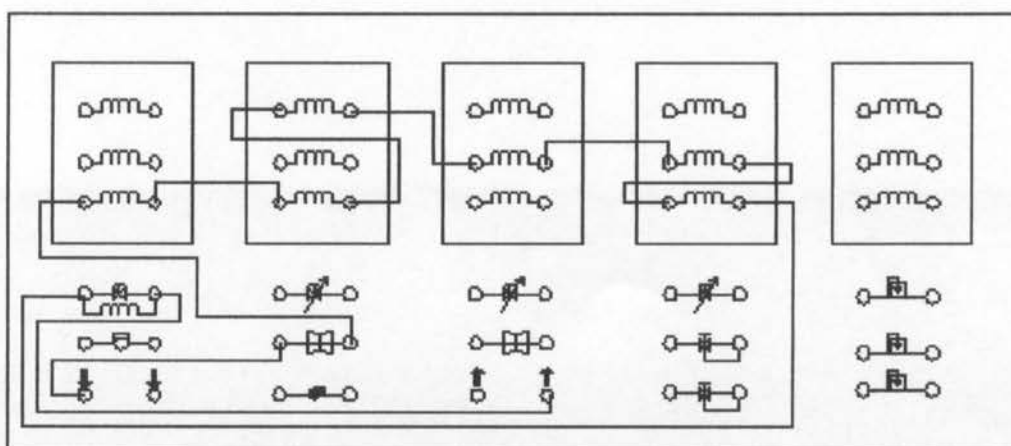


Figura 6.2 – Topologia do sistema no painel de conexão

A estabilização o regime permanente na instalação experimental foi conseguida via circuito fechado até que o reservatório de pressão mantivesse o equilíbrio, ou seja, vazão de entrada igual a de saída e pressão constante.

Para que se consiga manter a mesma vazão que entra e que sai do vaso de pressão (vazão de montante igual a vazão de jusante), deve-se realizar um fechamento parcial na válvula que fica entre o conjunto moto-bomba e este o vaso de pressão. Com esse fechamento, mudam-se os pontos de operação destas bombas devido ao acréscimo de perda de carga.

Para se ter a mesma situação do sistema hidráulico que foi escolhida para a simulação dos modelos matemáticos, o vaso de pressão do modelo físico é o reservatório de nível constante, as hélices correspondem ao comprimento do tubo (o comprimento do tubo depende de quantas voltas são usadas) e a válvula solenóide corresponde à válvula de fechamento instantâneo.

Para as simulações no modelo físico, a pressão no reservatório hidropneumático foi mantida constante a um valor de 40 m.c.a. e o transdutor de pressão foi instalado próximo à válvula solenóide, fornecendo um valor de 25 m.c.a. quando em regime permanente.

6.3: Fechando “instantaneamente” a válvula solenóide, gerou o seguinte gráfico da figura

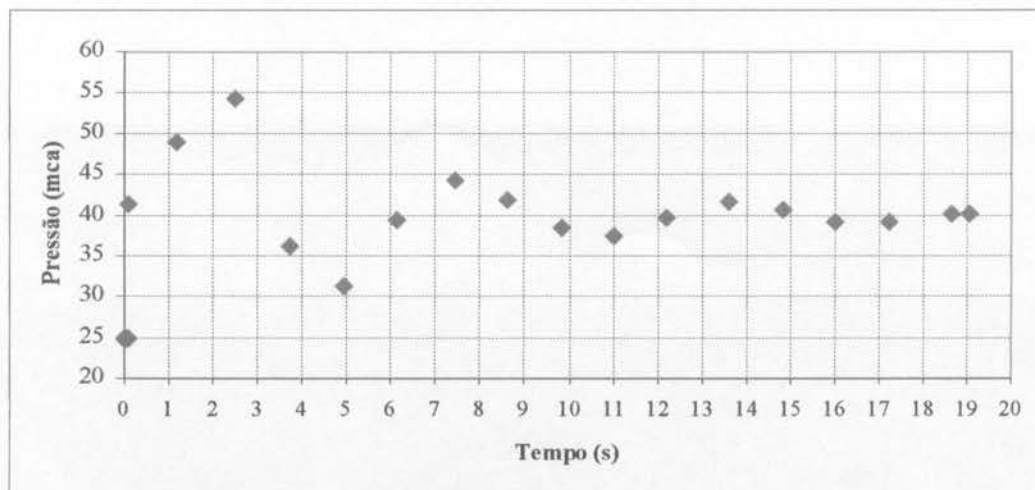


Figura 6.3 – Pontos de pressão obtidos em laboratório durante o transitório.

Observa-se pelo gráfico acima que a aquisição de dados ocorreu em intervalos de tempo maiores que 1 segundo.

A figura 6.4 mostra a ligação dos pontos obtidos para se ter uma melhor idéia de como é o comportamento da propagação dessa onda durante o transitório.

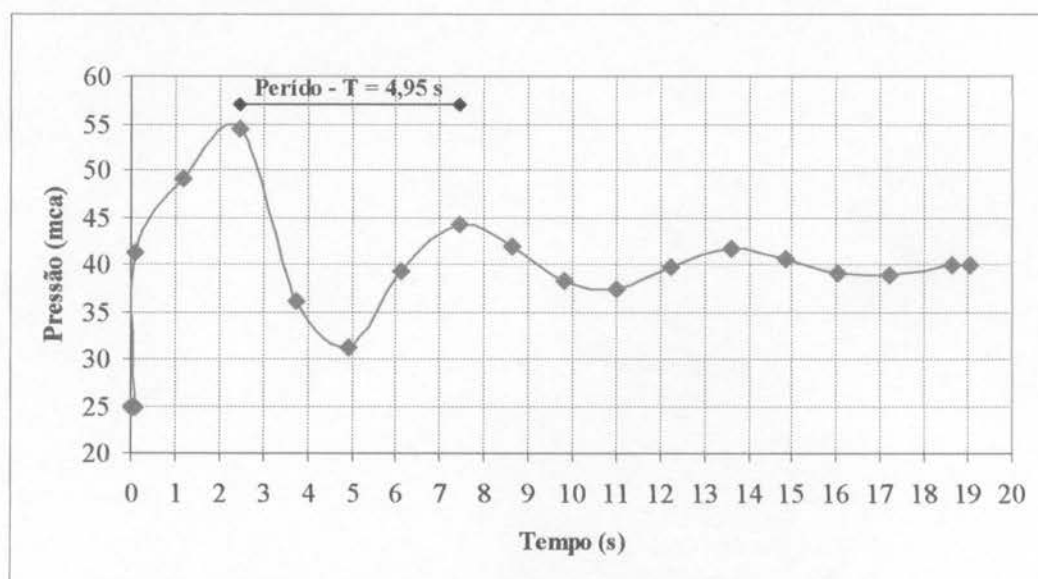


Figura 6.4 – Visualização da onda de pressão do modelo experimental.

O valor da celeridade pode ser comprovado experimentalmente utilizando o período (T) da resposta transitória. Sabendo-se que o período é aproximadamente 4,95 segundos, pela equação 3.33, encontra-se o valor da celeridade:

$$a = 446 \text{ m/s}$$

A figura 6.5 a seguir apresenta todos os modelos matemáticos gerados juntamente com os resultados obtidos no modelo experimental.

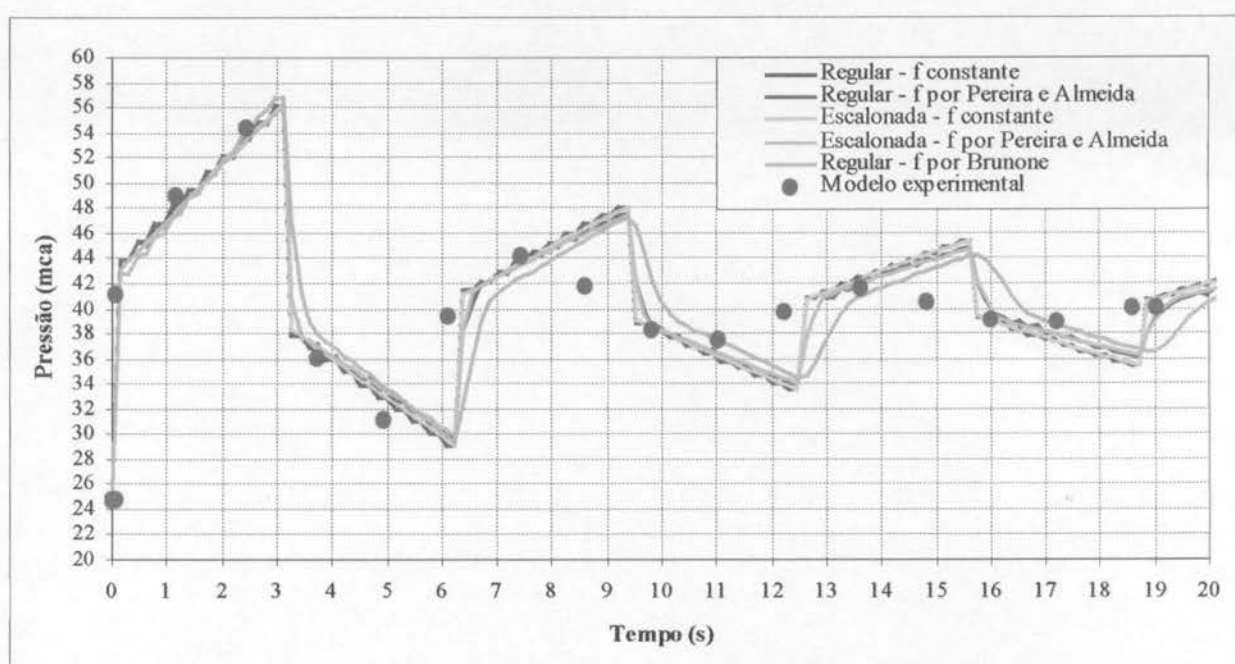


Figura 6.5 – Ensaio realizado entre os modelos matemáticos e o experimental.

Percebe-se pelo gráfico acima que inicialmente os modelos matemáticos se aproximam do modelo experimental, passando a sofrerem dissipações diferentes com o passar do tempo. Vale lembrar que os modelos matemáticos foram gerados com uma celeridade de 354 m/s diferente da celeridade obtida no modelo experimental.

O modelo proposto por Brunone (1999) possui uma vantagem em relação aos demais pelo fato de se conseguir alterar o valor de sua constante K , podendo-se tentar aproximá-lo mais dos modelos reais como mostra a figura 6.6 a seguir:

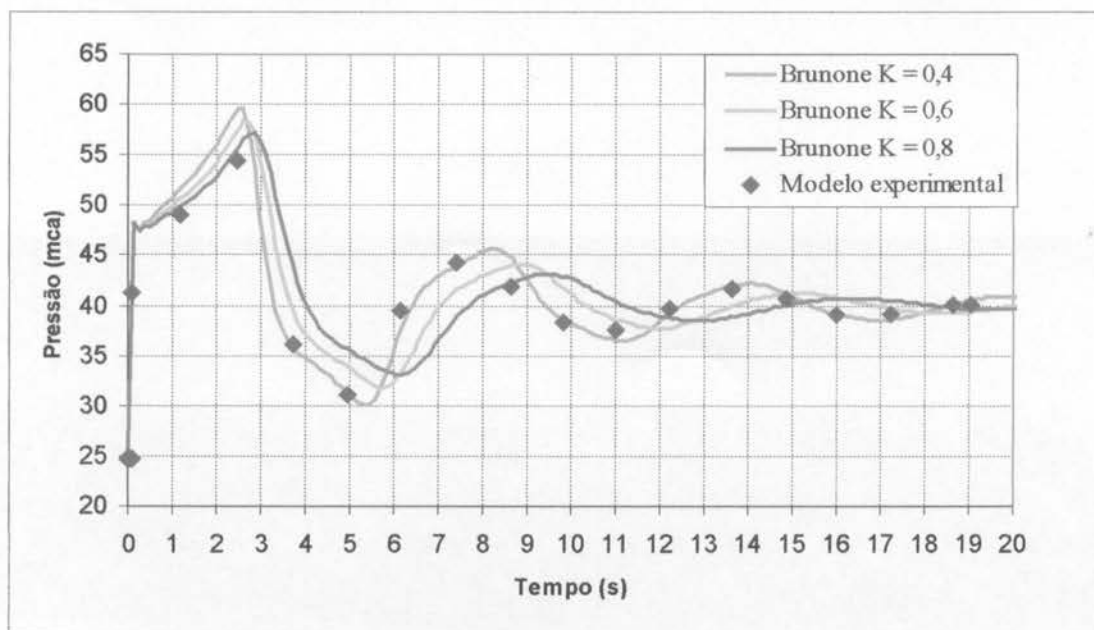


Figura 6.6 – Aproximação do modelo proposto por Brunone.

Nesta simulação matemática utilizou-se a mesma celeridade calculada no modelo experimental. Para valores de K próximos de 0,4 esse modelo matemático conseguiu acompanhar o que foi obtido experimentalmente. A medida que o valor desta constante aumenta, o amortecimento da onda transitória ocorre mais rapidamente.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1 Cálculo da celeridade

Percebe-se uma diferença significativa entre o valor experimental e o analítico. Neste caso, o valor experimental passa a ser questionado uma vez que o intervalo de tempo está relativamente alto podendo estar ocorrendo a perda de valores experimentais importantes. Fato que vem a indicar que o aquisitor de sinais deve ser reestruturado.

Observa-se também a sensibilidade do período T no cálculo da celeridade. Um acréscimo, por exemplo, de 1 segundo no cálculo da celeridade do modelo experimental resultaria numa redução considerável do valor da mesma, assumindo valores na ordem de 371m/s aproximando-se mais da celeridade calculada analiticamente.

7.2 Análise do transitório

Observou-se que o tipo de malha de cálculo (malha regular e malha escalonada cruzada) utilizada para esse sistema hidráulico proposto, não causou diferenças significativas na propagação das ondas do transiente hidráulico. Outras instalações devem ser estudadas para se conseguir obter diferenças entre essas malhas de cálculo.

A hipótese de se adotar a correção do fator de atrito a cada instante de tempo, ao invés de considerá-lo sempre constante durante o transiente, mostrou que a dissipação da onda é mais rápida para o primeiro caso, conforme a figura 5.4.

Deve-se ressaltar a flexibilidade que o modelo proposto por Brunone (1999) possui para se adaptar aos resultados obtidos em sistemas hidráulicos, como é o caso do modelo experimental que foi desenvolvido. Esta flexibilidade é alcançada devido às mudanças que se pode fazer na constante K , como foi mostrado pela figura 6.6.

8 CONCLUSÃO

A instalação experimental construída mostrou-se adequada para a simulação de vários tipos de topologia de sistemas hidráulicos. Esta instalação compacta não deixou de lado os aspectos relevantes, tais como a diversidade de materiais, trechos longos de tubulações e elementos importantes como válvulas de controle, bombas de rotação variável e os controladores programáveis. A adoção do esquema de ligação em analogia ao “protoboard” utilizado em circuitos eletrônicos, possibilitou uma grande versatilidade à instalação, permitindo uma enorme quantidade de ensaios que podem ser desenvolvidos.

Os equipamentos de medição utilizados ainda necessitam de uma melhor calibração, para poderem fornecer dados experimentais mais confiáveis, podendo assim, validar um determinado modelo matemático.

Os modelos matemáticos/computacionais permitiram obter resultados simulados possibilitando a comparação entre os diversos tipos de malhas, bem como, alternativas para cálculo do fator de atrito. As diferenças entre a malha regular e a malha escalonada cruzada não foram significativas. Com relação às diferentes maneiras de se considerar o atrito, a correção do fator de atrito a cada intervalo de tempo resultou numa dissipação maior da onda transiente quando comparada com a dissipação da mesma para uma adoção do fator de atrito mantido constante durante o transitório.

Fica prejudicada a definição de qual modelo matemático seria mais eficaz, uma vez que, o aquisitor de dados registrou valores num intervalo de tempo maiores que 1 segundo, tempo este muito alto para registrar a onda transiente.

Apenas o modelo proposto por Brunone se mostrou vantajoso em relação aos demais pelo fato de se poder variar a sua constante K , tentando aproximá-lo mais de uma instalação real. No caso em estudo tentou-se encontrar qual o valor de K do modelo que mais o fez aproximar da instalação experimental construída. Vários estudos foram encontrados na literatura na tentativa de se estabelecer um critério na determinação do K o que não foi significativo ainda para se estabelecer uma lei válida para todos os casos.

Finalmente, sugere-se que em uma próxima etapa deve-se enfatizar a calibração dos medidores de vazão e aquisitor de sinal da instalação experimental. A seguir, sugere-se realizar ensaios com outros tipos de topologia como, por exemplo, redes de distribuição de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J.G.P., (1994), Análise e otimização da operação de usinas hidrelétricas, Tese de Livre Docência, UNICAMP, Campinas, Brasil.

ANDRADE, J.G.P., (2001), Notas de aula do curso de bombas e adutoras – UNICAMP, Campinas, Brasil.

ANDRADE, J.G.P., (2001), Notas de aula do curso de complementos de hidráulica – UNICAMP, Campinas, Brasil.

ANDRADE, J.G.P. & LUVIZOTTO JR., E., (2002), Laboratório de hidrotônica, uma nova perspectiva para o ensino e pesquisa em sistemas de abastecimento de água, seminário hispano brasileiro-planificación, proyecto y operación de redes de abastecimento de agua, vol 1, pp. 1-1, Valência, Espanha.

AZEVEDO NETTO, J.M., (1998), Manual de Hidráulica, 8ª ed., São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 669 p.

BRUNONE, B. & MORELLI., (1999), Automatic control valve-induced transients in operative pipe system, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, V.125(5), May, pp.534-542.

CHAUDHRY, M.H., (1986), Applied hydraulic transients, Van Nostrand Reinhold Company, 2nd Edition, New York.

KOELLE, E., (1982), Intercâmbio Internacional Sobre Transientes Hidráulicos e Cavitação, organizado pelo Centro Tecnológico de Hidráulica do Departamento de Águas e Energia Elétrica – CTH/DAEE e Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, São Paulo, Brasil.

KOELLE, E., (1983), Transientes hidráulicos em instalações de condutos forçados, aplicações em Engenharia, Apostila da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

KOELLE, E., (2001), Apostila de notas de aula do curso de transiente hidráulico, UNICAMP, Campinas, Brasil.

KOELLE, E., (2002), Notas de aula do curso de aproveitamento hidrelétrico, UNICAMP, Campinas, Brasil.

LAURIA, J.C., (1986), Um método de seleção de válvulas para o controle do escoamento em sistemas hidráulicos, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP.

LUVIZOTTO JR., E., (1995), Controle operacional de redes de abastecimento de água auxiliado por computador, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP.

PORTO, R. M., (1999), Hidráulica Básica, 2ª ed., São Carlos: EESC-USP.

RIBEIRO, C. R. , (1985), Controle de Escoamentos em Instalações de Condutos Forçados, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP.

ROCHA, M. S., (1998), Influência do fator de atrito no cálculo do transiente hidráulico, Tese de Mestrado, UNICAMP, Campinas.

STREETER, V. L., & Wylie E. B., (1993), Fluid transients in systems.

Vardy, A. E. & Brown, J., (1993), A weighting function model of transient turbulent pipe friction, Journal of Hydraulic Research, Vol. 31, NO. 4.

VIARO, V.L., (2001), Influência do fator de atrito variável na avaliação do escoamento transitório em sistemas hidráulicos, Tese de Mestrado, UNICAMP, Campinas.

ABSTRACT

The operation of the distribution system water is becoming more complex. Thus, computational and mathematical modelings were developed in order to permit simulation to help the control of these systems. The confiability of these models is proved by the comparison of the results with experimental data. Due the complexity of the system, to get these data in real situations are a hard work, in operational and financial part.

In order to solve this difficult, this work intend to built a experimental installation that will allowed to make theoretical and experimental comparisons with many models developed for that, resulting in its adequacy for application in engineering problems.

Key words:experimental model, matemathical model